

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ALGUNS ASPECTOS RELATIVOS À INSPEÇÃO E  
RECUPERAÇÃO DE PONTES DE AÇO  
— ÊNFASE EM PONTES FERROVIÁRIAS —

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de "Doutor em Engenharia", área: Estruturas.

Eng. ROBERTO MARTINS GONÇALVES

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

COMISSÃO EXAMINADORA

PROF. DR. WALTER ABRAHÃO NIMIR (ORIENTADOR)  
PROF. DR. ALOÍSIO F. MARGARIDO (Titular)  
PROF. DR. JOSÉ LUIZ A. O. e SOUZA (Titular)  
PROF. DR. ILIO MONTANARI (Titular)  
PROF. DR. MOUNIR KHALIL EL DEBS (Titular)  
PROF. DR. RICARDO H. FAKURY (Suplente)  
PROF. DR. LEANDRO PALERMO JUNIOR (Suplente)  
PROF. DR. JOÃO BENTO DE HANAI (Suplente)  
PROF. DR. JEFFERSON B. L. LIBÓRIO (Suplente)

São Carlos, Julho de 1992

*Dedico este*

*à Lourdes e ao Ricardão que tudo começaram;*

*à Vera, amiga e companheira, por tudo;*

*ao Cui e ao Fer, que deverão tudo continuar.*

## AGRADECIMENTOS

Ao finalizar este trabalho deparei-me com uma grande dificuldade: agradecer a todos aqueles que contribuíram para sua realização.

Acredito que a melhor forma de fazê-lo é procurar lembrar de todos; aos colegas do Departamento de Estruturas, aos técnicos do Laboratório de Estruturas, ao pessoal da Secretaria, aos engenheiros da RFFSA-Rede Ferroviária federal, regional Curitiba e particularmente a aqueles que mais diretamente contribuíram, sinto-me na obrigação de mencioná-los:

- à FAPESP-Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo auxílio recebido;

- aos funcionários da secretaria pela ajuda e compreensão, em particular à Rosi e ao Toninho, pela digitação;

- ao Chico, pela excelência de seus desenhos;

- à equipe de técnicos do Laboratório de Estruturas pela colaboração nos ensaios e nos trabalhos de campo;

- aos colegas da área de Estruturas Metálicas, Pierre e Jairo, pelo apoio e colaboração;

- ao meu orientador, Prof. Nimir, pela contribuição e dedicação;

- a dois grandes amigos, engenheiros com "E" maiúsculo, José Carlos Filizola e Raul Ozório de Almeida;

- a um colega para o qual qualquer agradecimento seria pouco nestes anos todos de convívio, Professor e Engenheiro Toshiaki Takeya;

- à Vera pela compreensão e ajuda imprescindível.

## RESUMO

Apresentam-se alguns dos aspectos principais relacionados a inspeção e recuperação de pontes de aço, bem como os resultados obtidos em ensaios realizados em quatro vigas rebitadas de aço. Alguns dados históricos sobre pontes e sobre recuperações são utilizados para destacar aspectos relevantes para a melhor compreensão dos demais assuntos abordados.

Baseado na realidade e em exemplos brasileiros são ilustrados os principais tipos de deterioração e suas consequências para a vida útil de uma ponte, associando-os à necessidade de inspeção e manutenções periódicas. São também apresentados os principais aspectos necessários para a realização de inspeções, bem como para a recuperação de pontes e de seus elementos.

A seguir são abordadas as provas de carga em pontes de aço, inicialmente com os principais equipamentos utilizados e, após isto, apresentam-se dois casos estudados pelo Laboratório de Estruturas, bem como exemplos de provas de carga relatados na bibliografia.

São discutidos os resultados da análise experimental de quatro vigas rebitadas. A primeira sem reforço, a segunda reforçada com chapas nas mesas; a terceira, reforçada com tirantes pré-tensionados e uma viga armada.



## ABSTRACT

Some of the main aspects related to steel bridge inspection and recuperation, as well as test results of four riveted beams, are presented. Historical data on bridges and on recuperation are utilized to emphasize relevant aspects for a better understanding of other involved subjects.

Based on examples and Brazilian reality, the principal types of deterioration and their effects on bridge useful life are illustrated, and related to the necessary inspections and periodical maintenance. The principal aspects for inspections, and for the recuperation of parts or of the entire bridge are also discussed.

Steel bridges tests, equipments utilized in load tests, are initially covered, and two cases analysed by the Structures Laboratory, and load tests examples, related in literature, are presented.

Four riveted beams results from experimental analysis are discussed, covering the cases of unreinforced beam, reinforced with plates on the flanges, reinforced with prestressed ties and a beam with polygonal ties installed outside.

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| INTRODUÇÃO   | 1  |
| <b>CAPÍTULO I</b> <b>Dados Históricos das Pontes e das Recuperações</b>  |    |
| I.1- Dados Históricos sobre as Pontes ---<br>Aspectos Gerais             | 4  |
| I.2- Dados Históricos sobre as Pontes no Brasil                          | 13 |
| I.3- Dados Históricos sobre a Recuperação<br>de Pontes                   | 16 |
| <b>CAPÍTULO II</b> <b>Inspeção de Pontes de Aço</b>                      |    |
| II.1- Preliminares   | 28 |
| II.2- Aspectos Gerais da Inspeção  | 30 |
| II.2.1- Inspeção para Cadastramento                                      | 30 |
| II.2.2- Inspeção de Pontes Deterioradas                                  | 31 |
| II.3- Métodos de Avaliação para Pontes Deterioradas                      | 34 |
| II.3.1- Avaliação Estrutural —<br>Método da Minoração Fixa               | 35 |
| II.3.2- Avaliação Estrutural —<br>Método das Condições Reais             | 36 |
| II.3.3- Avaliação Estrutural —<br>Provas de Carga                        | 37 |
| II.4- Exemplo de uma Inspeção — Ponte sobre<br>o Rio Casqueiro-Petrobrás | 38 |
| II.4.1- Metodologia Utilizada para a Inspeção                            | 39 |
| II.4.2- Exemplos dos Resultados Obtidos na Inspeção                      | 44 |
| II.4.3- Principais Conclusões Obtidas                                    | 46 |
| II.4.4- Cálculo e Projeto do Reforço                                     | 47 |
| II.4.5- Conclusões da Inspeção   | 48 |
| II.5- Conclusões   | 49 |

|              |   |   |     |
|--------------|---|---|-----|
| CAPÍTULO III |   | Principais Aspectos da Deterioração de Pontes |     |
| III.1-       | Preliminares                                  |   | 51  |
| III.2-       | Corrosão                                      |   | 51  |
| III.2.1-     | Formas de Corrosão                            |   | 54  |
| III.2.2-     | Exemplos Observados                           |   | 55  |
| III.2.3-     | Prevenção da Corrosão em Pontes —             |   |     |
|              | Alguns Aspectos                               |   | 59  |
| III.3-       | Afrouxamento de Ligações                      |   | 66  |
| III.3.1-     | Identificação do Afrouxamento de Ligações     |   | 67  |
| III.3.2-     | Alguns Exemplos do Afrouxamento de Ligações   |   | 68  |
| III.4-       | Danos Estruturais Devido ao Impacto de        |   |     |
|              | Objetos ou Veículos                           |   | 73  |
| III.4.1-     | Constatação dos Danos por Impactos e          |   |     |
|              | Cuidados                                      |   | 76  |
| III.5-       | Aparelhos de Apoio e Fundações                |   | 78  |
| III.5.1-     | Fundações                                     |   | 79  |
| III.5.2-     | Aparelhos de Apoio                            |   | 83  |
| III.6-       | Má Conservação das Vias                       |   | 86  |
| III.7-       | Fadiga  |   | 87  |
| III.7.1-     | Principais Fatores que Propiciam o            |   |     |
|              | Surgimento da Fadiga                          |   | 88  |
| III.7.2-     | Aspectos Gerais sobre Recomendações das       |   |     |
|              | Normas Técnicas                               |   | 90  |
| III.7.3-     | Exemplos da Ocorrência da Fadiga              |   | 93  |
| III.7.4-     | Métodos de Inspeção à Fadiga                  |   | 95  |
| III.8-       | Conclusões                                    |   | 97  |
| CAPÍTULO IV  |   | Recuperação e Reforço de Elementos que        |     |
|              |   | Compõem as Pontes                             |     |
| IV.1-        | Preliminares                                  |   | 99  |
| IV.2-        | Caracterização de Alguns Tipos de Recuperação |   |     |
|              | ou Reforço de Elementos                       |   | 101 |
| IV.3-        | Recuperação ou Reforço de Ligações            |   | 119 |
| IV.3.1-      | Ligações Pebitadas                            |   | 119 |
| IV.3.2-      | Ligações Soldadas                             |   | 120 |
| IV.4-        | Conclusões                                    |   | 123 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>CAPÍTULO V</b>  |     |
| <b>Aumento da Capacidade de Pontes Existentes</b>  |     |
| V.1- Preliminares  | 125 |
| V.2- Redução da Carga Permanente   | 127 |
| V.3- Viga Mista  | 127 |
| V.3.1- Tipos de Conectores   | 129 |
| V.4- Aumento da Rigidez Transversal  | 131 |
| V.5- Alteração no Esquema Estático —   |     |
| Vínculos Externos  | 133 |
| V.5.1- Exemplos de Alteração do Esquema Estático   | 134 |
| V.6- Utilização de cabos para Reforço ou Aumento da Capacidade das Pontes                  | 139 |
| V.6.1- Aspectos Gerais do Projeto de Reforços com Cabos                                    | 144 |
| V.6.2- Informações Gerais para o Dimensionamento de Vigas Reforçadas com Cabos Protendidos | 148 |
| V.6.3- Análise das Tensões em Vigas Reforçadas por Cabos Protendidos                       | 148 |
| V.6.4- Carga Equivalente para Pontes Ferroviárias  | 162 |
| V.7- Conclusões  | 166 |
| <br>   |     |
| <b>CAPÍTULO VI</b>   |     |
| <b>Auscultação e Provas de Carga</b>   |     |
| VI.1- Preliminares   | 168 |
| VI.2- Preparação e Objetivos da Prova de Carga   | 170 |
| VI.3- Equipamentos de Medição  | 175 |
| VI.3.1- Deslocamentos Lineares   | 175 |
| VI.3.1.1- Defletômetros ou Relógios Comparadores   | 175 |
| VI.3.1.2- Transdutores Indutivos de Deslocamento   | 176 |
| VI.3.1.3- Medições Topográficas  | 178 |
| VI.3.1.4- Leitura Direta de Réguas Milimetradas  | 178 |
| VI.3.1.5- Vasos Comunicantes   | 179 |
| VI.3.2- Deslocamentos Angulares  | 180 |
| VI.3.2.1- Clinômetro de Bólha  | 180 |
| VI.3.2.2- Defletômetros  | 181 |
| VI.3.3- Medidas de Deformações   | 181 |
| VI.3.3.1- Extensômetros Mecânicos  | 184 |
| VI.3.3.2- Extensômetros Elétricos de Resistência   | 186 |
| VI.3.3.3- Outros Dispositivos de Medição de Deformações                                    | 193 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| VI.4-     | Análise dos Resultados   | 194 |
| VI.5-     | Exemplos de Provas de Carga  | 197 |
| VI.5.1-   | Provas de Carga — Estado Limite Último                               | 198 |
| VI.5.2-   | Provas de Carga — Ponte Sobre<br>o Rio Mattawa                       | 200 |
| VI.5.2.1- | Características da Ponte   | 200 |
| VI.5.2.2- | Carregamentos Utilizados   | 201 |
| VI.5.2.3- | Instrumentos de Medição  | 202 |
| VI.5.2.4- | Resultados e Comentários   | 202 |
| VI.5.3-   | Prova de Carga — Ponte Ferroviária FEPASA                            | 203 |
| VI.5.3.1- | Características da Ponte   | 203 |
| VI.5.3.2- | Equipamentos Utilizados na Prova de<br>Carga e Pontos Instrumentadas | 206 |
| VI.5.3.3- | Descrição dos Ensaios  | 207 |
| VI.5.3.4- | Principais Resultados Obtidos  | 210 |
| VI.5.3.5- | Análise dos Resultados   | 210 |
| VI.5.4-   | Prova de Carga — Ponte Ferroviária RFFSA                             | 215 |
| VI.5.4.1- | Descrição da Ponte   | 215 |
| VI.5.4.2- | Instrumentação da Prova de Carga                                     | 219 |
| VI.5.4.3- | Carregamentos  | 223 |
| VI.5.4.4- | Modelo Teórico e Resultados  | 227 |
| VI.6-     | Conclusões   | 230 |

## CAPÍTULO VII      Estudo Experimental de Vigas Rebitadas

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| VII.1-     | Preliminares  | 233 |
| VII.2-     | Modelos Propostos                                   | 235 |
| VII.3-     | Metodologia dos Ensaios                             | 241 |
| VII.4-     | Análise dos Resultados                              | 253 |
| VII.4.1-   | Cálculo Teórico dos Modelos —<br>Comentários Gerais | 254 |
| VII.4.2-   | Resultados dos Ensaios — Deslocamentos              | 259 |
| VII.4.2.1- | Resultados dos Deslocamentos — Viga 1               | 259 |
| VII.4.2.2- | Resultados dos Deslocamentos — Viga 2               | 260 |
| VII.4.2.3- | Resultados dos Deslocamentos — Viga 3               | 261 |
| VII.4.2.4- | Resultados dos Deslocamentos — Viga 4               | 263 |
| VII.4.3-   | Resultados dos Ensaios — Tensões                    | 264 |
| VII.4.3.1- | Resultados das Tensões — Viga 1                     | 268 |
| VII.4.3.2- | Resultados das Tensões — Viga 2                     | 273 |
| VII.4.3.3- | Resultados das Tensões — Viga 3                     | 276 |

|  |     |
|--|-----|
| VII.4.3.4- Resultados das Tensões — Viga 4 | 278 |
| VII.5- Conclusões                          | 281 |
| CAPÍTULO VIII      Considerações Finais    | 284 |
| BIBLIOGRAFIA                               | 291 |

## INTRODUÇÃO

O tema deste trabalho, inspeção e recuperação de pontes de aço, é extremamente abrangente e por outro lado envolve muitas vezes aspectos que são particulares de cada ponte analisada.

Esta dualidade fez que com este trabalho abordasse o tema, como o próprio nome já apresenta — Alguns aspectos da — de maneira abrangente, onde procura-se traçar um panorama geral destes principais assuntos.

Pode-se afirmar que a ênfase dada as pontes ferroviárias é decorrência natural da realidade brasileira. As ferrovias foram implantadas no país por empresas estrangeiras, as quais importaram um grande número de pontes de aço.

Pode-se afirmar também que a "origem" deste trabalho foi a realização de uma prova de carga na ponte ferroviária sobre o rio Jaguari-Mirim, cujos resultados estão aqui relatados.

Esta prova de carga, a situação das pontes de aço e as dificuldades observadas associadas a um levantamento bibliográfico efetuado para um convênio com a FEPASA-Ferrovia Paulista S.A., não efetivado, permitiram definir e estabelecer as diretrizes que nortearam este trabalho.

A realização de um trabalho experimental associado aos trabalhos de campo — provas de carga de pontes existentes — é interesse pessoal do autor e também decorrência da

experiência e dos trabalhos já realizados pelo Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP. Já em 1958 uma ponte ferroviária sobre o rio Sapucaí-Mirim foi ensaiada pelo Prof. Dante A.O. Martinelli utilizando extensômetros elétricos de resistência — fato pioneiro na instrumentação de provas de carga em pontes no Brasil.

Este trabalho foi então desenvolvido baseado não só na bibliografia pesquisada mas também na experiência adquirida nas visitas a pontes, no contato com engenheiros responsáveis pela manutenção e recuperação de pontes ferroviárias e na troca de informações com engenheiros responsáveis pelos projetos e execução de reforços.

No primeiro capítulo aborda-se alguns dados históricos sobre pontes e recuperações, procurando permitir ao leitor um primeiro contato com o tema. Ilustra-se, também alguns exemplos de recuperações bem sucedidas bem como algumas informações que permitam melhor compreender os problemas que originam as recuperações e reforços de pontes de aço.

Os principais aspectos sobre inspeções e os princípios gerais nos quais estas podem ser tratadas estão apresentados no segundo capítulo. Apresenta-se também a experiência obtida na inspeção da ponte sobre o rio Casqueiro, suporte de dutos da Petrobrás e os principais métodos existentes da avaliação estrutural de pontes deterioradas.

Os principais aspectos da deterioração de pontes encontram-se no terceiro capítulo, onde são abordadas as principais causas da deterioração e ilustradas com exemplos observados em pontes brasileiras. Este panorama sobre o tema deterioração é necessário para a compreensão não só da gravidade do problema como também das dificuldades a serem enfrentadas para solucionar cada caso.

Nos capítulos quatro e cinco encontram-se apresentados os principais tópicos referentes a recuperação e reforço de pontes que, por facilidade de exposição, foram subdivididos em recuperação e reforço de elementos estruturais e da ponte como um todo, respectivamente.

O tema relatado nestes dois capítulos é abrangente pela



própria particularidade de cada ponte e as soluções também o são, porém, procurou-se abordá-lo de maneira também abrangente e enfatizando, principalmente, a recuperação de elementos e a utilização de tirantes e cabos como reforço estrutural das pontes.

Um panorama sobre os principais aspectos da realização de provas de carga é o assunto desenvolvido no sexto capítulo. Apresentam-se os principais equipamentos de medição mais utilizados em provas de carga, bem como dois exemplos destas em pontes ferroviárias.

No sétimo capítulo estão apresentados os resultados experimentais de quatro modelos de vigas rebitadas. A primeira delas sem nenhum reforço, a segunda reforçada com chapas nas mesas, a terceira com um reforço constituído de dois tirantes retos pré-tensionados e a quarta viga com tirantes formando uma viga armada.

Estes modelos foram ensaiados em regime elástico onde procurou-se obter informações não só sobre o comportamento de cada viga, mas também sobre a metodologia de ensaio e a análise dos resultados da instrumentação realizada com extensômetros elétricos de resistência.

As conclusões estão apresentadas no capítulo oito que, em função da própria natureza do trabalho, são abrangentes.

E finalizando, apresenta-se a bibliografia pesquisada onde somente estão relacionados os títulos efetivamente consultados. Os artigos e livros considerados mais relevantes, utilizados no desenvolvimento deste, estão devidamente anotados.

## CAPITULO I

### DADOS HISTÓRICOS DAS PONTES E DAS RECUPERAÇÕES

#### I.1- Dados Históricos sobre as Pontes — Aspectos Gerais

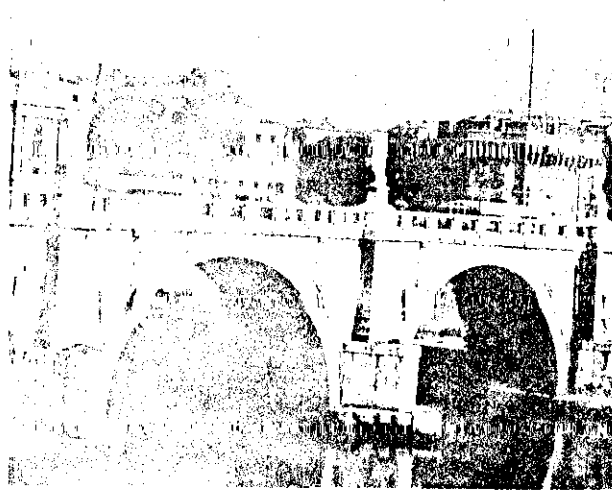
Alguns autores remontam a 500.000 anos a utilização das primeiras "pontes" pelo ser humano — a vida era restrita às cavernas e a busca do alimento — e a natureza "esculpia" estas pontes naturalmente. Grandes arcos formados pela erosão da rocha, árvores e rochas dispostas sobre rios encurtavam as distâncias e eram as "pontes" disponíveis ao homem de então.

O avanço do conhecimento humano, o domínio das ferramentas e a necessidade da produção de alimentos fez com que os obstáculos naturais passassem a ser impecilhos — inicia-se o que se pode chamar de "a era das pontes".

A utilização da madeira, dos cabos de fibras naturais e da pedra possibilitam então encurtar distâncias e vencer os obstáculos dos rios e vales.

Há cerca de 6.000 anos atrás, arcos em alvenaria foram construídos no Egito e na Mesopotâmia. Os romanos, durante o Império, construíram grandes pontes em arco, que contribuíram para a expansão dos seus domínios, utilizando como material as pedras.

A Foto I.1 apresenta uma das mais famosas pontes construídas pelos romanos — Ponte de Sant'Angelo , 136 D.C.



*Foto 1 - Ponte de Sant'Angelo  
136 D.C. — Roma, Itália*

Na história das pontes, o período compreendido entre o fim do Império Romano até o Renascimento foi caracterizado pela ausência de inovações técnicas e desenvolvimento de novos materiais.

Neste período o material utilizado continua sendo a pedra e somente foram construídas, com raras exceções, pontes de pequenas dimensões.

No início do século XVI a utilização de novos materiais como a madeira, utilizada racionalmente, e o ferro fundido altera os conceitos de projeto e de execução das pontes. O arco como sistema adequado à utilização de pedras cede espaço para novas "formas" construtivas.

As formas geométricas das pontes têm no arquiteto Palladio(1570) um grande inovador. Construiu as primeiras treliças triangulares em madeira (vão de aproximadamente 30m).

A partir desta época a utilização de treliças difunde-se e vários tipos são propostos.

A Figura I.1 ilustra alguns exemplos de treliças sendo que seus nomes correspondem aos engenheiros e arquitetos que as propuseram.

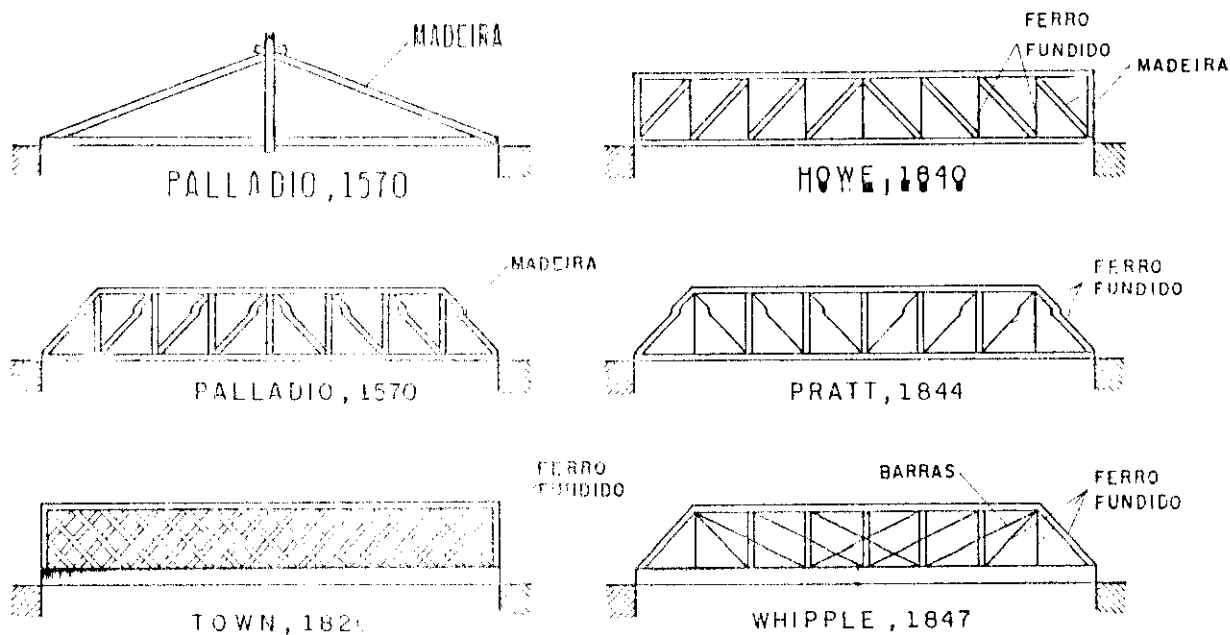


Figura I.1 Tipos de treliças

Paralelamente à utilização das treliças outros sistemas estruturais foram sendo desenvolvidos dando origem às pontes em vigas, vigas com seções variáveis, pontes em seção caixão e pontes suspensas. Pode-se mesmo afirmar que este desenvolvimento iniciado no século XVI prossegue até os nossos dias.

A ponte Coalbrookdale, construída na Inglaterra em 1779, é a primeira a ter o ferro fundido como material em todos os elementos estruturais. Essa ponte é constituída de cinco arcos paralelos com três tramos totalizando 59m de comprimento, 15m de largura e com o vão central medindo 31m. A utilização do arco demonstra com clareza que a ponte foi projetada e construída ainda com conceitos técnicos das pontes de pedra.

A partir do século XVIII o avanço no conhecimento do comportamento dos materiais e das técnicas de cálculo foram os fatores responsáveis pelo desenvolvimento acelerado na construção de pontes.

O desenvolvimento industrial no século XIX e a utilização do aço propiciaram o avanço da técnica de projeto e execução das pontes com vãos e sobrecargas cada vez maiores.

Na metade do século XIX Bessemer, Siemens e Thomas desenvolveram processos de fabricação do aço em alta escala reduzindo os custos e popularizando este material não só na construção em geral mas principalmente nas pontes.

O desenvolvimento industrial associado à necessidade da ampliação da malha viária e, principalmente, da ferrovia faz com que os engenheiros sejam solicitados a projetar e executar pontes com vãos e sobrecargas cada vez maiores. Os recordes de vãos sucedem-se com os mais diversos sistemas estruturais.

Os projetos das pontes de então são realizados a partir de hipóteses de cálculo e carregamentos definidos pelo engenheiro responsável pela obra que não só a calculava como também a construía.

A medida que se desenvolvem as técnicas construtivas e o conhecimento sobre os materiais, aumenta a utilização das pontes como um recurso para a diminuição das distâncias e melhoria dos transportes. O uso desse recurso traz consigo a necessidade de regulamentação de sua utilização.

Um exemplo deste fato é um decreto datado de 30 de maio de 1851 onde Louis Napoleon, presidente da França, estabeleceu regras sobre as dimensões das carroças que poderiam trafegar no país e as sobrecargas. Parte deste decreto está transcrito à seguir.

*Louis-Napoléon, Président de la République Française  
Sur le rapport du Ministre des Travaux Publics,  
Vu l'article 2 de la loi du 30 mai 1851, sur la police  
du roulage et des messageries publiques;  
Le Conseil d'Etat entendu,*

*Décrète:*

#### *TITRE PREMIER*

*Dispositions applicables à toutes les voitures*

*Article premier. - Les essieux des voitures ne pourront avoir plus deux mètres cinquante centimètres (2,50m) de longueur, ni dépasser à leurs extrémités le moyeu de plus de six centimètres (0,06m).*

*La saillie des moyeux, y compris celle de l'essieu,*

n'excèdera pas de plus de douze centimètres (0,12m) le plan passant par le bord extérieur des bandes. Il est accordé une tolérance de deux centimètres (0,02m) sur cette saillie, pour les roues qui ont déjà fait un certain service.

Art. 2.- Il est expressément défendu d'employer des clous à tête de diamant. Tout clou de bande sera rivé à plat, et ne pourra, lorsqu'il sera posé à neuf, former une saillie de plus de cinq millimètres (0,005m).

Art. 3.- Il ne peut être attelé:

1<sup>o</sup>) aux voitures servant au transport des marchandises, plus de cinq chevaux si elles sont à deux roues; plus de huit si elles sont à quatre roues, sans qu'il puisse y avoir plus de cinq chevaux de file;

2<sup>o</sup>) aux voitures servant au transport des personnes, plus de trois chevaux si elles sont à deux roues, plus de six si elles sont à quatre roues .....

Nos demais países a história dos carregamentos é semelhante à dos franceses. Inicialmente adotaram-se cargas uniformemente distribuídas e posteriormente, os trens tipo.

A Tabela I.1 reproduz um resumo da evolução histórica dos carregamentos utilizados para o dimensionamento de pontes na França.

O advento da ferrovia no início do século XIX e seu grande desenvolvimento exigiram dos engenheiros uma rápida adaptação para as novas sobrecargas.

Como exemplo, em 1835 as locomotivas a vapor tinham aproximadamente 50kN por eixo e no final do século passaram a ter cerca de 270kN por eixo.

Outro aspecto a salientar sobre as pontes ferroviárias do início do século era a grande variedade das dimensões, bitolas, distância entre eixos e a capacidade das locomotivas o que exigia um cálculo particular para cada ponte. O engenheiro da época era obrigado calcular uma ponte respeitando estas particularidades.

No final do século XIX surge o conceito do trem tipo para ferrovias onde o carregamento era associado a um determinado padrão que define a capacidade da via.



O engenheiro americano Theodore Cooper, em 1894 propõe um trem tipo com espaçamento de rodas determinado e uma definição clara das cargas por eixo a adotar.

Este trem tipo ficou conhecido como série COOPER e a correspondência da carga por eixo e seus aspectos geométricos estava baseado em duas locomotivas "Consolidation" e seus "tenders" com os respectivos vagões, estes associados a uma carga distribuída sendo que a proporcionalidade entre as cargas por eixo era mantida para três classes do trem; leves, médios e pesados.

Este trem tipo foi utilizado no mundo todo inclusive no Brasil através das prescrições da NB-7. .

Paralelamente ao desenvolvimento da ferrovia inicia-se a história da recuperação das pontes principalmente devido ao grande avanço ocorrido nas cargas por eixo exigindo o reforço e a recuperação de muitas delas.

A importância da manutenção e recuperação de pontes já estava manifestada em publicações da AREA<sup>1</sup> de 1904 onde em seus anais surge o primeiro capítulo específico sobre este aspecto.

No início do século XX, paralelamente ao desenvolvimento da ferrovia, o transporte rodoviário passa a ganhar importância e após a década de 30 sua popularização exigiu uma nova malha viária da qual as pontes fazem parte.

O desenvolvimento das pontes está também associado ao avanço das técnicas construtivas e dos materiais utilizados. A resistência dos materiais é a responsável pelos limites de vãos e concepção estática e a título de exemplo a Tabela I.2 reproduz cronologicamente o aumento da resistência e as principais características dos aços.

---

1 *AREA American Railway Engineering Association*



Tabela I.2- Evolução da resistência do aço e as principais características mecânicas

| MATERIAL                     | PERÍODO   | PRINCIPAIS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS   | COMENTÁRIOS   |
|------------------------------|-----------|---|---|
| Ferro Primário               | 1779-1900 | $5 \leq f_y \leq 100 \text{ N/cm}^2$<br>$10 \leq f_u \leq 150 \text{ N/cm}^2$<br>$1\% \leq \epsilon \leq 0\%$   | Características mecânicas ruins e não uniformes, frágil, porém com boa resistência à corrosão. Não admite soldagem.   |
| Ferro                        | 1796-1900 | $16 \leq f_y \leq 100 \text{ N/cm}^2$<br>$22 \leq f_u \leq 250 \text{ N/cm}^2$<br>$\epsilon \leq 30\%$          | Características mecânicas frágeis mas com grande patamar de escoamento. Material pouco sensível à corrosão.   |
| Ferro Puddled                | 1800-1914 | $18 \leq f_y \leq 300 \text{ N/cm}^2$<br>$25 \leq f_u \leq 400 \text{ N/cm}^2$<br>$5\% \leq \epsilon \leq 25\%$ | Forma primitiva do aço - material heterogêneo. Os melhores aproximam-se dos aços "doces" atuais, os piores têm pequeno patamar de escoamento e uma estrutura folheada muito sensível à corrosão, baixa soldabilidade. |
| Aço A42                      | 1900      | $f_y \approx 270 \text{ N/cm}^2$<br>$f_u \approx 400 \text{ N/cm}^2$<br>$\epsilon \leq 30\%$                    | Inicia-se o desenvolvimento da siderurgia e a composição química dos aços passa a influenciar as características mecânicas, soldabilidade e na resistência à corrosão.  |
| Aço A52                      | 1930      | $f_y \approx 360 \text{ N/cm}^2$<br>$f_u \approx 500 \text{ N/cm}^2$<br>$\epsilon \leq 25\%$                    |   |
| Aços "duros" (cabos, barras) | 1900      | $70 \leq f_y \leq 1600 \text{ N/cm}^2$<br>$100 \leq f_u \leq 2000 \text{ N/cm}^2$<br>$\epsilon \leq 10\%$       | Aços com alta taxa de carbono, alta resistência mecânica e baixa resistência à corrosão.  |

As pontes pela sua importância e grandeza constituem marcos não só por caracterizar o desenvolvimento tecnológico de uma época como também marcos arquitetônicos capazes mesmo de identificar as cidades ou países onde foram construídas.

Neste breve relato é conveniente também salientar que no desenvolvimento dos processos construtivos das pontes ocorreram vários insucessos.

Deficiências estruturais, esquemas de cálculo incorretos e desconhecimento de vários aspectos que envolvem o cálculo e a execução foram responsáveis por vários problemas, inclusive com a ruína de várias pontes em épocas diversas.

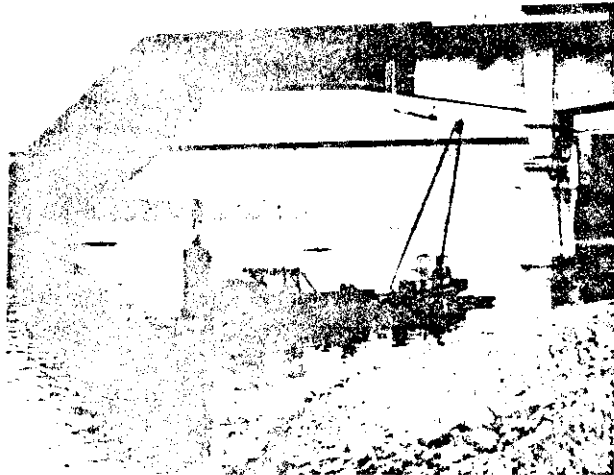
Relatos históricos indicam a ruína de aproximadamente 200 pontes entre 1840 e 1890 somente nos EUA. Estes acidentes integram o desenvolvimento da tecnologia de construção e dos processos de cálculo.

Vários acidentes com pontes tornaram-se famosos e em alguns casos a perda de vidas humanas foi considerável.

A ruína da ponte sobre Rio Ohio, EUA, em 1876, da ponte sobre a baía de Tay na Escócia em 1879, da ponte sobre rio St. Laurenc em Quebec no Canadá em 1900, que rompeu na fase de construção, são exemplos de alguns acidentes.

Os insucessos na construção de pontes foram e são fontes preciosas para o desenvolvimento dos processos de cálculo e execução. É digno de nota a ruína da ponte de Tacoma Narrows, calculada e executada com uma grande esbeltez e que ruiu devido à ação do vento.

Outro exemplo recente foi a ruína, na fase de construção, da ponte sobre o rio Reno, em Koblenz (1971). Tratava-se de uma ponte em seção caixão em aço construída pelo método dos balanços sucessivos, que ruiu devido a flambagem da chapa que compõe a mesa inferior do caixão. Esta flambagem ocorreu devido ao detalhe mal projetado dos enrijecedores na seção de união das aduelas. A Foto I.2 ilustra este acidente.



*Foto I.2- Acidente da ponte sobre o Rio Reno em Koblenz na fase de construção*

Estes dados sobre acidentes com pontes ilustram que o progresso tecnológico no cálculo e execução das pontes teve também seu preço.

Assim é possível detectar nitidamente uma linha evolutiva na história das pontes. O conhecimento dos materiais que podem ser utilizados na sua construção está

diretamente relacionado à variedade e inovação das formas utilizadas que, por sua vez, implicam no avanço dos projetos e dos cálculos.

Os meios de locomoção utilizados também influenciam na construção das pontes. Elas têm se adaptado às carroças, aos trens e aos automóveis. O decreto de Louis Napoleão regulamentando tamanho e carga das carroças e o trem tipo proposto por Cooper têm certa similaridade uma vez que ambos buscam regulamentar a utilização a partir das exigências de seu tempo.

## I.2 - Dados Históricos sobre as Pontes de aço no Brasil

A história das pontes de aço no Brasil teve seu início, provavelmente, com a construção de uma ponte sobre o rio Paraíba do Sul em 1857, com 5 tramos de 30m de vão e 15 de largura . O ferro fundido foi o material utilizado em seus elementos estruturais e era constituída de arcos treliçados. Foi construída pelo Barão de Mauá e fabricada nos estaleiros da Ponta de Areia em Niterói.

A economia do Brasil no início do século XIX caracterizava-se pela exportação agrícola, o café era o principal produto, e toda a economia girava em torno dele. Importavam-se produtos, de botões até pontes.

A dependência do capital estrangeiro era total e com isto as empresas estrangeiras passaram a atuar no país em várias áreas, inclusive na implantação e exploração comercial das ferrovias, principal meio de transporte da época e responsável pelo escoamento do café até os portos.

No Brasil pode-se dizer que o desenvolvimento na construção das pontes está associado à implantação da ferrovia, importadas pelas empresas estrangeiras. O Brasil não possuía siderúrgicas que pudessem suprir as necessidades de ferro fundido e aço e não existia interesse do capital estrangeiro em que isto ocorresse. O modelo do colonialismo das grandes potências de então é econômico e não mais territorial.

Este processo fez com que as pontes utilizadas nas

linhas ferroviárias fossem importadas dos países de origem destas companhias. Os esquemas estruturais, os perfis e as sobrecargas utilizadas para os cálculos respeitavam a regulamentação do país de origem.

Este fato fez com que as pontes existentes no Brasil tenham uma grande variedade de esquemas estruturais e com perfis laminados apresentando grandes variações, quer na altura quer na relação das espessuras. Esse aspecto transforma-se num fator complicador nos trabalhos posteriores de recuperação das pontes.

Também é digno de nota o fato de que as linhas ferroviárias foram sendo construídas sem um projeto de implantação global. Os levantamentos topográficos e a definição do traçado eram realizados simultaneamente à construção. As pontes eram importadas com vãos pré-definidos e o traçado deveria adaptar-se também a estes vãos disponíveis.

Em 1874 foi construída a ponte Barão de Juparanã, utilizando o aço como material e foi, provavelmente, a primeira ponte em treliça de banzos paralelos do Brasil. O comprimento total desta ponte é de 170m sendo 9 tramos de 13,40m e 2 tramos de 25m com 4,2m de largura.

Em 1880 foi construída a ponte Benjamin Constant, em Manaus, em sistema Gerber utilizando treliças com altura variável com 120m de comprimento sendo 1 tramo de 60m e 2 tramos de 30m.

Em 1896 foi construída a ponte Euclides da Cunha em São José do Rio Pardo, que leva o nome do engenheiro responsável pela sua construção.

De 1860 a 1900 foi construído um grande número de pontes que atendiam principalmente à ferrovia.

Duas grandes pontes construídas no início do século XX merecem ser destacadas: o viaduto Santa Efigênia em São Paulo, em arco treliçado, construído em 1913 e a ponte Hercílio Luz em Florianópolis, que foi construída entre os anos de 1920 a 1926, tem um comprimento total de 840m com o vão central de 340m. Esta ponte é a maior ponte suspensa do mundo utilizando barras com olhais. Estas barras foram

tratadas termicamente para aumentar a resistência do aço num processo pioneiro para a época.

Foi projetada pelo respeitado engenheiro americano D.B. Steinman e fabricada nos Estados Unidos, inicialmente projetada como rodoferroviária. Tem também como característica marcante o fato das barras que funcionam como cabos fazerem parte do banzo superior da treliça no vão central.

Steinman narra uma passagem digna de nota em seu livro "Famous Bridges of the World" onde exprime com rara felicidade certos aspectos da vida política brasileira presente até nossos dias. Esta passagem, esta transcrita abaixo.

*"... The achievement of the Florianopolis Bridge, during the years 1920 to 1926, is a dramatic story. The bridge was the ambitious life-dream of a governor in remote Brazilian province. After struggling to make his dream come true, he died just before the construction began. His last hours were made happier by the sight of small model of the bridge which his loyal citizens built in a park outside his window..."*

A Foto I.3 ilustra uma visão global desta ponte que encontra-se hoje fechada ao tráfego para recuperação. É também interessante ressaltar que durante 31 anos não foi realizada nenhuma manutenção.

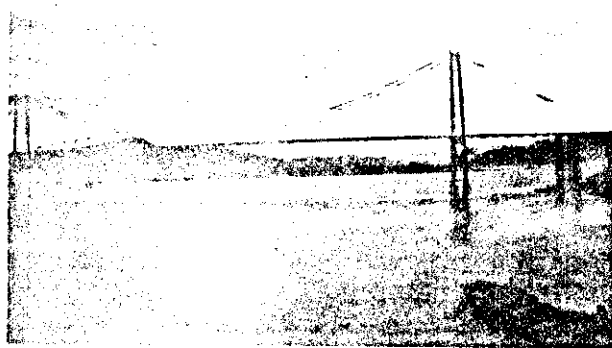


Foto I.3 - Vista geral da ponte Hercílio Luz

### I.3-Dados Históricos sobre a Recuperação de Pontes no Brasil

O primeiro aspecto importante a ressaltar neste item está mais relacionado às condições gerais do Brasil, um país de pouca tradição em preservar sua história — os dados históricos sobre as pontes não são exceção a esta regra.

Praticamente não existem dados disponíveis nos principais órgãos estaduais e federais responsáveis pela operação e manutenção das pontes. Em alguns destes órgãos não se tem informações precisas sequer sob o número de pontes em operação; os projetos das pontes são raros, principalmente os mais antigos. Um histórico das pontes inexistente e com maior razão um histórico das recuperações.

Nestas frases acima já fica demonstrado a dificuldade na obtenção de dados sobre a história das recuperações e pretende-se, portanto, relatar alguns aspectos gerais sobre o tema.

É também interessante frisar que tradicionalmente impera no Brasil o conceito de que manutenções preventivas não se traduzem em benefícios políticos. A "queda de braço" entre os engenheiros e as diretorias das empresas estatais — cargos na sua grande maioria meramente políticos — faz com que os primeiros sejam alijados de suas preocupações técnicas em manter e operar condizentemente as pontes sob sua responsabilidade.

Talvez a primeira grande obra a ser recuperada tenha sido o Viaduto do Chá, São Paulo. Foi construído em 1882 e já em 1901 passou por uma recuperação e remodelação completa incluindo a substituição de elementos estruturais e de todo o tabuleiro. Este viaduto foi substituído na década de 30.

Apresenta-se, a seguir, um breve relato sobre algumas recuperações realizadas na década de 30 nas pontes ferroviárias da antiga Rede de Viação Paraná-Santa Catharina.

Os dados e ilustrações foram obtidos no livro do Eng. Oscar Machado da Costa "Estudo do Reforço das Pontes" e no acervo da Construtora ROCA LTDA., "herdeira" da empresa deste conceituado engenheiro que durante muitos anos

construiu e recuperou muitas pontes.

O livro em questão relata os estudos preliminares, propostas de reforços e alguns dados das inspeções de 235 pontes realizadas entre 1927 e 28.

A ruína da ponte de Itararé, localizada na divisa dos estados de São Paulo e Paraná, ocorrida quando um trem de carga encontrava-se sobre ela, ocasionando perda de vidas e enormes prejuízos, foi o fato que originou os estudos dos quais algumas informações estão relatadas a seguir.

Os resultados obtidos dos levantamentos realizados pela equipe do Eng. Machado da Costa podem ser rapidamente traduzidas por: pontes com idade média, na época, variando entre 30 e 50 anos; infraestrutura em alvenaria e pedra talhada; superestrutura as mais diversas com pontes em viga, treliças, arcos; estrados inferiores, superiores e intermediários e com diferentes níveis de comprometimento quanto à deterioração.

Todas as hipóteses de carregamento, ação do vento e dados sobre sobrecargas e impactos podem ser obtidos no livro citado acima, sendo digno de nota que a maioria das pontes inspecionadas foram dimensionadas para um trem tipo que tinha 90kN/eixo e já naquela época existiam locomotivas com 160kN/eixo.

É extremamente interessante o relato, abaixo transcrito, das conclusões do relatório após as inspeções realizadas:

*"As conclusões de nosso estudo foram:*

*1) Os cálculos de verificação se baseiam nas condições actual de trafego da Estrada. Os seus resultados representam pois o trabalho real das superestructuras.*

*2) Todas as pontes tem peças trabalhando acima do limite de segurança de seu material conforme se vê pelo Diagramma 1.*

*3) Em muitas dellas si houver coincidência de grande velocidade com forças lateraes de impacto as taxas de trabalho vão além do limite elastico produzindo deformações permanentes e approximando-se da carga de ruptura.*

4) Já existem flexas permanentes em muitas vigas nas quaes os trens são obrigados a passar com velocidades reduzidas.

5) Embora o trafego da Estrada requeira locomotivas mais possantes e pesadas, é inteiramente impossível adapta-las nas condicções actuaes das pontes, como se verifica pelo Diagramma 1.

6) As composições das Estradas visinhas, a Sorocabana e a Viação Ferrea do Rio Grande do Sul não podem entrar nas linhas da Rede de Viação Paraná-Santa Catharina pois as pontes não suportam em absoluto as cargas desses trens. Este factor tira todo o valor estrategico desta Rede.

7) O reforço das superstructuras impõem-se pois, não somente para dar ao tráfego de hoje a segurança necessaria mas também para permittir o emprego de machinas de maior rendimento e um intercâmbio completo de material rodante e de tracção com as Estradas limitrophes, elemento indispensavel em casos de mobilisação de tropas para as nossas fronteiras.

8) O reforço deve ser feito de maneira definitiva de modo que as obras consolidadas possam servir ao tráfego, sem restricções, num periodo de mais de 40 ou 50 annos".

Apresentam-se, a seguir, dois exemplos de recuperação e aumento da capacidade de pontes, realizadas pela empresa do Eng. Machado da Costa, onde os engenheiros de então demonstram toda criatividade, arrojo e principalmente uma técnica apurada quer no cálculo estrutural, quer na execução e montagem dos reforços propostos.

A primeira é um exemplo de reforço de uma ponte em viga com estrado intermediário pertencente a linha Curitiba-Paranaguá km 62+200.

O reforço proposto compreendeu na transformação das vigas principais em vigas armadas, com a introdução de tirantes e com a seção transversal reforçada por chapas e cantoneiras nas mesas.

As transversinas também foram reforçadas com chapas nas mesas. Para o reforço das longarinas utilizou-se dois novos



novos perfis laminados (I 8") posicionados ao lado das longarinas existentes.

As Fotos I.4, I.5 e I.6 apresentam aspectos dos trabalhos de recuperação desta ponte, realizados em 1932.

Outra curiosidade é o fato de que esta mesma ponte foi submetida a uma prova de carga pela equipe do Laboratório de Estruturas da EESC-USP cujo relato e resultados estão apresentados no Capítulo VI deste trabalho.

A Foto I.7 apresenta a mesma ponte, em março de 1991, durante os trabalhos de recuperação que , entre outros itens, prevê a substituição dos tirantes comprometidos devido à corrosão acentuada.

Está claro que os reforços executados em 1932 atenderam os pré-requisitos impostos pelo Eng. Machado da Costa. Os reforços foram adequadamente projetados atendendo às solicitações desta importante ferrovia, responsável pelo escoamento de toda a produção agrícola dos estados do Paraná e Mato Grosso, durante 60 anos.

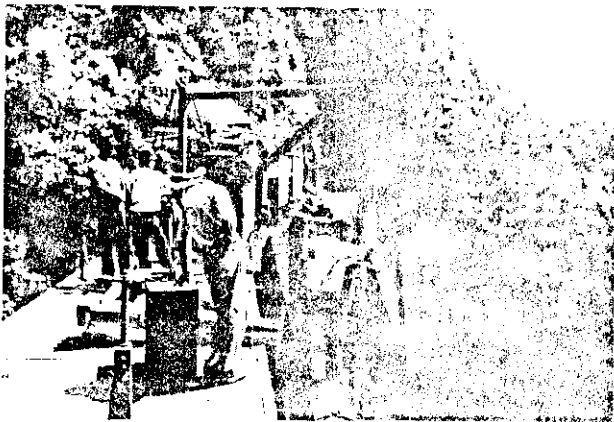


Foto I.4- Vista geral dos trabalhos de montagem dos reforços

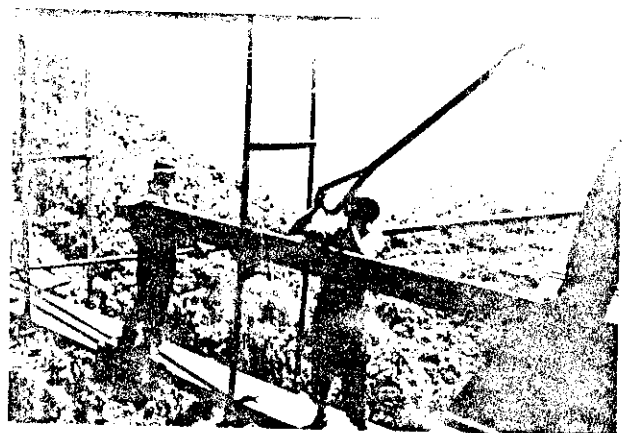
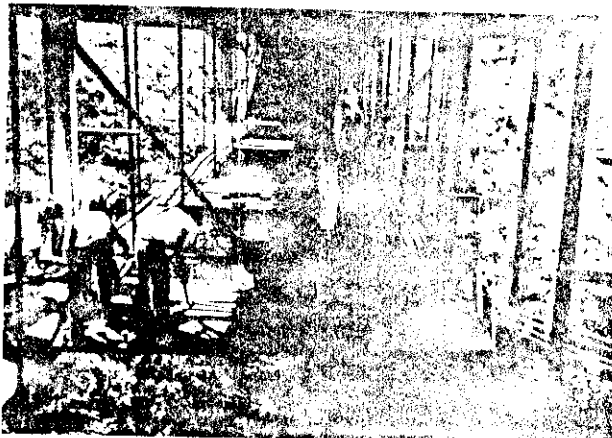
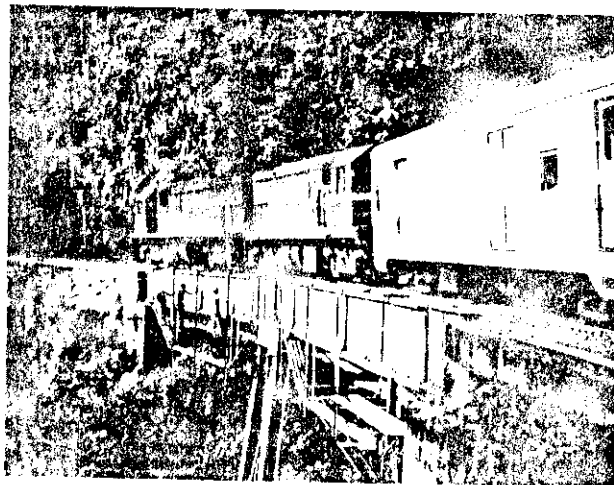


Foto I.5- Detalhe dos tirantes



*Foto I.6- Vista geral dos andaimes montados no nível dos tirantes.*



*Foto I.7- Vista geral da ponte durante os trabalhos de recuperação em 1991.*

Um outro aspecto interessante a ressaltar é a filosofia que norteou os estudos e projetos de recuperação, ora relatados, que foi sempre procurar utilizar a estrutura existente e aumentar o grau de hiperestaticidade com os elementos do reforço.

Este sistema de reforço era obtido através da introdução de novos pilares, vigas armadas ou pela continuidade das vigas. Normalmente estas soluções permitem manter o tráfego sem grandes transtornos, são eficientes do ponto de vista estrutural e razoavelmente simples de serem executados.

Um exemplo deste procedimento é o estudo preliminar da ponte Ipiranga I desenvolvido pelo Eng. Machado da Costa cuja cópia do original está apresentada na Figura I.2.

O segundo exemplo é o reforço da ponte São João na linha ferroviária Curitiba-Paranaguá; talvez seja o maior exemplo de engenhosidade e capacidade técnica de todos os reforços e recuperações de pontes realizados no Brasil não só na época ( década de 30 ), mas em toda a história das recuperações.

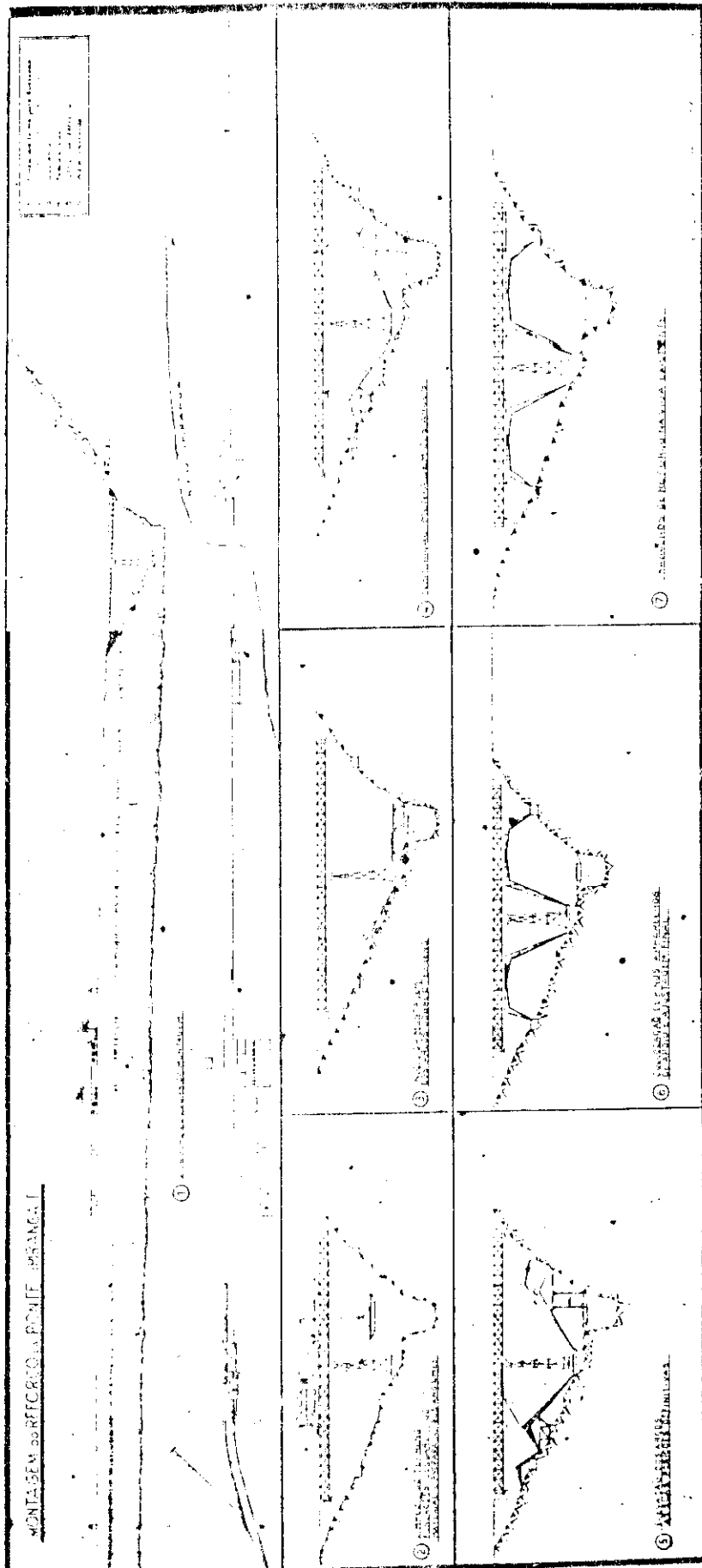


Figura I.2- Projeto Esquemático da Ponte Ipiranga I

Esta ponte tem como características um comprimento total de aproximadamente 115m com o vão central de 71,7m em treliça (lattice trusses) com o tabuleiro intermediário e os demais três tramos em pórticos de alma cheia.

O projeto de reforço foi realizado nos Estados Unidos e detalhado no Brasil e a solução proposta previa a introdução de apoios intermediários.

Estes apoios foram criados através da introdução de dois pórticos treliçados posicionados externamente à treliça existente. Uma cópia do projeto, apresentado na Figura I.3, ilustra a proposta de reforço que pelas dimensões do vão e da altura da ponte em relação ao solo (acima de 70m) estabelece o grau de dificuldade do projeto e sua execução.

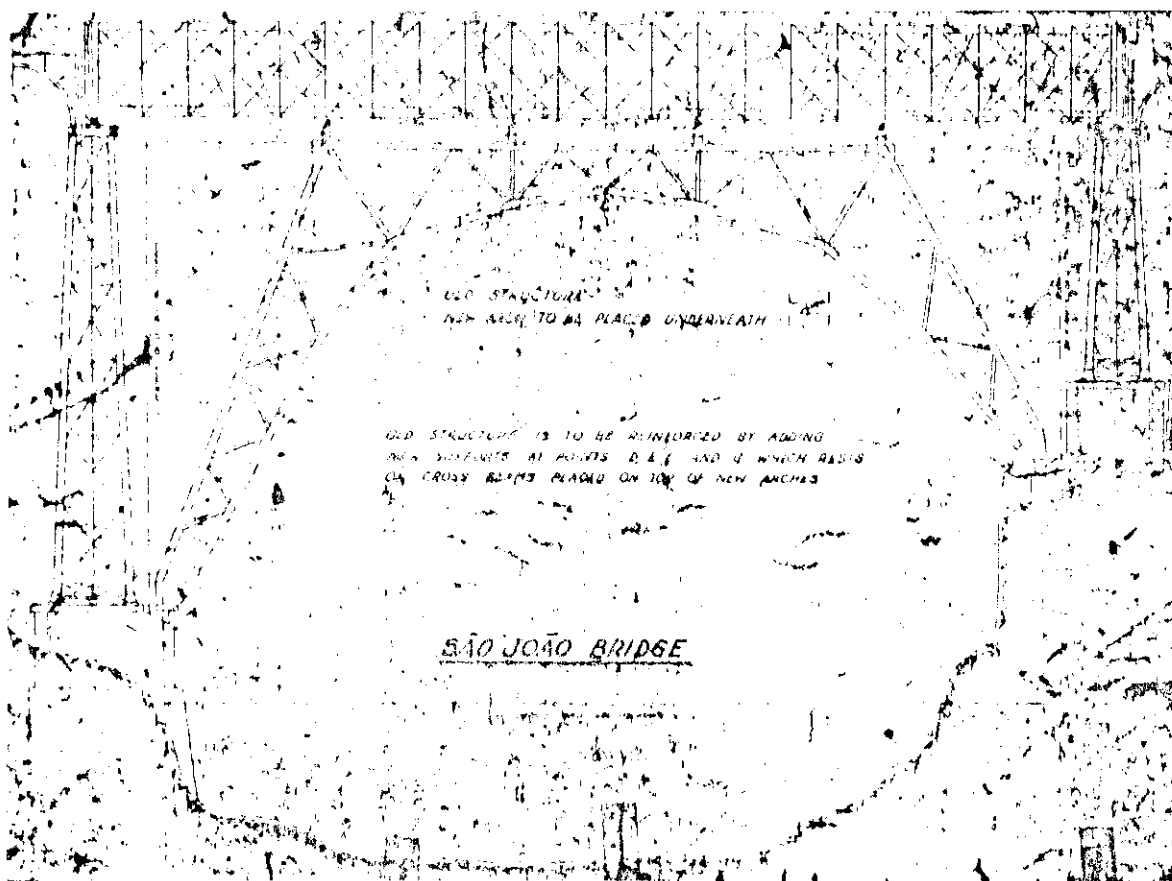


Figura I.3- Esquema do reforço da ponte São João

O principal aspecto a ressaltar deste reforço foi o sistema construtivo proposto. A Figura I.4 ilustra e exemplifica os principais procedimentos da execução do

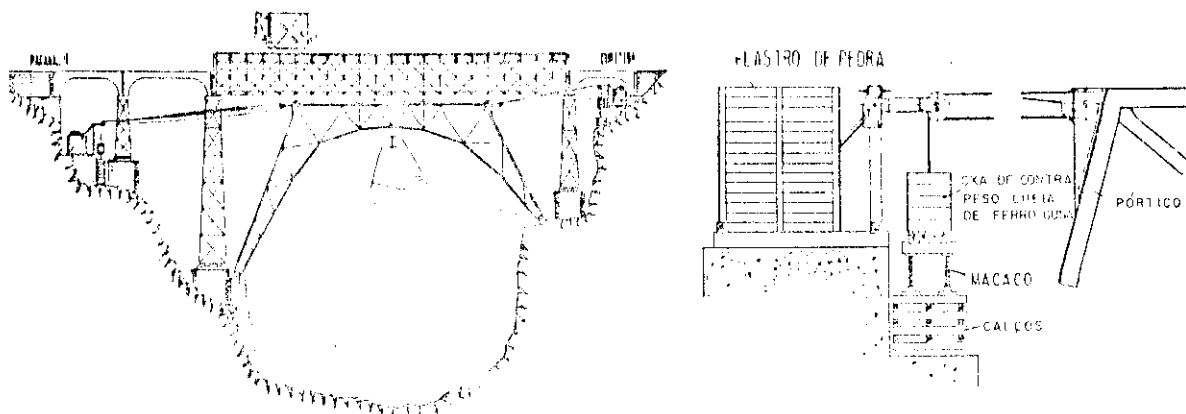
reforço: execução da fundação dos pórticos de reforço, montagem dos pilares treliçados fixados por cabos nos pilares existentes, início da montagem da viga e a transferência dos cabos para um sistema de contrapesos, término do pórtico através de uma articulação no banzo inferior — para efeito do peso próprio o pórtico é triarticulado —, montagem da barra do banzo superior e apoio da treliça nas vigas que interligam os dois pórticos.



Transporte vertical dos elementos dos pilares utilizando uma ponte rolante sobre as vigas existentes sem perturbar o tráfego

Sobre um bloco de concreto cavaletes apoiam o sistema de cabos e roldanas responsáveis pelo apoio provisório dos pilares. Uma das pontas do cabo é fixada a um contra-peso ( caixa com ferro gusa) e posteriormente içado por macacos.

Figura I.4- Esquema de montagem do reforço da ponte São João



Montagem da viga do pórtico e macaqueamento do contra-peso para que o banzo inferior possa ser interligado. Retirada dos cabos e contra-pesos. Montagem do banzo superior e posicionamento das vigas que servirão de apoio para a treliça existente.

Detalhe do sistema de contra-peso e do sistema de ancoragem dos cabos para o posicionamento dos pórticos. Notar que a caixa de gusa tem um peso superior ao do pórtico e é içada pelo acionamento dos macacos movimentando o pórtico

Figura I.4- Esquema de montagem do reforço da ponte São João

São dignas de nota as dificuldades que foram enfrentadas no processo de montagem e a solução extremamente criativa utilizando o sistema de contrapesos e cabos.

A seguir, a sequência de Fotos I.8 a I.17 ilustram as fases construtivas do reforço.

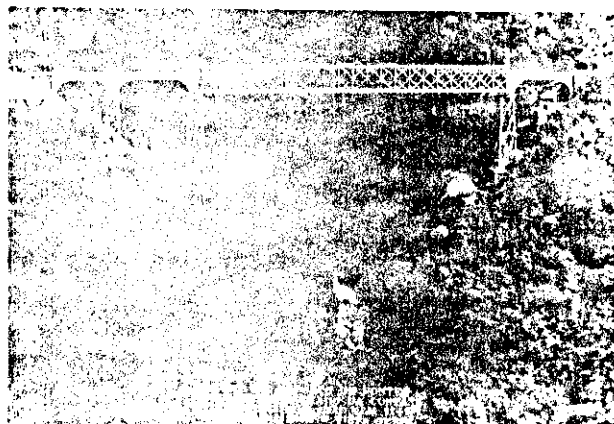
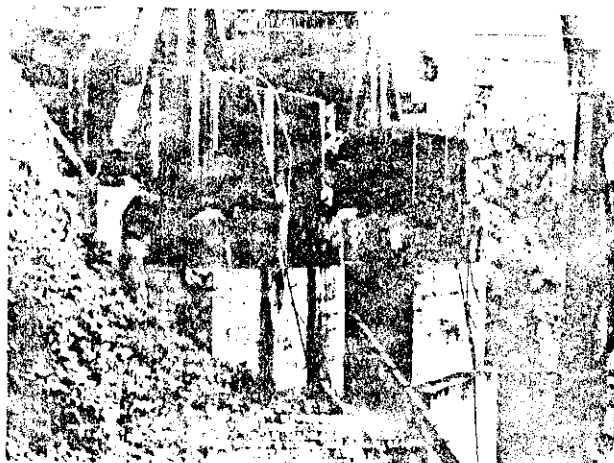


Foto I.8 - Vista geral da ponte São João



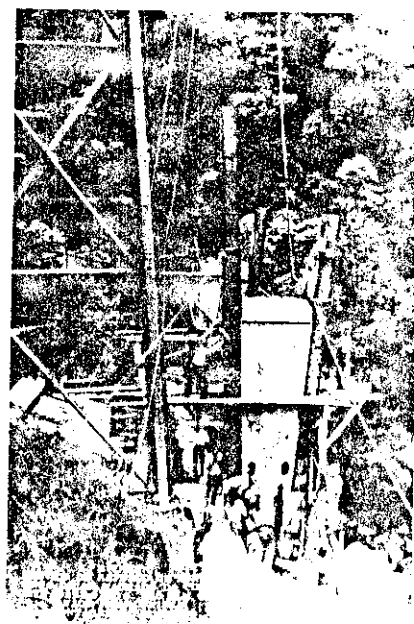
*Foto I.9- Vista parcial do canteiro de obras*



*Foto I.10- Concretagem da base de concreto dos contrapesos*



*Foto I.11- Vista dos elementos estruturais*



*Foto I.12- Início da montagem dos pilares*

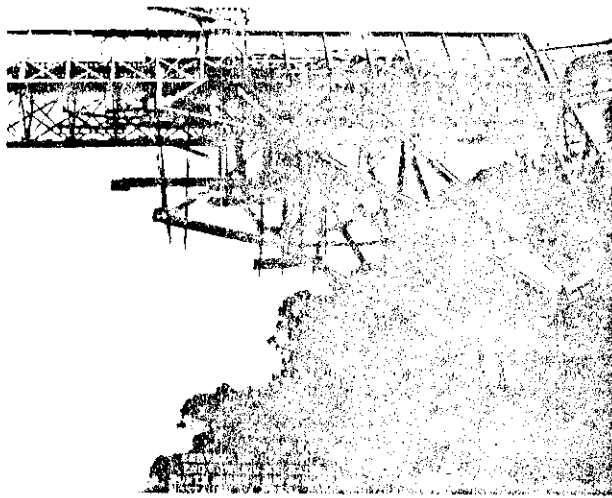


Foto I.13- Montagem dos pilares

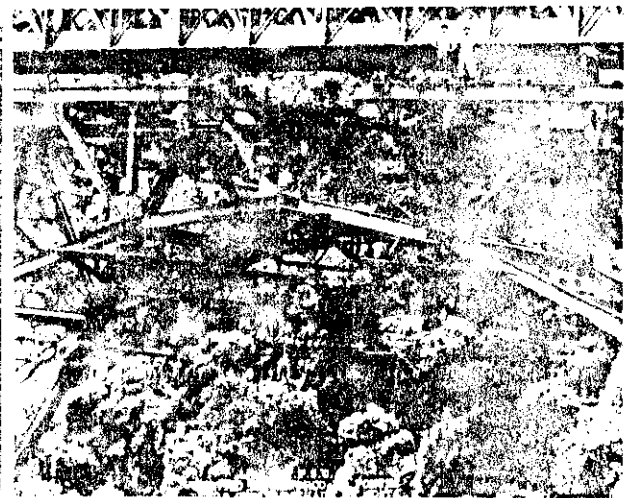


Foto I.14- Interligação dos banzos inferiores

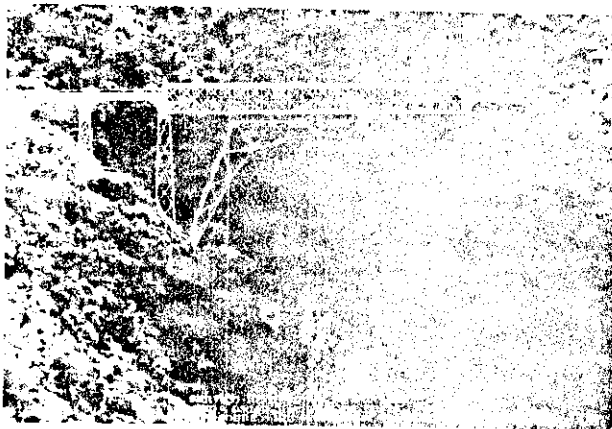


Foto I.15- Vista geral dos pórticos interligados pelo banzo inferior

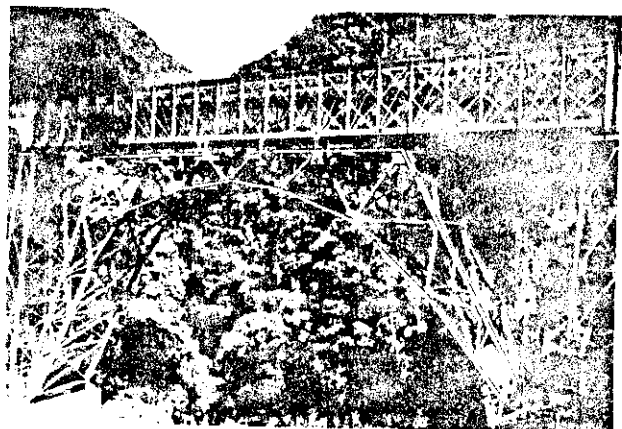


Foto I.16- Vista lateral do conjunto pórtico de reforço viga existente





*Foto I.17- Vista geral do reforço concluído*

Com estes dois exemplos de recuperação de pontes ilustra-se não só os trabalhos desenvolvidos mas enfatiza-se a arte de "engenharia" de uma época.

Os recursos de cálculo daquela época não são comparáveis aos computadores e programas atuais e nem os meios de fabricação e montagem contavam com os equipamentos hoje disponíveis, porém, a engenharia de então "produziu" obras dignas dos maiores elogios com todos os pré-requisitos exigidos nas construções atuais, exemplificando a linha evolutiva perceptível na história das pontes. Enquanto um recurso técnico para a melhoria das condições de vida, as pontes representam uma conquista do Homem sobre o ambiente natural. Adaptar este recurso e torná-lo utilizável de forma compatível com o avanço e problematização de outros setores da vida humana é um desafio sempre colocado, que algumas vezes encontram boas respostas técnicas.

## CAPÍTULO II

### INSPEÇÃO DE PONTES DE AÇO

#### II.1- Preliminares

A manutenção é um dos principais aspectos na vida útil de uma estrutura, em particular nas pontes de aço. Um programa de manutenção eficiente e bem planejado propicia não só o prolongamento da vida útil da ponte, como também evita gastos desnecessários para a recuperação ou reforços em pontes deterioradas.

Ao se estudar a história das pontes observa-se que, como todo conhecimento da humanidade, ocorreu o desenvolvimento no projeto e no processo construtivo abrangendo não só a tipologia estrutural como também os materiais e as técnicas de cálculo e execução.

Assim sendo, o primeiro passo para a inspeção de uma ponte é identificar a época em que foi fabricada pois este dado permitirá identificar o tipo de aço utilizado.

A inspeção deve considerar as particularidades de cada ponte, a tipologia estrutural, os elementos de ligação, as características dos materiais utilizados, a idade e o tipo de tráfego.

As pontes ferroviárias são exemplos para a observação destas particularidades. No Brasil existem pontes centenárias, com materiais e esquemas estáticos e construtivos da época, e pontes recém construídas. A técnica

de inspeção deverá necessariamente ser adequada a estas duas situações diferentes.

Podemos subdividir as inspeções em periódicas, especiais ou cadastrais:

a) Inspeções Periódicas: tem como principal objetivo uma avaliação sistemática e regular nos principais elementos de uma ponte, garantindo sua integridade e funcionalidade.

b) Inspeções Especiais: são inspeções realizadas de maneira mais apurada, quando algum problema foi observado nas inspeções periódicas, ou devido a existência de acidentes que acarretem danos a elementos estruturais. Destinam-se a obter informações sobre o estado real nas condições de utilização, bem como permitir a verificação da segurança de partes ou de toda a ponte.

c) Inspeções Cadastrais: são inspeções mais detalhadas com o objetivo de realizar o levantamento das características geométricas, seções transversais, estado de conservação dos elementos, tipologia da estrutura e fundações, condições das linhas e vias, sobrecargas existentes, etc. Em resumo, todas as informações necessárias para a verificação estrutural, condições de segurança da fundação, encontros e pilares e morfologia do terreno. No caso de pontes sobre rios e canais as condições de sedimentação e erosão do solo devem também ser analisadas.

A importância da inspeção pode ser aquilatada pelas consequências detectadas quando ela não é realizada. A ruína de uma ponte acarreta perdas econômicas muitas vezes consideráveis, lucros cessantes devido a interrupção de uma via férrea ou uma estrada rodoviária, custos elevados de reconstrução em ritmo acelerado. Estas perdas poderiam ser evitadas caso o problema originário da ruína fosse detectado a tempo por uma inspeção adequada.

O técnico responsável por uma inspeção, em qualquer de suas modalidades, deve ser devidamente preparado e treinado para executar tal função. Deve possuir um conhecimento amplo sobre o comportamento estrutural, conhecimentos sobre os tipos de deterioração e suas causas e principalmente onde

podem ocorrer.

O engenheiro deve, saber "onde", "como" e "quando" observar uma ponte para uma boa inspeção.

A inspeção deve ser feita em todas as partes que compõem uma ponte: infraestrutura; encontros; superestrutura e também analisando as condições físicas e geológicas do terreno.

## II.2- Aspectos Gerais da Inspeção

### II.2.1- Inspeção para Cadastramento

A ausência de projetos estruturais é uma rotina nos órgãos responsáveis por pontes no Brasil, principalmente das pontes mais antigas.

A necessidade de realização de um cadastro destas pontes é reconhecido por todos os órgãos técnicos tais como: DNER, DERs, RFFSA, FEPASA, porém muitas vezes isto não é realizado devido à inexistência de verbas ou pela priorização de outros itens considerados politicamente mais vantajosos.

A preocupação dos engenheiros e técnicos destes Departamentos de Estradas e Redes Ferroviárias é inegável, não só quanto ao aspecto de cadastramento das pontes, como também quanto à necessidade de um programa de inspeção e manutenção. Em nosso país ainda existe a ingerência política em assuntos técnicos. É politicamente mais vantajoso "construir" uma nova estrada do que a recuperação das existentes, pois programas de inspeção e manutenção são dispendiosos e geram poucos "dividendos" políticos.

A inspeção para um cadastramento deve ser realizada em toda a ponte, infra e superestrutura. A precisão no levantamento dos dados no campo está diretamente relacionada com a qualidade do projeto de verificação a ser desenvolvido no escritório. Apresentam-se, a seguir, alguns aspectos a serem observados:

- a) Localização da ponte  
Nome da via;

- Localização relativa (cidades);
- Quilometragem;
- Número para arquivo.
- b) Característica do tráfego
  - Rodoviário ou ferroviário;
  - Número de pistas ou vias;
  - Classe da ponte;
- c) Características da infraestrutura
  - Tipo de fundação;
  - Tipo de solo (análise preliminar);
  - Condições locais da fundação (rios, assoreamento);
  - Geometria da fundação (quando possível);
  - Material utilizado;
- d) Características dos encontros
  - Material;
  - Geometria;
  - Condições do solo;
  - Condições da ligação encontro/superestrutura.
- e) Características da superestrutura
  - Material;
  - Geometria;
  - Tipologia estrutural;
  - Características geométricas dos elementos;
  - Detalhes das principais ligações;
  - Esquema geral da estrutura;

#### II.2.2- Inspeção de Pontes Deterioradas

A realização de inspeção especial em pontes deterioradas caracteriza-se, normalmente, pela urgência da recuperação devido ao agravamento ou constatação de um dos tipos de deterioração a serem apresentados no capítulo III.

A função principal deste tipo de inspeção é diagnosticar, com a maior precisão e rapidez possível, as causas da deterioração, grau de comprometimento e principalmente obter as informações necessárias para que a segurança da ponte possa ser avaliada.

É evidente que para cada tipo de problema existe a melhor maneira de se realizar uma inspeção. Devido à complexidade e multiplicidade de tipos de pontes, a identificação das causas, amplitude e principalmente ocorrência é de difícil previsão. Mais uma vez justifica-se a necessidade de um profissional tecnicamente competente e treinado para tal tarefa.

A realização de uma inspeção muitas vezes é dificultada pela ocorrência de defeitos em locais e elementos das pontes de difícil acesso, que em geral são pontos negligenciados nas pinturas e inspeções periódicas.

A seguir, apresentam-se alguns dos principais aspectos a serem observados numa inspeção especial em função do tipo de deterioração:

a) Quanto à corrosão:

- ocorrência ou não da corrosão;
- tipos de corrosão (a identificação do tipo de corrosão irá determinar a melhor maneira de solucionar o problema);

- tipo de aço (é comum em pontes já reforçadas a existência de mais de um tipo de aço, sendo necessária a sua identificação);

- classificação preliminar do grau de comprometimento dos elementos da ponte (normalmente procura-se identificar o comprometimento devido a corrosão em função da importância estrutural do elemento).

- avaliação da perda da seção transversal dos elementos (procura-se identificar o ponto onde a seção foi mais atingida pela corrosão. Estabelece-se percentualmente a perda da seção do elemento. Quanto maior a importância estrutural do elemento, mais apurada deve ser esta avaliação).

b) Quanto à fadiga:

- observação da ocorrência de trincas em elementos submetidos principalmente a tensões de tração;

- chapas de nó solicitadas à tração;

- elementos ou ligações onde existem concentra-

ções de tensão;

- soldas;

- um bom indicativo dos elementos e ligações mais suscetíveis à fadiga pode ser obtido nas classificações existentes nas principais normas de outros países.

c) Quanto aos impactos de objetos:

- alteração de linearidade de partes dos perfis;

- abaulamento localizado em chapa;

- rasgamento de chapas ou perfis;

- alteração da linearidade de elementos que compõem a ponte;

d) Quanto ao afrouxamento de ligações:

- exame detalhado das principais ligações e da integridade dos rebites e parafusos;

- rotações ou pequenos deslocamentos podem ter como origem o afrouxamento das ligações;

- perda de linearidade de rebites ou parafusos;

- ausência de rebites ou parafusos em ligações.

e) Fundações e aparelhos de apoio:

- assoreamento das fundações;

- desnivelamento de encontros, pilares ou tramos da ponte;

- verticalidade dos aparelhos de apoio;

- impedimento dos deslocamentos dos apoios (corrosão, detritos, etc.);

- rotação ou deslocamentos excessivos dos aparelhos de apoio.

É conveniente ressaltar que a identificação correta das causas do problema, a avaliação realizada no campo e a precisão dos dados levantados, serão utilizados como elementos para a verificação da segurança da ponte.

Após constatado o problema e realizada a inspeção, cabe ao engenheiro de campo, baseado na experiência e conhecimento, adotar ou não medidas que restrinjam o tráfego sobre a ponte comprometida.

Se o problema constatado não oferece riscos quanto à

segurança da ponte ou agravamento do problema, nenhuma restrição ao tráfego é recomendada e a recuperação da ponte poderá ser realizada a qualquer tempo.

Se o problema constatado é grave e oferece riscos quanto à segurança da ponte. O tráfego poderá :

- ser restrito com sobrecarga máxima definida;
- sofrer restrição de velocidade ou sobrecarga (comum em ferrovias pois o impacto é minimizado com a diminuição da velocidade);
- eventualmente interrompido.

A avaliação da extensão do problema e de suas consequências pelo engenheiro de campo é de extrema importância. Pode-se chegar ao caso limite de interrupção do tráfego de uma estrada ou ferrovia, com graves consequências sociais e econômicas.

A recuperação de uma ponte nestas circunstâncias deverá ser feita no menor prazo possível. Por serem extremamente onerosas estas situações emergenciais algumas vezes resultam em soluções provisórias ou até mesmo impróprias.

### II.3- Métodos de Avaliação para Pontes Deterioradas

Criar uma metodologia única para a avaliação de pontes é uma tarefa quase impossível. Cada estrutura possui sua "individualidade", ou seja, sua tipologia estrutural, as manutenções preventivas efetuadas; os problemas existentes podem ter sua origem na fase de projeto, na execução ou durante sua utilização.

Apresentam-se a seguir, três métodos de avaliação de pontes deterioradas. Qualquer dos métodos pressupõe uma inspeção de campo bem realizada e com dados confiáveis sobre a ponte. Estes dados englobam os materiais existentes, a geometria dos elementos, seções transversais e sobrecargas devidamente avaliadas.

Cabe salientar que a apresentação destes métodos tem por finalidade estabelecer algumas diretrizes gerais baseadas em situações de inspeções também de caráter



amplo. Não devem ser analisados como uma metodologia única pois, enfatizando novamente, as particularidades de cada ponte devem ser respeitadas.

### II.3.1- Avaliação Estrutural - Método da Minoração Fixa

Este método consiste na adoção de um fator único de minoração da resistência de todos os elementos estruturais da ponte, sendo este fator aplicado também às ligações. O valor do fator de minoração da resistência é de estrita responsabilidade do engenheiro calculista, baseado nas condições gerais da ponte analisada.

A adoção de um fator único baseia-se na capacidade intuitiva do engenheiro em reproduzir o que foi constatado na inspeção. Uma má avaliação poderá provocar perdas de vidas humanas, além de perdas econômicas consideráveis.

A avaliação da capacidade resistente de uma ponte é, com certeza, o maior problema dos engenheiros responsáveis pelo cálculo de pontes deterioradas.

Este processo é normalmente aplicado quando a corrosão constitui o principal problema da ponte. Estabelecer uma redução global de resistência, de 5%, 10%, 30%, não pode ser considerado um método definitivo. O princípio básico de um bom projeto de recuperação consiste em procurar toda a potencialidade estrutural da ponte.

Não podem ser esquecidas as redundâncias estruturais advindas de continuidades parciais, ligações semi-rígidas e comportamento tridimensional, gerando uma redistribuição de esforços, que no cálculo rotineiro normalmente são desprezadas.

A adoção de um fator único de redução da resistência de elementos estruturais deverá estar associada aos procedimentos de cálculo a serem desenvolvidos. A adequação do projeto da ponte deve ser verificada quanto aos aspectos de concepção estrutural, detalhes das ligações, disposição de longarinas e transversinas, etc.

O método da minoração fixa poderá ser utilizado

respeitando as recomendações das normas técnicas quanto aos carregamentos e verificações da capacidade resistente dos elementos que compõem a ponte inspecionada.

Com todas as considerações acima apresentadas conclui-se que este método deve ser utilizado para uma primeira avaliação da capacidade resistente de uma ponte, devendo ser complementado com verificações das condições reais da estrutura.

### II.3.2- Avaliação Estrutural - Método das Condições Reais

Este segundo método de avaliação exige uma inspeção extremamente detalhada da ponte, na qual todos os elementos e ligações devem ser analisados individualmente.

A inspeção deverá obter informações sobre todos os tipos possíveis de deterioração. Devem ser analisados os problemas decorrentes de: corrosão dos elementos, afrouxamento de ligações, recalques de apoios, deformações existentes nos elementos, condições dos apoios, encontros e fundações, etc.

Com os resultados da inspeção os problemas existentes na ponte serão devidamente identificados. O engenheiro calculista poderá, utilizando os resultados da inspeção, adotar procedimentos de cálculo mais refinados. Por exemplo considerar:

- seção resistente efetiva de cada elemento;
- adotar o trem tipo rodante da via ;
- a rigidez dos nós para efeito do cálculo estático;
- os recalques e deslocamentos, se existirem;
- melhor concepção das hipóteses de cálculo e aprimoramento do modelo matemático. Pode-se considerar, por exemplo, a modelagem tridimensional, apoio elástico ou ligações semi-rígidas, quando for o caso.

Conclui-se, portanto, que este método de avaliação só será compatível quando a recuperação da ponte deteriorada envolver grandes somas em dinheiro ou for de grande

importância para o sistema de transporte da qual faz parte.

É evidente que os custos relativos a este tipo de inspeção são maiores. É necessário uma análise cuidadosa da relação custo-benefício.

Sob o ponto de vista técnico, estes procedimentos seriam desejáveis para todas as pontes. A opção entre recuperar ou substituir poderá ser escolhida através de uma pequena reserva de resistência obtida através de um modelo de cálculo mais preciso e da análise das condições reais de uma ponte.

Porém, algumas vezes é preferível uma análise teórica mais simples, com um maior consumo de aço para o reforço ou recuperação contrapondo a uma solução globalmente mais econômica. Isto é particularmente interessante quando a solução adotada facilita a execução ou diminui o tempo de interrupção da via.

### II.3.3- Avaliação Estrutural - Provas de Carga

A avaliação estrutural através da realização de provas de carga pode ser utilizada para determinar o comportamento estrutural de uma ponte.

O primeiro cuidado básico, neste método, é uma avaliação teórica da capacidade última da ponte. O carregamento a ser utilizado na prova de carga não deve acarretar riscos quanto à segurança parcial ou global da ponte e nem provocar deformações excessivas ou plastificação localizada em ligações ou elementos.

A realização de provas de carga em estruturas como método de avaliação da resistência, tem como objetivo principal verificar os modelos utilizados no cálculo teórico. A instrumentação de uma prova de carga é determinada pelo tipo de informação que se deseja obter (deslocamentos, avaliação das tensões em pontos críticos, comportamento global da estrutura); isto exige um perfeito entrosamento entre o engenheiro calculista e o responsável pela realização da prova de carga.

Normalmente, medições realizadas em provas de carga

fornecem um grande número de resultados de deformações (nos pontos previamente definidos) e de deslocamentos.

Os resultados obtidos devem ser devidamente depurados e analisados com extrema cautela. Para a maioria das estruturas, em particular para as pontes, provas de carga indicam reservas de resistência superiores às obtidas nos cálculos teóricos. Estas reservas de resistência estão associadas ao comportamento tridimensional e à redundância da estrutura decorrente da redistribuição dos esforços, muitas vezes não considerados no cálculo teórico.

A simples constatação de uma reserva de resistência deve ser considerada pelo calculista, porém analisada criticamente. Alguns fenômenos que não são avaliados na prova de carga, como por exemplo a fadiga, podem ocorrer e ocasionar a ruína de uma estrutura. A segurança de uma estrutura está associada a resistência localizada de elementos ou ligações que podem estar próximos de seu estado limite último. Vale sempre observar que a corrente sempre rompe no elo mais "fraco".

Os aspectos técnicos da verificação de uma prova de carga, bem como a análise de resultados, serão melhor discutidos no capítulo VI deste trabalho.

Ressalta-se que este processo de avaliação é oneroso e portanto, só deverá ser utilizado quando um estudo de viabilidade econômica assim o determinar.

#### II.4- Exemplo de uma Inspeção: Ponte sobre Rio Casqueiro - Petrobrás

Relata-se, a seguir, a inspeção de uma ponte utilizada como suporte de dutos do sistema Alemoa-Utinga da PETROBRÁS- Petróleo Brasileiro S.A.

Esta ponte está situada sobre o rio Casqueiro no município de Cubatão -SP e foi inspecionada com o objetivo de avaliar a segurança.

Esta inspeção foi realizada em março de 1987 pela equipe do Laboratório de Estruturas da EESC-USP. Todo o

trabalho inicial de planejamento da inspeção e o cálculo preliminar dos esforços foi elaborado a partir de um memorial desenvolvido durante o reforço e recuperação realizado em 1979.

Esta ponte é constituída de duas treliças principais afastadas de 3,6m com sete tramos cujos vãos são: 9,9m + 5x30,5m + 9,9m.

Em visita preliminar constatou-se que a corrosão era a principal causa da deterioração desta ponte, pois está situada em ambiente marítimo e atmosfera agressiva, com alto índice de poluição industrial.

Pode-se observar, nas descrições abaixo, que em função das particularidades desta ponte, adotaram-se procedimentos que não caracterizam nenhum dos tipos relacionadas anteriormente. Adotou-se como metodologia uma inspeção similar à apresentada como especial e para a verificação da capacidade resistente optou-se pelo método das condições reais, porém utilizando fatores de minoração das características geométricas para cada conjunto de elementos.

A inspeção foi realizada com os seguintes objetivos iniciais:

- verificação das características geométricas de todos os elementos da ponte;

- verificação do estado de corrosão de todas barras, chapas de união e elementos de ligação;

- estimativa do grau de comprometimento das seções transversais das barras devido a ocorrência da corrosão;

- verificação dos deslocamentos existentes nos principais elementos estruturais, em particular longarinas e transversinas;

- verificação das condições dos apoios da ponte;

- verificação das condições dos apoios das tubulações.

#### II.4.1- Metodologia Utilizada para a Inspeção.

A metodologia da inspeção foi definida após uma visita preliminar, em que se constatou que a deterioração da ponte devia-se principalmente à corrosão.

As barras que compõem a estrutura da ponte não apresentavam deformações excessivas que indicassem problemas estruturais graves, pois constatou-se somente deformações excessivas nas transversinas de cabeceira de ambos os lados.

A seguir foi realizado o cálculo dos esforços e a verificação dos principais elementos a partir do projeto fornecido pela PETROBRÁS.

De posse destes dados preliminares definiu-se a sistemática para a inspeção:

- verificação das seções transversais de todos elementos da ponte (algumas seções constantes no projeto não eram as existentes);

- verificação das principais dimensões da ponte;

- verificação do estado de corrosão de todas as barras e elementos da estrutura;

- verificação dos deslocamentos existentes.

Em função dos resultados teóricos e verificações das resistências dos elementos obtidos na primeira avaliação adotou-se um procedimento misto entre os métodos de minoração fixa e o das condições reais.

O cálculo preliminar das tensões indicou que não seria necessário uma intervenção imediata e que seria possível fazer uma inspeção detalhada antes de propor possíveis reforços e a metodologia de recuperação dos elementos corroídos.

O critério de verificação do comprometimento das barras por corrosão foi estabelecido considerando quatro níveis de comprometimento para o cálculo das características geométricas dos elementos:

- nível de corrosão 0: barra não apresenta corrosão;

- nível de corrosão 1: corrosão superficial, redução de cerca de 5% nas características geométricas da seção transversal.

- nível de corrosão 2: corrosão com comprometimento da seção, fator de redução de aproximadamente 10%.

- nível de corrosão 3: corrosão com maior

comprometimento da seção do elemento, fator de redução das características geométricas 20%.

Todas as barras foram inspecionadas assim como as chapas e elementos de ligação e os níveis de corrosão foram identificados barra a barra marcando-as durante a inspeção com tinta "spray".

As Figuras II.1 e II.2 apresentam o esquema geral da ponte onde, em função do número de tramos e de elementos, pode-se aquilatar as dificuldades do trabalho de inspeção.

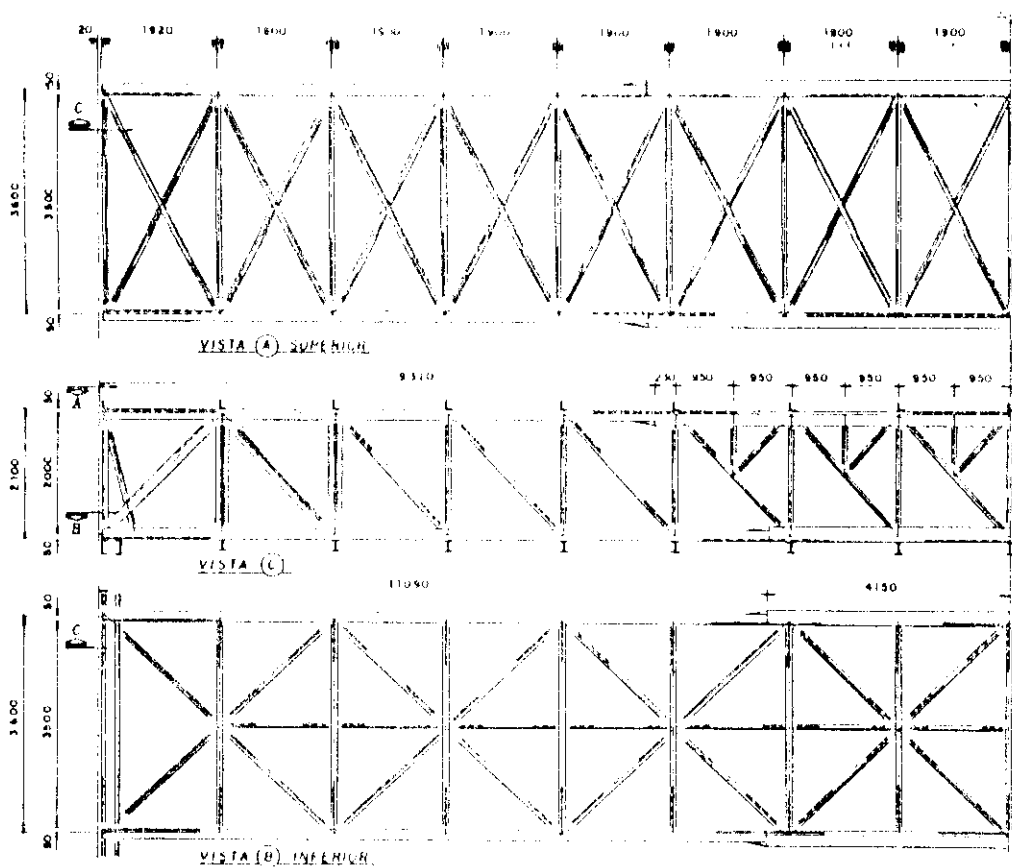


Figura II.1 - Esquema geral. Ponte sobre o Rio Casqueiro, Cubatão, S.P.

As dimensões das seções transversais dos elementos foram medidas simultaneamente à identificação dos níveis de corrosão. As dimensões dos perfis foram anotados em desenhos, previamente preparados, do esquema geral de cada tramo da ponte.

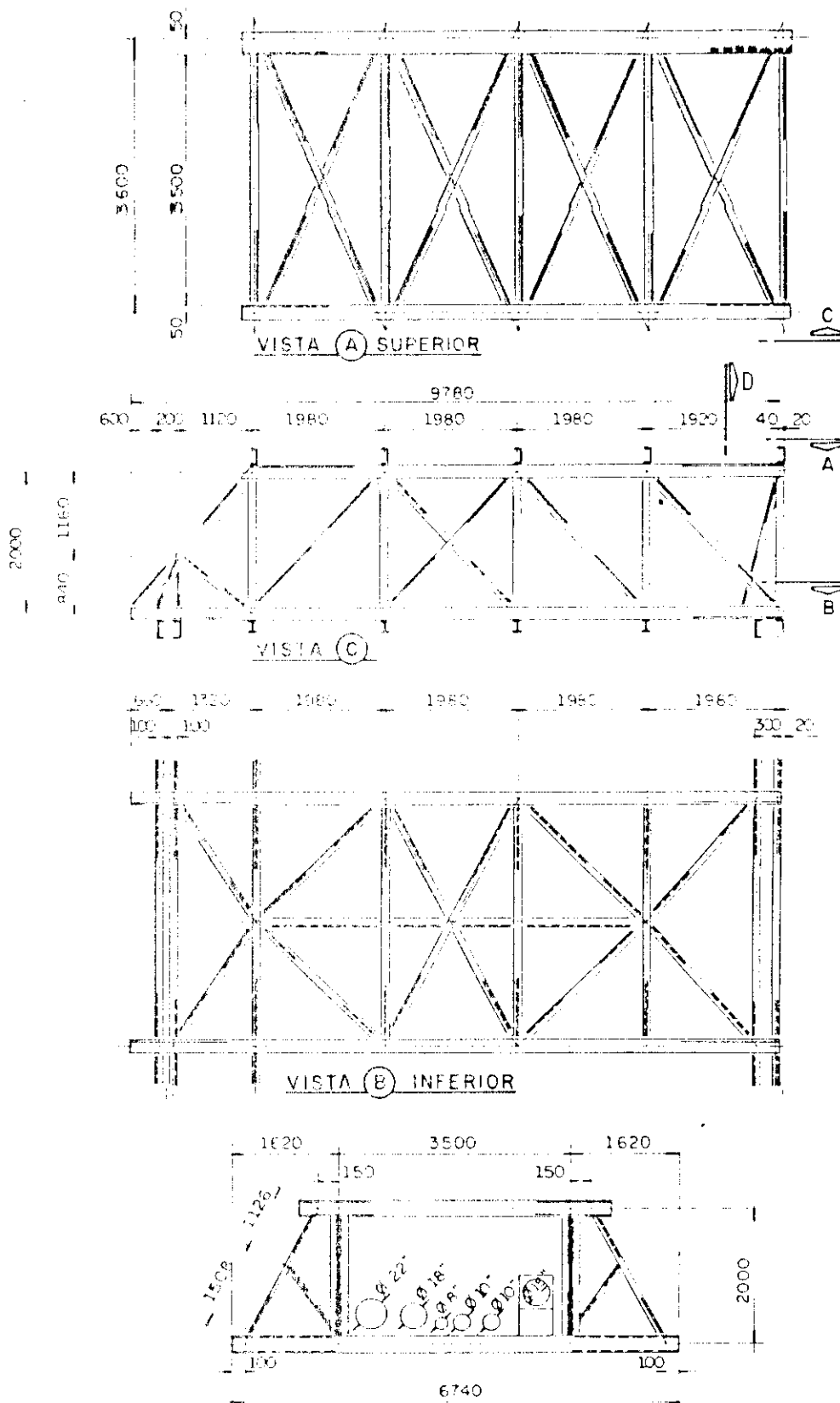


Figura II.2 - Esquema geral. Tramo de cabeceira Ponte. Casqueiro, Cubatão, S.P.



A Foto II.1 ilustra uma vista interna da ponte; a Foto II.2 apresenta os técnicos inspecionando a parte inferior da ponte trabalhando sobre uma plataforma móvel projetada para esta finalidade.

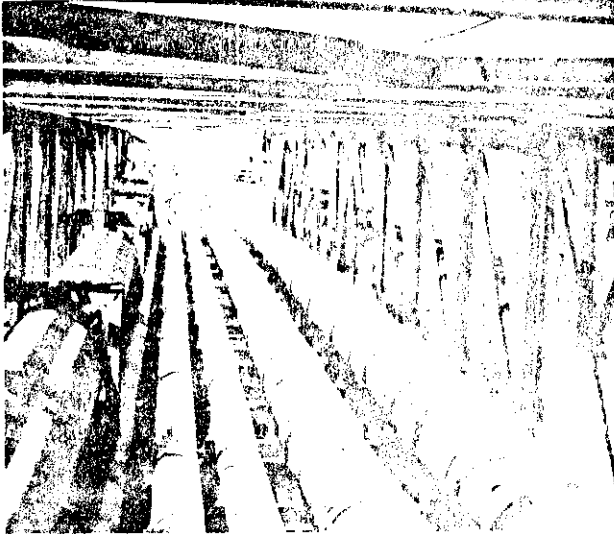


Foto II.1- Vista geral da ponte e dos dutos. Observa-se detalhe da marcação dos níveis de corrosão

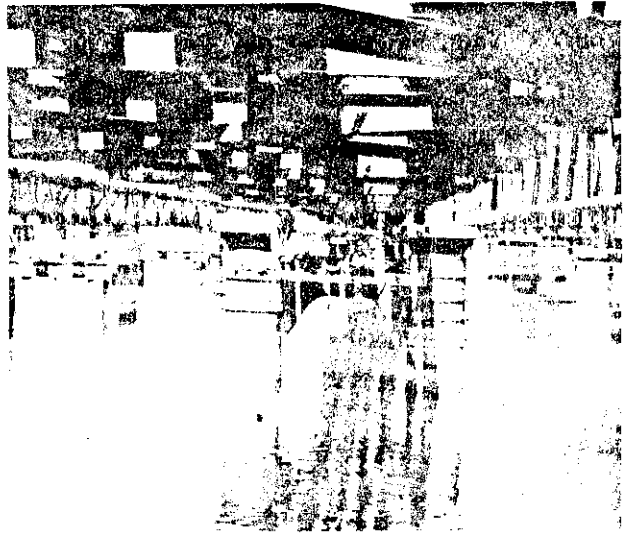


Foto II.2- Vista inferior da ponte. Detalhe da plataforma para inspeção da parte inferior

As Fotos II.3 e II.4 ilustram a acentuada corrosão observada numa transversina, onde a deterioração do perfil e dos parafusos esta evidente.

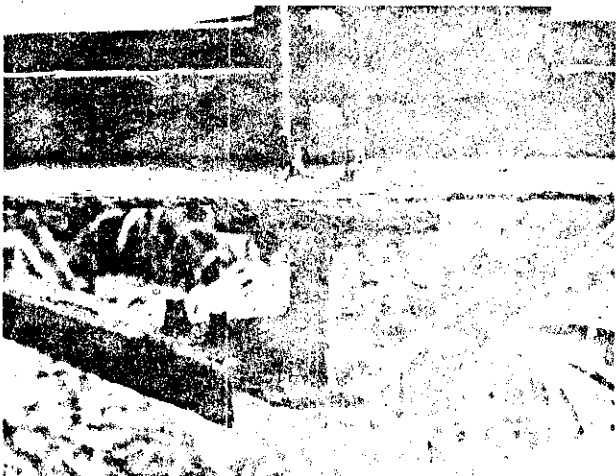


Foto II.3- Vista frontal da ligação transversina banzo inferior em adiantado estado de corrosão

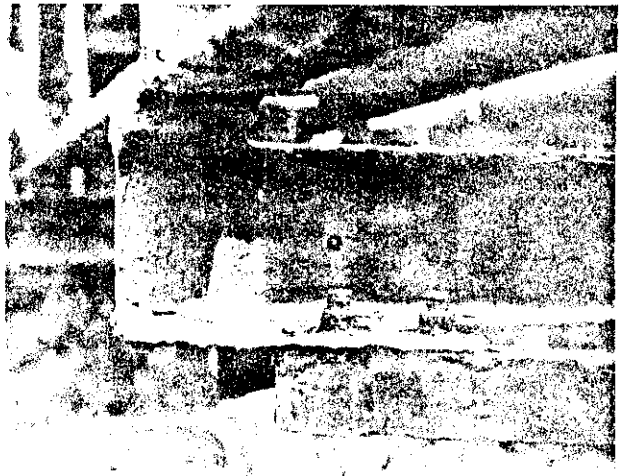
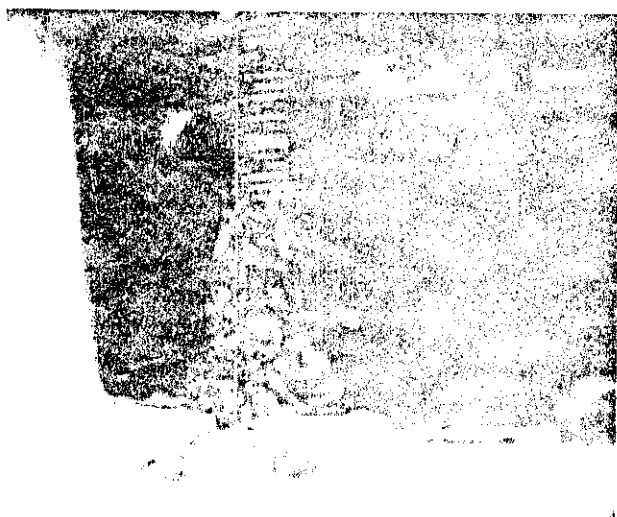


Foto II.4- Vista lateral da ligação transversina banzo inferior. Detalhe da perda de espessura da mesa inferior da transversina

A Foto II.5 ilustra a corrosão de um chumbador e na Foto II.6 estão apresentados parafusos e porcas, totalmente corroídos, retirados da ponte.



*Foto II.5- Detalhe da corrosão de um chumbador.*



*Foto II.6- Parafusos e arruelas corroídos retirados da ponte.*

#### II.4.2- Exemplos dos Resultados Obtidos na Inspeção

A partir da sistemática relatada anteriormente apresentam-se, a seguir, alguns exemplos dos resultados obtidos.

A TABELA II.1 reproduz parcialmente as medições das dimensões dos perfis com maior redução da seção transversal devido à corrosão.

TABELA II.1  
CANTONEIRA (101x101x6,4mm)

|         | Medidas das abas dos banzos em mm |
|---------|-----------------------------------|
| Tramo 0 | 91 - 90 - 90 - 92                 |
| Tramo 6 | 96 - 96 - 97 - 98                 |

CANTONEIRA (152x152x6,4mm)

|         | Medida das abas dos banzos em mm              |
|---------|---|
| Tramo 1 | 146 - 142 - 145 - 147 - 145 - 144 - 145 - 143 |
| Tramo 2 | 140 - 143 - 144 - 142 - 145 - 147 - 140 - 143 |
| Tramo 3 | 143 - 145 - 143 - 143 - 135 - 143 - 135       |
| Tramo 4 | 140 - 147 - 140 - 145 - 140 - 142 - 143       |
| Tramo 5 | 150 - 145 - 150 - 145 - 141 - 143             |

CANTONEIRA (202x202x6,4mm)

|         | Medida das abas dos banzos em mm |
|---------|----------------------------------|
| Tramo 1 | 190 - 178 - 195 - 180            |
| Tramo 2 | 193 - 195 - 185 - 185            |
| Tramo 3 | 190 - 180 - 194 - 175            |
| Tramo 4 | 195 - 180 - 195 - 180            |
| Tramo 5 | 195 - 185 - 196 - 170            |

Os níveis de corrosão utilizados para quantificar a redução das características geométricas dos elementos estão reproduzidos, parcialmente, a seguir. A Tabela II.2 ilustra a sistemática de apresentação dos resultados.

TABELA II.2 - Resultados parciais dos níveis de corrosão nos elementos, chapas do nó e parafusos

INSPEÇÃO PONTE RIO CASQUEIRO CUBATÃO-SP

PETROBRÁS PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.

TRAMO DA PONTE: 0

BARRAS: BANZO SUPERIOR

| BARRA | TIPO           | SEÇÃO OBSERVADA | NÍVEL DE CORROSÃO | OBS.                                 |
|-------|----------------|-----------------|-------------------|--------------------------------------|
| 05-09 | Banzo superior | L 4" 4" 1/2"    | 3                 | Banzos estão em contato c/ vegetação |
| 09-13 | " "            | (101x101x12,5)  | 3                 |                                      |
| 13-17 | " "            | "               | 3                 |                                      |
| 17-21 | ⋮              | ⋮               | ⋮                 |                                      |
| 07-11 | ⋮              | ⋮               | ⋮                 |                                      |

TRAMO DA PONTE: 1

CHAPAS: BANZO INFERIOR

| NÓ | CHAPA VERTICAL | CHAPA HORIZONTAL | PARAFUSOS |
|----|----------------|------------------|-----------|
| 1  | 1              | 2                | 3         |
| 5  | 1              | 1                | 3         |
| 9  | 1              | 3                | 3         |
| 13 | ⋮              | ⋮                | ⋮         |

TRAMO DA PONTE: 1

PARAFUSOS: BANZO SUPERIOR

| NÓ | CHAPA VERTICAL | CHAPA HORIZONTAL | PARAFUSOS |
|----|----------------|------------------|-----------|
| 3  | 1              | 3                | 3         |
| 7  | 3              | 3                | 3         |
| 11 | 1              | 3                | 3         |
|    | ⋮              | ⋮                | ⋮         |

A avaliação dos deslocamentos existentes nas longarinas e transversinas foi realizado com nível de água, tendo como referência a treliça esquerda (cabeceira de Cubatão). Uma mangueira de 10mm de diâmetro e régua milimetrada foram utilizadas para efetuar as medições.

Os resultados indicaram deslocamentos compatíveis com o cálculo teórico. Ressalta-se que essas medições indicaram um deslocamento da treliça direita de aproximadamente 10mm em

relação a esquerda em todos os tramos da ponte.

#### II.4.3- Principais Conclusões Obtidas

As principais conclusões e observações sobre a inspeção realizada estão abaixo relacionadas:

-Os deslocamentos das transversinas e longarinas são coerentes com os valores do cálculo teórico. Estes deslocamentos são inferiores aos do estado limite de utilização;

-Dois tipos de corrosão foram mais observados:

a) corrosão por pite principalmente nas abas de cantoneiras e nos perfis I das longarinas e transversinas;

b) corrosão por esfoliação de chapas e bordas de perfis I. A esfoliação de chapas está relacionada com a utilização de solda elétrica em aços de baixa soldabilidade (Aço da ponte ASTM A-7), a soldagem, executada durante a recuperação realizada em 1979, favoreceu a ocorrência deste tipo de corrosão;

-As ligações transversinas-banzos, com parafusos trabalhando à tração, apresentaram corrosão acentuada. O colapso desta ligação poderia levar a ruína de elementos da ponte que conduziriam também à ruptura da tubulação.

-Concluí-se que as deformações excessivas das transversinas de cabeceira tinham como causa provável o recalque das tubulações que estavam enterradas nas cabeceiras da ponte.

#### II.4.4- Cálculo e Projeto de Reforço

O cálculo dos esforços foi realizado a partir dos carregamentos abaixo listados:

- peso próprio da ponte e tubulação;
- peso do líquido na tubulação (água);
- ação do vento na estrutura;
- sobrecarga;
- variação de temperatura 15°.

Para o cálculo dos esforços na ponte foi utilizado um programa de computador para treliças tridimensionais.

Todas as verificações de resistência e estabilidade foram efetuados com base na norma brasileira NBR-8800 "Projeto e execução de estruturas de aço para edifícios" e nos casos omissos ou quando não aplicável utilizou-se as recomendações de norma americana AASTHO.

Principais conclusões e recomendações:

- reforço parcial no banzo superior para diminuir o índice de esbeltez;
- alteração da ligação transversinas - banzo;
- substituição das transversinas de cabeceira e construção, nas cabeiras da ponte, de novos blocos de concreto para ancoragem da tubulação;
- substituição de chapas e elementos com corrosão acentuada.

A Figura II.3 esquematiza os reforços propostos para os banzos e a nova fixação banzo-transversinas.

O cálculo e detalhamento das alterações propostas foi acompanhado de um memorial descritivo dos procedimentos de recuperação da ponte onde estão listadas todas as recomendações para a execução e especificações técnicas.

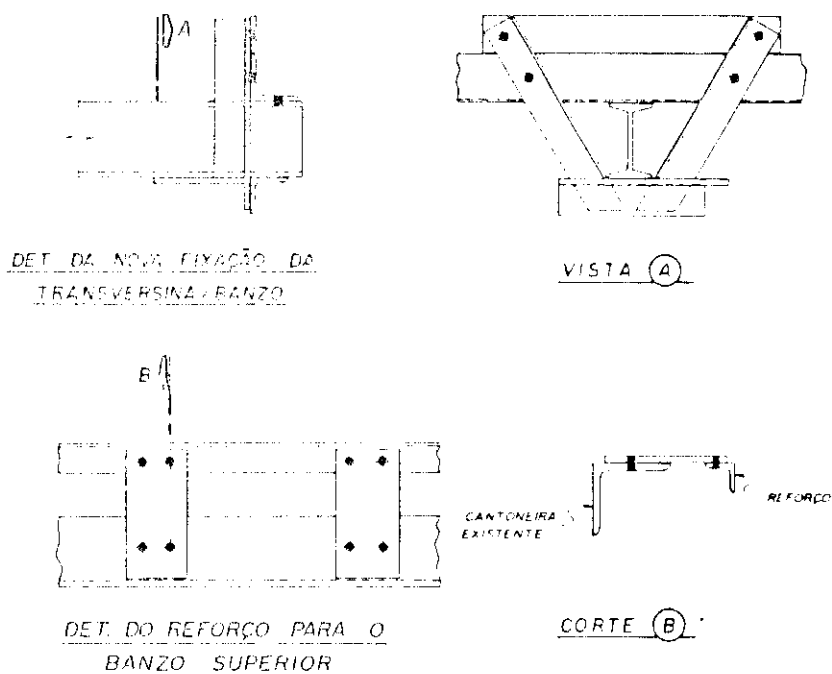


Figura II.3- Detalhe dos reforços do banzo e da fixação proposta para as transversinas

#### II.4.5- Conclusões da Inspeção

A metodologia utilizada na inspeção mostrou-se bastante adequada a esta situação pois durante os trabalhos de execução dos reforços somente pequenas alterações foram necessárias devido, principalmente, a interferências e variações nas dimensões dos perfis.

A sistemática de redução de área e rigidez de elementos devido à corrosão parece também ser adequada a esta situação. Embora a capacidade resistente dos elementos tenham sido até subestimados, a importância desta ponte justifica tal solução uma vez que o abastecimento de derivados de petróleo da cidade de São Paulo depende deste oleoduto.

A maior ressalva a este trabalho consistiu na impossibilidade do acompanhamento mais efetivo dos trabalhos de recuperação desta ponte.

#### II.5- Conclusões

A importância da realização de manutenções e inspeções periódicas está relacionada não só com a segurança de uma ponte como também com a sua vida útil.

A metodologia de inspeção deve estar perfeitamente associada com os objetivos a que se destina e constitui-se o principal fator a ser observado para a operação com segurança de todo sistema viário do qual as pontes são integrantes.

Pode-se concluir que, em função da importância das pontes e dos valores envolvidos nas recuperações ou mesmo substituição em caso de ruína, as inspeções devem ser conduzidas de maneira criteriosa pelos engenheiros responsáveis e devidamente valorizadas como uma atividade indispensável na utilização de uma ponte.

Os critérios de análise dos dados coletados após uma inspeção e a metodologia na verificação estrutural devem ser realizados procurando adaptar-se à realidade observada.

Os métodos de avaliação estrutural apresentados neste

capítulo (método da mineração fixa, da condição real e provas de carga) são indicativos dos procedimentos a adotar.

É importante salientar a correlação de alguns dados históricos relatados no capítulo anterior com os tipos de deterioração mais comumente observados nas pontes, assunto a ser desenvolvido no capítulo III. A realização de uma inspeção pressupõe que o engenheiro responsável tenha um conhecimento mínimo do tipo de deterioração, da sua ocorrência e localização sem os quais a inspeção estará fadada ao insucesso.

Outro aspecto importante a comentar é a realização de provas de carga, objeto do estudo relatado no capítulo VI, que embora sendo uma ferramenta importante para a avaliação estrutural é muitas vezes incorretamente utilizada pelo desconhecimento de como realizá-las e das suas limitações.

No capítulo a seguir procurar-se-á fornecer dados e informações sobre os tipos de deterioração e sua ocorrência numa ponte, enfatizando mais uma vez a importância da realização de inspeções periódicas e manutenções preventivas para a segurança e a vida útil de uma ponte.



## CAPÍTULO III

### PRINCIPAIS ASPECTOS DA DETERIORAÇÃO DE PONTES

#### III.1- Preliminares

A deterioração de pontes tem diversas causas. Elas podem ser decorrentes do próprio projeto, como consequência de detalhes mal resolvidos que favorecem o surgimento de vários tipos de deterioração, devido a má utilização e, evidentemente, da falta de manutenções periódicas.

Em geral, a deterioração de uma ponte ocorre principalmente devido à falta de manutenções preventivas, isto é, todo o processo é agravado quando os procedimentos para eliminar as causas não são devidamente realizados.

Relata-se, neste capítulo, os principais tipos de deterioração de uma ponte: corrosão, afrouxamento de ligações, impacto de objetos em elementos estruturais, aparelhos de apoio e fundações, má conservação das vias e fadiga. Apontam-se também suas causas e algumas recomendações sobre como solucionar estes problemas.

#### III.2- Corrosão

A corrosão é a principal causa da deterioração de estruturas de aço e também o principal problema para a manutenção.

Não é objetivo deste trabalho discutir em profundidade

os mecanismos químicos e físicos da corrosão. São necessários porém, algumas explicações que permitam uma visão geral do problema. A corrosão é um fenômeno que deve ser enfrentado desde o projeto de uma estrutura até a sua execução e manutenção.

Podemos, simplifadamente, dizer que a corrosão do aço é causada por uma reação química ou eletroquímica na qual o aço transforma-se em óxido de ferro e outros componentes. A oxidação do aço altera suas características físicas e mecânicas tornando a vinculação entre o aço inalterado e o óxido extremamente frágil. Ocorre um tipo de "escamação" na região corroída e como consequência, a redução da espessura do elemento.

A perda de espessura nos elementos estruturais de aço poderá acarretar a concentração de tensões na região enfraquecida ocasionando a diminuição da capacidade última da peça corroída. No limite, pode provocar o colapso por insuficiência de seção ou através da flambagem do elemento.

A corrosão de estruturas sujeitas ao fenômeno da fadiga (estruturas sujeitas a carregamentos cíclicos) amplia consideravelmente os riscos de ruína. A redução da seção dos elementos (barras, chapas, parafusos, soldas), diminui consideravelmente a capacidade última à fadiga.

Conhecer os mecanismos da corrosão é de grande importância aos engenheiros uma vez que no desenvolvimento e detalhamento de um projeto deve-se cuidar para que os detalhes de uma estrutura não favoreçam o surgimento deste fenômeno. A realização de programas para manutenções periódicas ou corretivas deve ser realizada criteriosamente de forma a aumentar a vida útil da ponte.

Alguns dados relativos aos custos da corrosão indicam a importância que este tipo de deterioração dos materiais assumiu. Estes números tornaram-se mais significativos devido ao avanço tecnológico das últimas décadas e o conseqüente aumento na utilização do aço.

As perdas econômicas devido ao fenômeno da corrosão ocorrem sob forma de custos diretos e indiretos. As

observações, a seguir, não se restringem a corrosão de pontes.

Custos diretos:

- a) substituição de peças corroídas;
- b) procedimentos destinados à manutenção;
- c) procedimentos destinados à inspeção de estruturas e equipamentos;
- d) lucros cessantes;

Custos indiretos:

- a) Paralisação devido à manutenção ou substituição;
- b) Perda de eficiência nos processos industriais decorrentes do aparecimento da corrosão;
- c) Perdas de produtos;
- d) Contaminação de produtos ou da atmosfera em decorrência das falhas por corrosão;
- e) Substituição de elementos ou de toda a estrutura, para o caso particular das pontes.

A título de ilustração da importância econômica que representa o fenômeno corrosão, apresenta-se na TABELA III.1 dados estimados referentes a estes valores para vários países:

TABELA III.1 - Custos Estimados da Corrosão<sup>1</sup>

| PAÍS                  | ANO BASE | CUSTO EM US\$ $\times 10^9$ | % PNB |
|-----------------------|----------|-----------------------------|-------|
| URSS                  | 1969     | 6,7                         | -     |
| ALEMANHA<br>OCIDENTAL | 1969     | 6,0                         | 0,75  |
| FINLÂNDIA             | 1965     | 0,047 A 0,062               | -     |
| SUÉCIA                | 1964     | 0,058 A 0,077               | -     |
| ÍNDIA                 | 1961     | 0,32                        | -     |
| AUSTRÁLIA             | 1973     | 0,55                        | 1,5   |
| JAPÃO                 | 1977     | 9,2                         | 1,8   |
| REINO<br>UNIDO        | -----    | ---                         | ---   |
| EUA                   | 1975     | 7,0                         | 4,2   |

<sup>1</sup> GENTIL, V. "Corrosão" 2 ed Rio de Janeiro: Guanabara Dois 1983. 453p.

### III.2.1- Formas de Corrosão

Podemos descrever a corrosão como reações de oxidação dos metais e para tanto deve-se distinguir a corrosão provocada por agentes naturais ou por outros agentes (ácidos, etc.).

Os principais tipos de corrosão passíveis de serem encontrados no aço estão relacionados abaixo e a identificação da forma de corrosão nos permite definir as causas prováveis e o grau de comprometimento do elemento corroído:

- Corrosão uniforme: processa-se atingindo toda a extensão da superfície do elemento. Provoca perdas de espessura aproximadamente constantes.

- Puntiforme: a corrosão ocorre localizadamente com o aparecimento de pites, pequenas cavidades com o material corroído saliente em relação a superfície não comprometida. No extremo perfura o elemento.

- Esfoliação: a corrosão se processa em diferentes camadas, atingindo praticamente toda a espessura da peça e provocando a separação e o "inchamento" em forma lamelar. Ocorre normalmente em chapas.

- Por placas: corrosão localizada em regiões formando placas.

- Intergranular: corrosão localizada entre os grãos que formam os cristais alterando a capacidade resistente podendo provocar micro-fraturas. Este mecanismo de corrosão é normalmente conhecido como corrosão sob tensão. Este tipo de corrosão não é visualmente identificado.

- Intragranular: corrosão que ocorre nos grãos dos cristais, também podendo provocar micro-fraturas. As observações são idênticas as acima citadas.

- Filiforme: corrosão que se processa em filamentos, normalmente em peças revestidas. O revestimento é deslocado quando do início do processo de corrosão.

### III.2.2- Exemplos Observados

A corrosão de perfis, chapas e elementos de ligação constitui, com certeza, o principal problema da deterioração de pontes.

A intensidade da ocorrência da corrosão em pontes está diretamente ligada ao "tipo" de atmosfera em que estas se encontram. Evidentemente este processo é agravado em meios agressivos como regiões marítimas e regiões industrializadas com alto grau de poluição atmosférica.

A corrosão pode ser acelerada em função da falta de limpeza das pontes, onde o acúmulo de sujeiras e detritos (folhas, galhos, areia, etc.) irá favorecer a presença de umidade, fator primordial para o início e desenvolvimento do processo da corrosão.

Apresentam-se, a seguir, alguns exemplos que ilustram alguns tipos de corrosão em pontes.

Nas fotos III.1 a III.4, apresentam-se aspectos da corrosão de uma ponte sobre o Rio Casqueiro-Cubatão-SP. - atmosfera marítima e industrial.



Foto III.1: Vista geral da ponte, suporte da tubulação de derivados de petróleo da PETROBRAS. Complexo Alemoa.

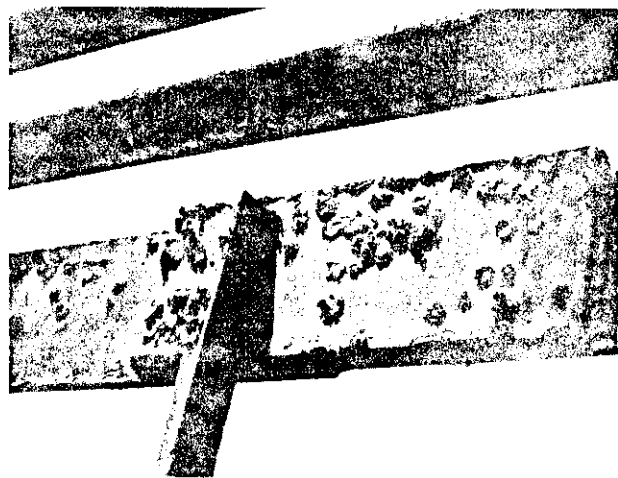


Foto III.2: Corrosão por pite-banzo superior da treliça. Forma de corrosão característica em toda ponte.

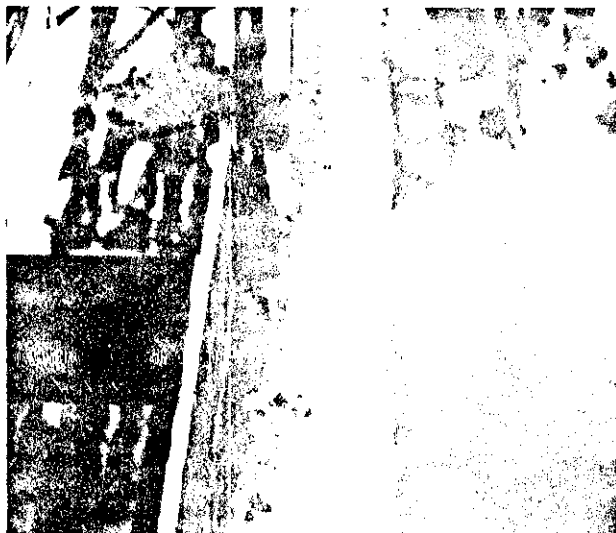


Foto III.3: Corrosão do banzo inferior. A perda de seção esta evidente na borda da cantoneira.



Foto III.4: Detalhe do apoio (corrosão por esfoliação) e comprometimento das porcas e respectivos chumbadores.

As fotos III.5 a III.8 são exemplos de corrosão na Ponte Hercílio Luz (Florianópolis - SC)

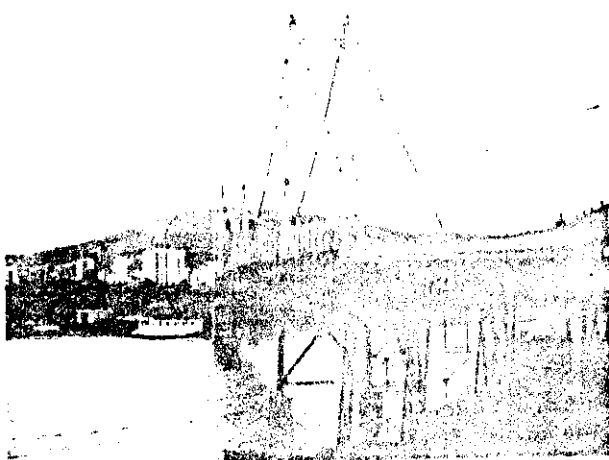


Foto III.5: Vista geral da Ponte Hercílio Luz



Foto III.6: Corrosão total da chapa de alma de uma viga principal.



*Foto III.7: Corrosão total da alma da viga. Salientam-se os aspectos preocupantes da corrosão quanto à segurança desta ponte.*



*Foto III.8: Corrosão em roletes de apoio retirados durante a recuperação parcial da ponte Hercílio Luz.*

As fotos III.9 e III.10 são exemplos de corrosão observados em pontes ferroviárias do trecho CURITIBA-PARANAGUÁ, na região da Serra da Graciosa. Região caracterizada pela umidade relativa do ar elevada e chuvas intensas.

Salienta-se que esta ferrovia tem um tráfego intenso pois toda a produção agrícola do Estado do Paraná destinada à exportação utiliza esta via.

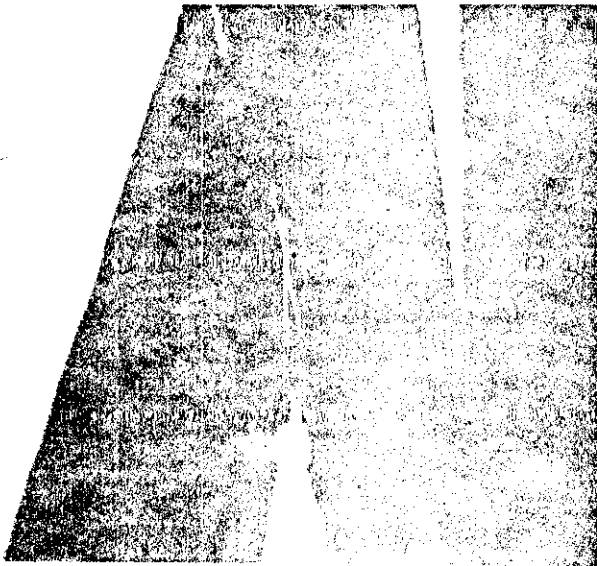


Foto III.9: Corrosão da diagonal da viga principal. A região de contato das cantoneiras favorece a corrosão devido ao acúmulo de impurezas e umidades.



Foto III.10: Corrosão da cantoneira retirada de uma ponte. Em destaque a região de contato com outras peças.

As fotos III.11 e III.12 apresentam duas pontes da região de CUBATÃO-SP, com diferentes graus de corrosão, atmosfera marítima e industrial.

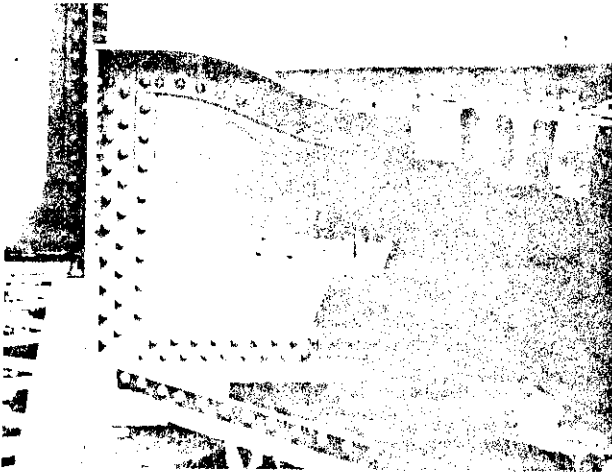


Foto III.11: Efeitos da corrosão por pite em transversina de uma ponte recém pintada.

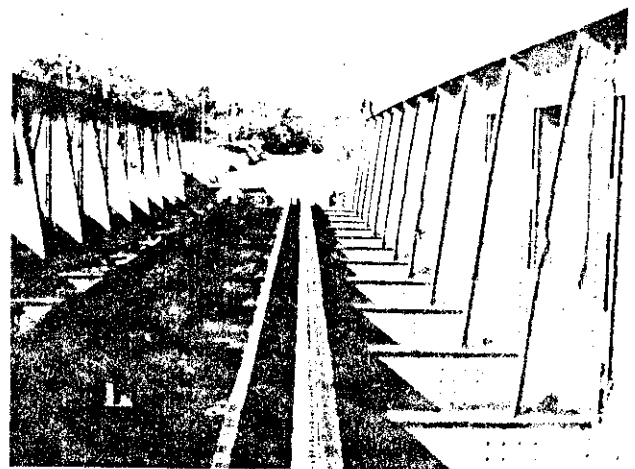


Foto III.12: Ponte ferroviária adaptada para rodovia. A corrosão atingiu todos os elementos ocasionando o abandono.



### III.2.3- Prevenção da Corrosão em Pontes — Alguns Aspectos

A principal medida preventiva destinada a evitar a corrosão é a adoção, na fase de projeto, do aço adequado e também da pintura mais indicada para as condições ambientais em que a ponte será instalada. Este dado é extremamente importante para as pontes novas.

É recomendável o uso de aços resistentes à corrosão (aços patináveis) para as novas pontes. Estes aços tem um melhor desempenho, reduzindo os efeitos da corrosão.

Para os aços comuns recomenda-se a pintura, após uma limpeza adequada, utilizando tintas e espessuras de demãos devidamente estudadas. Estes cuidados proporcionam um melhor desempenho do aço perante as agressões atmosféricas.

A tecnologia de pintura é, por si só, uma ciência complexa e com múltiplas soluções onde somente o estudo de cada caso permitirá a escolha dos materiais a serem empregados.

Outro aspecto extremamente importante para evitar a corrosão consiste na limpeza adequada das pontes, com a eliminação de impurezas, areia e outros detritos.

A limpeza deve ser feita de maneira sistemática, pois o acúmulo de sujeira propicia a concentração de umidade associada ou não a elementos agressivos da atmosfera (zonas com poluição industrial, presença do ozônio do orvalho, etc.). Estes fatores aceleram de maneira significativa o processo da corrosão.

Nas pontes existentes além dos cuidados com a limpeza já descritos, devem ser associadas inspeções periódicas e manutenções adequadas que envolvem:

- inspeção visual de toda a estrutura;
- inspeção detalhada dos pontos mais sujeitos à corrosão (aparelhos de apoio, contatos de perfis em regiões que favoreçam o acúmulo de detritos, superfícies planas tais como chapas de contraventamento, etc.);
- pinturas periódicas.

A pintura em pontes existentes exige cuidados especiais, tais como:

- limpeza adequada da superfície (jateamento de areia, escovas mecânicas, limpeza a fogo, etc.);

- escolha de tinta adequada e compatível com a existente para o caso em que estas não são totalmente retiradas;

- aplicação da tinta em demãos com espessuras recomendadas, bem como a utilização de cores diferentes entre as demãos para facilitar a inspeção;

- temperatura ambiente e da estrutura compatível com a tinta utilizada;

- umidade relativa do ar compatível com a tinta utilizada.

As inspeções periódicas devem ser realizadas de acordo com a vida útil estimada da tinta utilizada, considerando também as condições ambientais do local da ponte.

A Tabela III.2 ilustra alguns exemplos da corrosão e os principais pontos a serem inspecionados.

Tabela III.2- Localização da Corrosão

| DESCRIÇÃO DO ELEMENTO                  | LOCALIZAÇÃO E TIPO DE CORROSÃO MAIS PROVÁVEL                         | COMENTÁRIOS GERAIS   |
|--|--|--|
| <p>Corrosão de parafusos e rebites</p> | <p>REBITE</p> <p>PARAFUSO</p> <p>ESFOLIAÇÃO</p> <p>ESTAGIO FINAL</p> | <p>A corrosão de rebites e parafusos inicia-se no rebite superior, com aumento de sujeira e umidade. Início do estado de corrosão desmembramento do elemento. No estágio final há o desprendimento do teste do parafuso ou rebite.</p> |
| <p>Corrosão chapas verticais</p>       |  | <p>Corrosão localizada na ligação de duas chapas verticais soldadas. O processo de corrosão é localizado do podendo, no limite, atingir a chapa.</p>   |
| <p>Corrosão chapas horizontais</p>     | <p>ESFOLIAÇÃO</p> <p>PITE</p>  | <p>A localização da corrosão em chapas horizontais está associada a umidade e sujeira depositadas. Podem ocorrer corrosão uniforme, pite ou estufamento. A estufamento inicia-se pela borda da chapa.</p>                              |

Tabela III.2- Localização da Corrosão



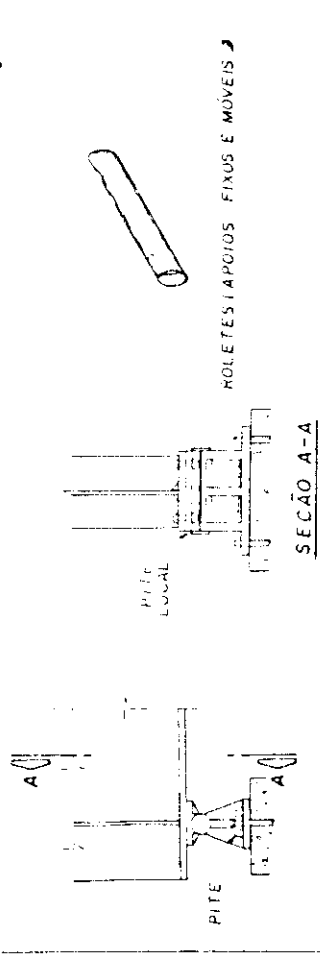
| DESCRIÇÃO DO ELEMENTO         | LOCALIZAÇÃO E FORMA DE CORROSÃO MAIS FREQUENTE                                       | COMENTÁRIOS GERAIS   |
|-------------------------------|--|--|
| <p>Elementos de Estrutura</p> |    | <p>Em estruturas de concreto armado, a corrosão ocorre principalmente na região de menor fundamento, devido à presença de água e oxigênio.</p> |
| <p>Elementos de Estrutura</p> |   | <p>Em estruturas de concreto armado, a corrosão ocorre principalmente na região de menor fundamento, devido à presença de água e oxigênio.</p> |
| <p>Elementos de Estrutura</p> |  | <p>Em estruturas de concreto armado, a corrosão ocorre principalmente na região de menor fundamento, devido à presença de água e oxigênio.</p> |

Tabela III.2- Localização da Corrosão

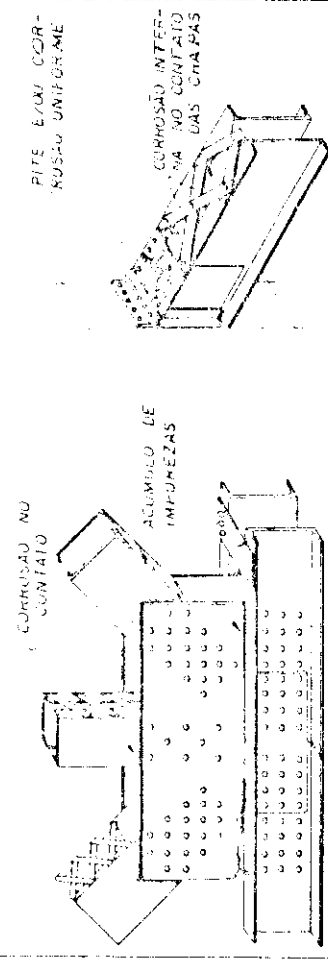
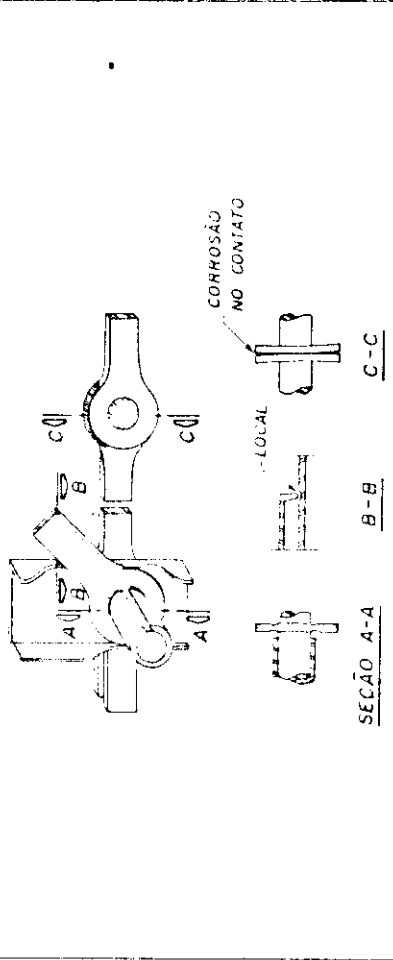
| DESCRIÇÃO DO ELEMENTO  | LOCALIZAÇÃO E TIPO DE CORROSÃO MAIS PROVÁVEL   | COMENTÁRIOS GERAIS  |
|------------------------|--|---|
| <p>Nos de treliças</p> |  <p>CORROSÃO NO CONTATO</p> <p>ACUMULO DE IMPUREZAS</p> <p>CORROSÃO INTER-NO CONTACTO NA DAS CHAPAS</p> <p>CORROSÃO ACENTUADA</p> <p>CORROSÃO UNIFORME</p> | <p>Os pontos prováveis da ocorrência da corrosão são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- pontos de acúmulo de umidade e impurezas;</li> <li>- contato chapas de aço perfis;</li> <li>- contato entre perfis;</li> <li>- corrosão dos perfis nos nós;</li> <li>- corrosão uniforme em chapas de aço e abas de perfis horizontais.</li> </ul> |
|                        |  <p>CORROSÃO LOCAL</p> <p>CORROSÃO NO CONTATO</p> <p>SEÇÃO A-A</p> <p>B-B</p> <p>C-C</p>  |   |

Tabela III.2- Localização da Corrosão

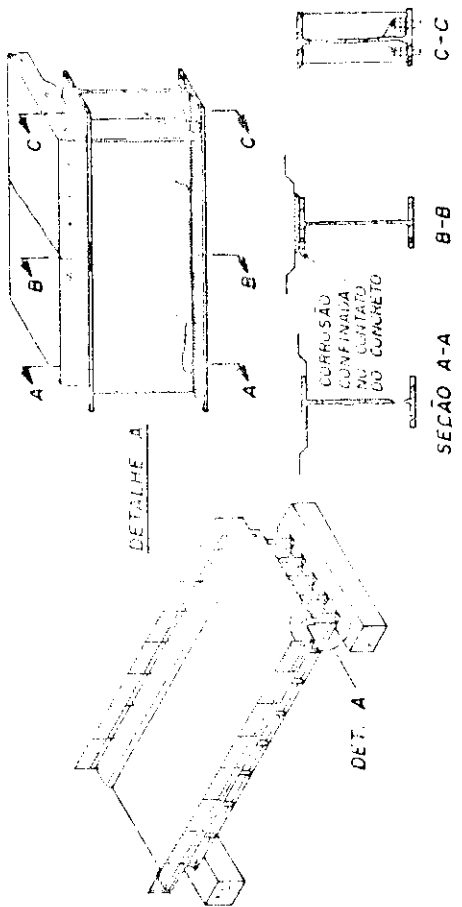
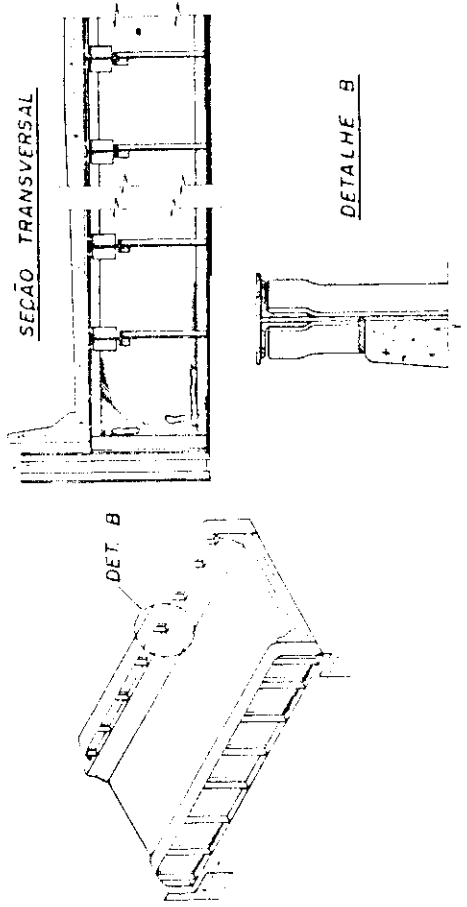
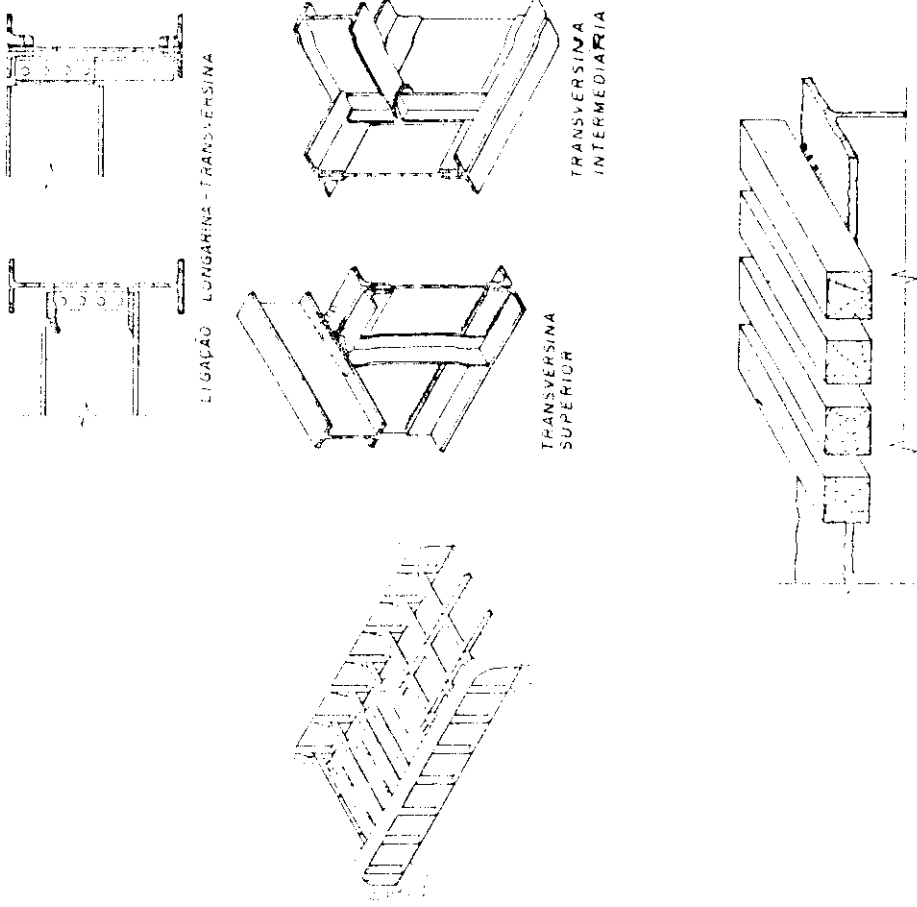
| DESCRIÇÃO DO ELEMENTO                                     | LOCALIZAÇÃO E TIPO DE CORRUSÃO MAIS PROVÁVEL   | COMENTÁRIOS GERAIS  |
|---|--|---|
| <p>Ponte com tabuleiro de concreto e vigas mistas</p>     |  <p>DET. A</p> <p>DET. B</p> <p>SEÇÃO A-A B-B C-C</p> <p>CORRUSÃO CONFINADA NO CONTATO DO CONCRETO</p> | <p>A localização dos pontos de corrosão em juntas de juntas e travessas e juntas está associado a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- pontos de acúmulo de umidade e sujeira;</li> <li>- pontos locais devido a umidade oriunda da fissuração do tabuleiro de concreto;</li> <li>- corrosão por pite na ligação da mesa inferior com a alma;</li> <li>- corrosão em fôrme geralmente nas juntas externas;</li> <li>- corrosão por espalhamento nas chapas que compõem as entranhas de cores;</li> <li>- corrosão por pite no contato concreto-viga de aço;</li> <li>- infiltração das chapas na vedação da caixa</li> </ul> |
| <p>Ponte com tabuleiro de concreto e vigas principais</p> |  <p>DET. B</p> <p>SEÇÃO TRANSVERSAL</p> <p>DETALHE B</p>  |   |

Tabela III.2- Localização da Corrosão

| DESCRIÇÃO DO ELEMENTO    | LOCALIZAÇÃO E TIPO DE CORROSÃO MAIS PROVÁVEL   | COMENTÁRIOS GERAIS   |
|--------------------------|--|--|
| <p>Ponte ferroviária</p> |  <p>LIGAÇÃO LONGARINA-TRANSVERSINA</p> <p>TRANSVERSINA SUPERIOR</p> <p>TRANSVERSINA INTERMEDIÁRIA</p> | <p>A localização dos pontos prováveis da corrosão em longarinas e transversinas estão associadas a pontos de acúmulo de umidade e limo etc.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- pontos localizados no contato do elemento longitudinal, na ligação com o por-pite, na ligação de inferior-alma,</li> <li>- corro são uniforme longitudinal e transversais,</li> <li>- corro são por pite mais cantoneiras de ligação longitudinal e transversais,</li> <li>- corro são no contato de cristas</li> </ul> |

### III.3- Afrouxamento de Ligações

As ligações em estruturas metálicas são um dos tópicos mais pesquisados em todo o mundo e no entanto existem muitas dúvidas que ainda demandam estudos. O afrouxamento de ligações parafusadas e rebitadas constitui um sério problema em pontes metálicas.

Nas estruturas fabricadas nos últimos trinta anos este problema tem sido evitado pela utilização da solda elétrica e de parafusos de alta resistência (trabalham com apertos controlados). Para as estruturas antigas este problema deve ser considerado e analisado.

As estruturas que utilizam rebites e parafusos quando submetidas a cargas móveis, e por consequência impactos e choques, estão sujeitas ao fenômeno do afrouxamento das ligações. Este fenômeno, em linhas gerais, conduz ao "deslizamento das ligações", causando deslocamentos e distorções nos elementos estruturais. Nos casos extremos ocorre a ruptura dos rebites ou parafusos.

O afrouxamento das ligações normalmente decorre da utilização da estrutura e seus efeitos são progressivos. A identificação deste tipo de problema exige grande experiência dos técnicos e engenheiros de manutenção.

Este tipo de deterioração provoca basicamente dois tipos de problemas nas estruturas:

- a) deformações excessivas;
- b) rupturas dos elementos que compõem a ligação.

Nas fotos III.13 e III.14 apresentam-se exemplos do relatado acima.



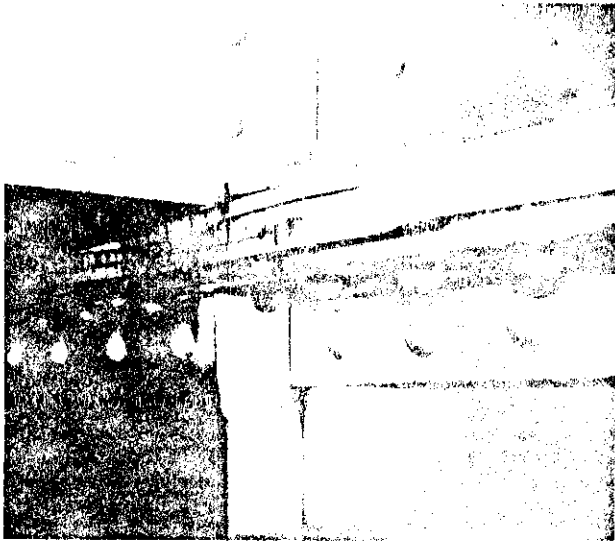


Foto III.13: Afrouxamento do rebite na ligação longarina-transversina de uma ponte ferroviária.



Foto III.14: Vista inferior do mesmo afrouxamento. Observa-se também a ruptura da cantoneira de enrigecimento.

### III.3.1- Identificação do Afrouxamento de Ligações

A dimensão deste problema pode ser avaliada com dados relativos à manutenção de pontes rodoviárias nos Estados Unidos - aproximadamente 800.000 rebites são substituídos a cada ano durante as manutenções periódicas.<sup>2</sup>

No Brasil não temos estatísticas da substituição de rebites e nem o número de pontes metálicas é tão significativo. Salienta-se, entretanto, que a maioria das pontes ferroviárias são anteriores a década de sessenta, construídas com estruturas metálicas rebitadas fazendo com que o afrouxamento de ligações deva ser considerado.

Para a verificação do afrouxamento das ligações não existem regras rígidas ou procedimentos padrões para orientar a inspeção dos parafusos e rebites. Recomenda-se,

<sup>2</sup>

Ruble, F. J.: "Symposium on High Strength Bolts"-part II, Engineering Conference, AISC.

porém, que inspeções de rebites e parafusos sejam realizadas por amostragem, procurando verificar as ligações mais sensíveis às cargas móveis em cada estrutura.

O sistema de inspeção de rebites é normalmente realizado utilizando um martelo e a experiência do operador detectará o afrouxamento pelo som emitido pelos rebites ao serem martelados. Há diferenças entre os rebites "frouxos" e os íntactos.

### III.3.2- Alguns Exemplos do Afrouxamento de Ligações

O problema do afrouxamento das ligações, como já descrito anteriormente, decorre da ação das cargas móveis. É um problema característico de estruturas com tais solicitações e em particular as pontes rodoviárias e ferroviárias. As consequências para as estruturas dependem muito de como, onde e com que grau o afrouxamento de rebites ou parafusos ocorre. É extremamente difícil prever as consequências de tal problema, como também estabelecer genericamente critérios corretivos destinados a evitar sua ocorrência.

A principal consequência do afrouxamento de ligações consiste na redistribuição das deformações na ligação afetada, o que pode ocasionar grandes deslocamentos e, em situações extremas, conduzir à ruína da ligação.

O aparecimento de deslocamentos excessivos, dependendo do elemento estrutural, altera significativamente o comportamento de toda a estrutura.

Um exemplo simples para ilustrar esta situação é o caso de uma longarina dimensionada como viga contínua e apoiada nas transversinas. O afrouxamento da ligação, que garante esta continuidade, irá alterar o esquema estático previsto no cálculo, com acréscimos significativos no momento fletor positivo. As deformações provenientes deste acréscimo do momento fletor poderão conduzir esta longarina à ruína.

Uma das maiores dificuldades na manutenção de pontes

rebitadas consiste exatamente na substituição de rebites.

As fotos apresentadas a seguir ilustram uma rebitagem.



*Foto III.15: Posicionamento dos equipamentos necessários para o aquecimento dos rebites.*

*Foto III.16: Rebitagem da mesa inferior de uma vigapositionado o encontrador e o martetele. Em função do espaço disponível esta operação é muito difícil.*

As condições de trabalho, posicionamento dos equipamentos e condições de acesso ao local de rebitagem constituem problemas a serem resolvidos. A não interrupção do tráfego sobre a ponte, nos trabalhos de recuperação, dificulta ainda mais a substituição de rebites.

Algumas vezes, os problemas relativos ao afrouxamento de ligações tem origem na própria execução da estrutura ou em recuperações posteriores.

Podemos identificar alguns destes problemas em pontes rebitadas e parafusadas. A Figura III.1 ilustra alguns exemplos.

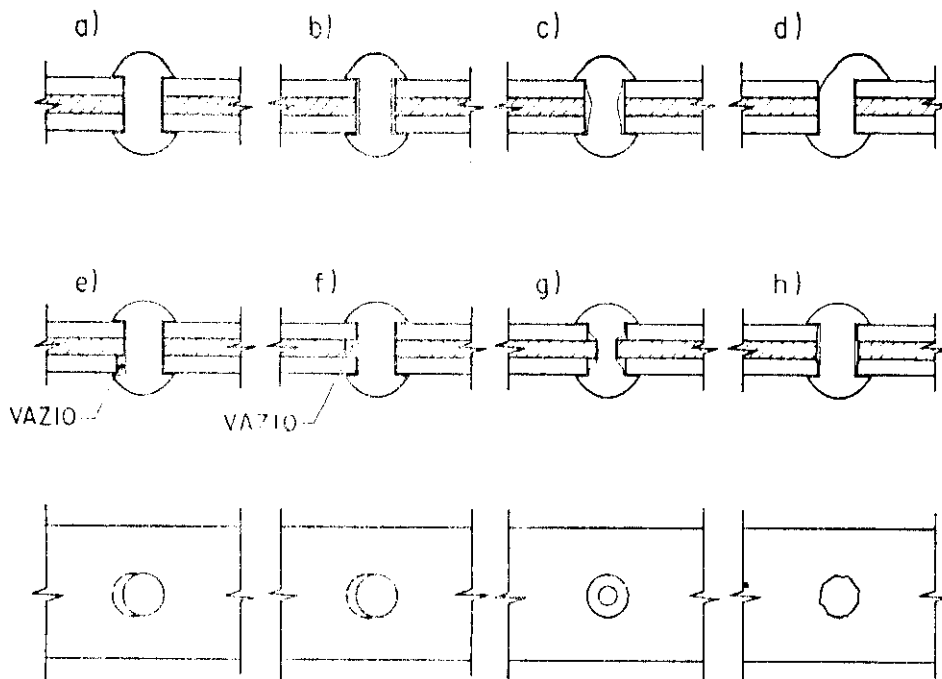


Figura III.1 - Defeitos observados em rebites

Comentários dos defeitos em rebites da Figura III.1:

Figura III.1-a: rebite bem executado e chapas devidamente ajustadas;

Figura III.1-b: folga entre o rebite e as chapas.

Causas prováveis: diâmetro do rebite incompatível ou má rebitagem.

Consequências: deslocamento entre as chapas, inclinação do rebite, sensibilidade maior da ligação à fadiga.

Defeito: detectado através de inspeção utilizando martelo.

Figura III.1-c: folga parcial entre o rebite e as chapas.

Causas prováveis: rebitagem mal executada, aquecimento não adequado.

Consequências: deslocamento entre chapas, concentração de tensões; ruptura por cisalhamento.

Defeito: só detectado se a cabeça estiver frouxa.

Figura III.1-d: cabeça do rebite defeituosa.

Causa provável: má rebitagem.

Consequências: deslocamento relativo da chapa superior, concentração de tensões.

Defeito: facilmente detectado por inspeção visual.

Figura III.1-e: vazio parcial entre a chapa e o rebite.

Causas prováveis: erro na furação (fabricação) ou não execução da refuração (recuperação).

Consequências: concentração de tensões, deslocamento da parte inferior do fuste, ruptura do rebite.

Defeito: difícil de ser detectado em inspeções.

Figura III.1-f: idem (e).

Figura III.1-g: variação do diâmetro do fuste.

Causas prováveis: erro de furação (fabricação) ou não execução da refuração no campo (recuperação).

Consequências: concentração de tensões, ruptura do rebite.

Defeito: difícil de ser detectado, somente sendo possível em caso de substituição.

Figura III.1-h: bordas dos furos das chapas com rugosidades.

Causas prováveis: má execução da furação (fabricação), não execução da refuração (recuperação).

Consequência: concentração de tensões.

Defeito: só identificável na substituição do rebite.

Como pode ser observado nas descrições acima apresentadas, a deterioração afrouxamento das ligações tem várias causas. As consequências vão desde um simples deslizamento de chapas até a ruína de uma ligação ou mesmo da estrutura.

As fotos III.17 a III.20 ilustram alguns casos observados em pontes.

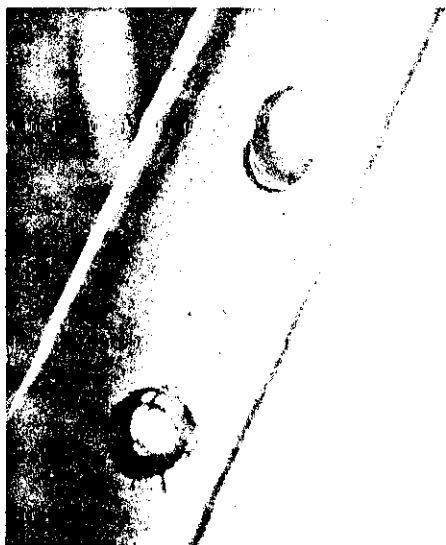


Foto III.17: Exemplo de má execução da cabeça de um rebite.

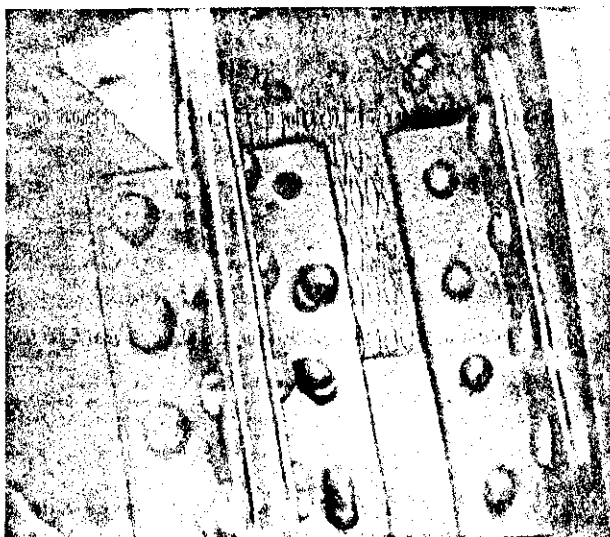


Foto III.18: Rebitagem com diâmetro do rebite incorreto, ausência de rebites. O deslocamento da ligação está evidente.

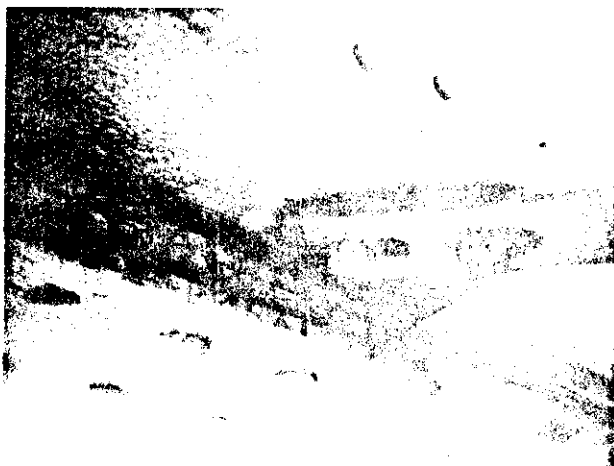


Foto III.19: Barra do contraventamento rebitada com furos alongados. Escoamento da barra e rasgamento da extremidade. Nota-se ausência de rebite na longarina.

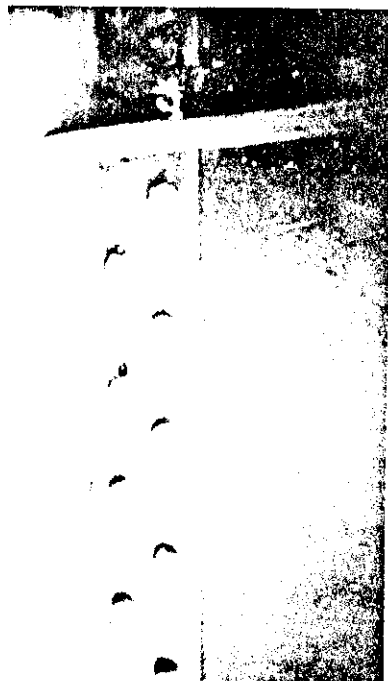


Foto III.20: Nervura vertical de uma viga com erros de furação.

### III.4- Danos Estruturais devido ao Impacto de Objetos ou Veículos

As estruturas metálicas são constituídas de perfis normalmente esbeltos e o impacto de objetos ou veículos podem causar danos consideráveis aos elementos estruturais.

A deterioração por impacto, necessita de um agente externo móvel e provoca, geralmente, abaulamentos e deformações plásticas localizadas nos elementos estruturais.

As pontes e os edifícios industriais são as estruturas mais comumente sujeitas a este tipo de problema.

Os casos mais frequentes destes danos são devido a: acidentes sobre pontes, choques de veículos em colunas, danos em diagonais ou montantes devido a carga transportada em vagões ou caminhões, danos em vigas principais causadas por caminhões com altura superior ao gabarito vertical, danos em pilares devido a colisão de veículos ou navios (no caso de pontes marítimas, fluviais ou lacustres), etc.

A descrição de casos de danos estruturais provocados por veículos ou cargas seria extremamente extensa dada a frequência com que tal fato ocorre.

O pessoal técnico da RFFSA costuma dizer que não existe nada melhor para um acidente do que o transporte de cargas sem a devida fixação. Neste caso o transporte de trilhos é a "maior" causa de acidentes e danos estruturais nos elementos das pontes ferroviárias.

Apresentam-se algumas fotos que exemplificam o problema nos quais os danos causados podem ser visualizados.

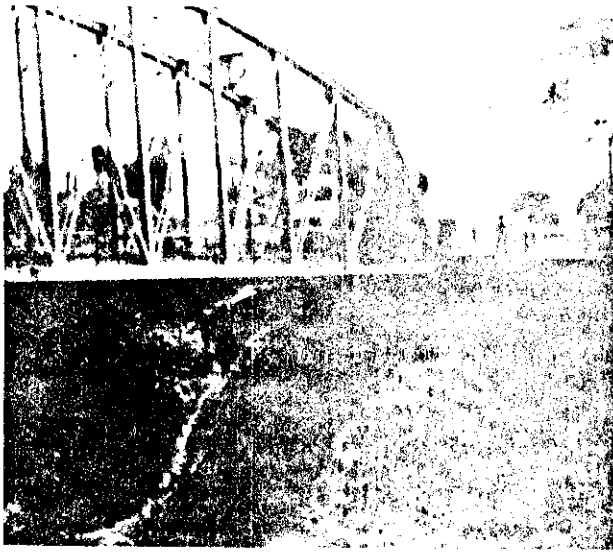


Foto III.21: Ponte ferroviária adaptada para o tráfego rodoviário. O gabarito do pórtico de entrada da ponte limita o transporte de cana de açúcar.

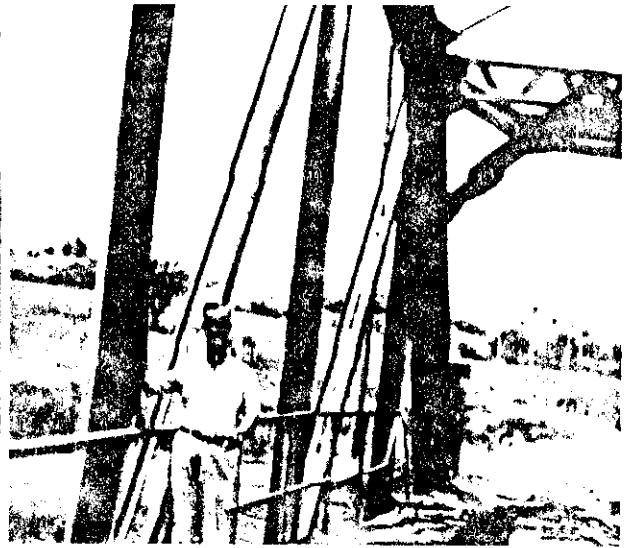


Foto III.22: Consequências do choque de um veículo no montante da ponte.

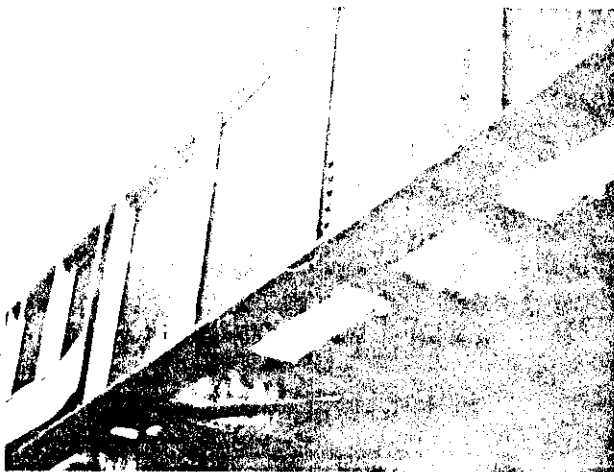


Foto III.23: Danos causados na mesa inferior da viga principal de uma ponte devido ao choque de veículos com "sobrealtura"; o gabarito desta ponte é de 3,70m.

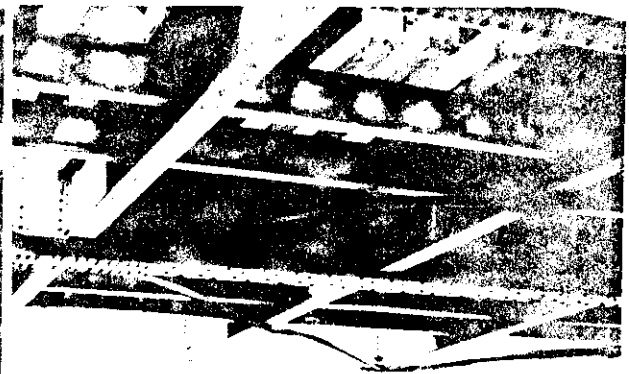


Foto III.24: Danos causados no sistema de contraventamento e longarinas. (Ponte Preta Curitiba-PR).





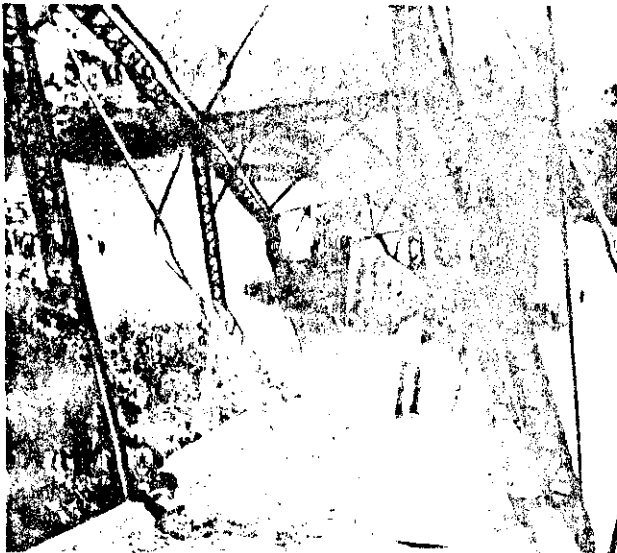
*Foto III.25: Danos causados em um enrijecedor (bracket) provavelmente causado pelo desprendimento de parte da carga numa ponte ferroviária.*



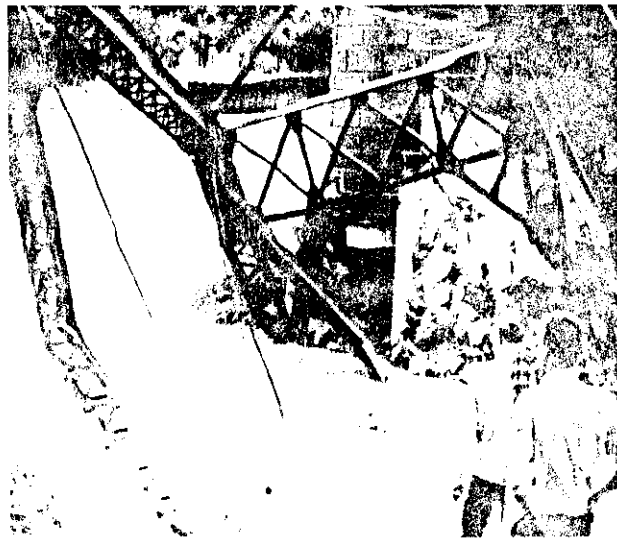
*Foto III.26: Danos causados nos dormentes devido a um descarrilhamento. Não é raro os descarrilamentos atingirem também elementos estruturais das pontes (Curitiba-Paranaguá)*

Os danos estruturais por impacto de veículos podem provocar a ruína da estrutura. Existem vários exemplos de acidentes com estas consequências.

As fotos III.27 e III.28 apresentam a ruína de uma antiga ponte ferroviária adaptada para tráfego rodoviário. Segundo informações coletadas com moradores da região, esta ponte com dois tramos ( $\approx 66,0\text{m} + 25,0\text{m}$ ) ruíu alguns dias após o impacto de um trator sobre o montante de apoio no pilar central. Ocorreu, provavelmente, o deslocamento do apoio sobre o pilar e após alguns dias, em uma madrugada muito fria, a ponte ruíu.



*Foto III.27: Vista geral da ponte após a ruína. A tese do deslocamento dos apoios sobre o pilar é confirmada pela posição da ponte.*



*Foto III.28: Detalhe da ruína de um montante.*

#### III.4.1- Constatação dos Danos por Impacto e Cuidados

Muitas vezes a identificação do problema causado pelo impacto de veículos ou objetos é simples pois a existência do agente causador e a imediata identificação do problema solucionam as causas da deterioração.

Em outras ocasiões, constata-se abaulamentos devido ao impacto de objetos que podem ser confundidos com o fenômeno da perda de estabilidade de um elemento estrutural que, obviamente, tem outras causas.

Os cuidados a serem tomados quanto a este tipo de deterioração baseiam-se na extensão do problema constatado e na importância estrutural do elemento afetado.

A inspeção preliminar dos danos causados constitui o primeiro e o principal passo a ser realizado após um acidente. Esta inspeção deve ser feita por engenheiros devidamente qualificados e experientes. As decisões a serem tomadas envolvem não só a segurança da ponte como os riscos inerentes a tal situação.

Quando os danos causados são severos, o engenheiro deverá, baseado na sua experiência e nos dados observados, determinar as primeiras providências:

- interrupção do tráfego quando a segurança da obra e dos usuários assim o exigir;

- tráfego restrito quanto à velocidade ou tonelagem;

- operação sem restrições quando os danos forem em elementos secundários ou não estruturais.

A extensão do problema deve ser avaliada para posterior solução; abaixo apresentam-se os principais pontos a serem observados:

- barras tracionadas: observação de trincas no elemento, rupturas de elementos de ligação, plastificação localizada;

- barras comprimidas: observação da linearidade da barra, considerando a possibilidade de perda de estabilidade, integridade das ligações, efeitos localizados;

- barras do sistema de contraventamento: observação da existência de fraturas localizadas, deformações excessivas associadas ou não a plastificações localizadas;

- longarinas e transversinas: verificação da linearidade, ruptura de soldas (perfis soldados), ruptura de rebites (perfis compostos rebitados), empenamento da seção transversal, plastificação no local do impacto e nas seções próximas aos apoios.

Os reparos dos danos provocados por impacto devem ser realizados no menor prazo possível. Existe a possibilidade do agravamento do problema tendo em vista o comportamento anormal da estrutura. As soluções para os problemas, evidentemente, dependem da extensão dos danos causados e a discussão da forma de execução dos reparos está associada ao tipo de elemento afetado. Abaixo estão listados os principais métodos de reparos:

- retificação por aquecimento;

- retificação mecânica a frio;

- retificação mecânica a quente;

- substituição de partes do elemento comprometido;
- substituição do elemento;
- reforço localizado, utilizando solda elétrica, parafusos ou rebites, dependendo do tipo de elemento de ligação da estrutura;
- soldagem, dependendo da soldabilidade do aço;
- substituição de parte da estrutura;

É interessante ressaltar que as soluções técnicas a serem adotadas na recuperação de um dano estão associadas ao levantamento dos custos, ou seja, uma criteriosa análise custo-benefício.

Os tópicos relativos à previsão de despesas envolvidas num reparo são particulares para cada caso, porém, alguns itens a serem observados estão abaixo relacionados:

a)despesas diretas:

- custo do material a ser empregado na recuperação;
- mão-de-obra direta envolvida;
- custos da equipe de fiscalização;
- equipamentos mobilizados para a execução do reforço;

b)despesas indiretas:

- interrupção total ou parcial da ponte e os respectivos custos;
- redução de velocidade (principalmente em pontes ferroviárias);
- clima da região na época do reparo;

### III.5 - Aparelhos de Apoio e Fundações

A deterioração dos aparelhos de apoio e fundações foram incorporadas num único item. A análise dos problemas que podem surgir nestes dois elementos das pontes demonstra estarem muitas vezes inter-relacionados.

É necessário ressaltar que o comportamento de toda a infraestrutura (fundação, pilares e encontros), é interdependente. Muitas vezes o problema num aparelho de apoio pode ter como causa um recalque de um pilar.

Nos itens seguintes procura-se relatar os principais problemas gerados por este tipo de deterioração.

### III.5.1- Fundações

Os problemas que podem ocorrer nas fundações de pontes provem basicamente da deterioração dos elementos que a compõem (blocos, estacas, etc.) e do solo (ruptura parcial, recalques, etc.).

Para cada tipo de fundação a deterioração estará relacionada com os materiais utilizados. Relaciona-se abaixo o tipo de fundação e os principais tipos de deterioração:

a) fundação em pedra talhada (pedra de mão):

- deterioração da argamassa de rejuntamento;
- erosão associada ao desprendimento das pedras externas (fundações diretas);
- infiltração de água interna ao bloco, associado a lixiviação da argamassa;
- infiltração de raízes de plantas e posterior deslocamento das pedras;

b) estacas:

b.1) madeira:

- processo de degeneração da madeira na região sujeita a ciclos de secagem e umidecimento;
- ataque de fungos e outros parasitas;
- ataque de animais;

b.2) concreto:

- deterioração do concreto devido a presença de sulfatos;
- corrosão da armadura;
- abrasão do concreto devido, por exemplo, a estacas e blocos submersos em rios com grande quantidade de areia em suspensão associado a velocidade de percolação da água;

b.3)metálicas:

-corrosão da estaca;

-abrasão em estacas submersas associada a velocidade de percolação da água e material em suspensão.

c)fundação em sapata direta:

-deterioração característica do material empregado (concreto, pedra), já relatado anteriormente.

Os problemas que ocorrem devido ao solo estão diretamente relacionados com a sua movimentação. Pode-se caracterizar basicamente os recalques, a ruptura do solo e a erosão:

a)recalques: a movimentação do solo sobre a fundação por adensamento diferencial poderá produzir recalques diferenciais. A amplitude destes recalques pode afetar pilares, encontros ou a superestrutura.

Como principais consequências destes recalques pode-se enumerar:

-fissuração de pilares (principalmente pilares paredes);

-desnivelamento da ponte (transversal ou longitudinal);

-introdução de esforços não considerados no cálculo (estruturas hiperestáticas);

-em casos limites, a ruína da ponte.

b)ruptura do solo: a ruptura do solo fica caracterizada pelo deslocamento relativo, em forma de cunha, de parte do solo sobre uma fundação direta ou um encontro.

Principais consequências desta ruptura:

-deslocamentos de todo o conjunto fundação-pilar associada a uma rotação deste conjunto como corpo rígido.

-desnivelamento e deslocamento de toda a super estrutura;

-a progressividade é a característica principal deste tipo de problema;

-pode levar toda a estrutura da ponte a ruína.

c) erosão: a erosão do solo sobre uma fundação é causada basicamente pela presença da água associada a velocidade de percolação. Este fenômeno está associado a vários fatores geológicos e hidráulicos não sendo objeto deste trabalho detalhar.

É interessante ressaltar dois tipos de ocorrência de erosão que são decorrentes do próprio projeto ou dos procedimentos de execução da recuperação de pontes:

-durante os trabalhos de recuperação é comum a utilização de andaimes, formas, etc. Se estes não forem retirados do leito do rio poderão alterar seu curso favorecendo a erosão. A diminuição da calha natural do rio pode provocar, em caso de enchentes, até a total destruição da ponte com a água atingindo a superestrutura;

-a relocação de uma ponte sem um estudo hídrico pode também favorecer a erosão pois a tendência de um rio é voltar ao seu leito normal.

As fotos III.29 e III.30` ilustram estes dois aspectos.

As fotos III.31 e III.32 ilustram dois tipos de deterioração. Um encontro de pedra está comprometido pela presença de vegetação. As raízes penetram nas juntas das pedras iniciando o processo de deterioração da argamassa de assentamento. Na segunda foto pode-se observar um chumbador em estado avançado de corrosão devido a eliminação do revestimento. É visível a deterioração da argamassa de regularização sobre a chapa do apoio.

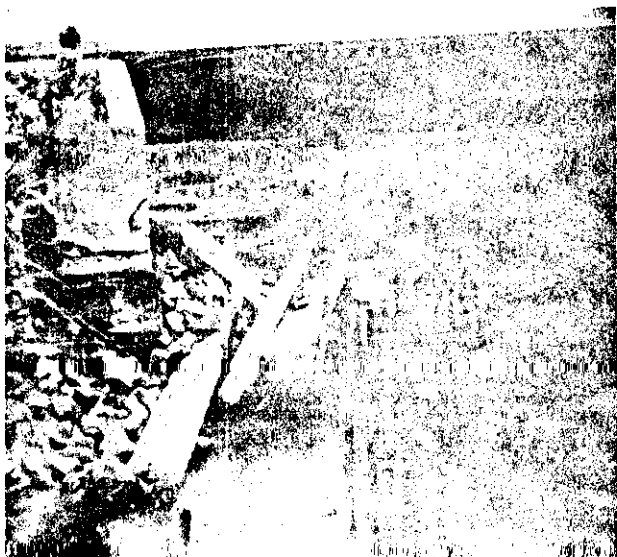


Foto III.29: Detalhe de cantos sobre uma ponte recuperada. Detalhe do encontro já com indícios de erosão.

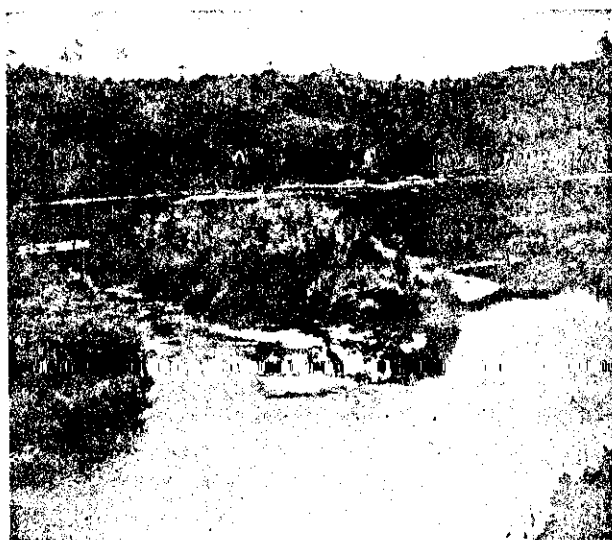


Foto III.30: Alteração ao curso natural do rio. Provavelmente em uma enchente o rio tenderá a voltar ao leito normal.



Foto III.31: Encontro de pedra comprometido devido à presença de vegetação.



Foto III.32: Deterioração do concreto de cobrimento do chumbador e sobre as placas de apoio. Corrosão acentuada do chumbador.



### III.5.2- Aparelhos de Apoio

A ligação da superestrutura com pilares e encontros de uma ponte é feita normalmente por aparelhos de apoio. A função principal destes elementos é transmitir os esforços para pilares e fundações e principalmente reproduzir as condições das vinculações adotadas teoricamente.

Apoios fixos e móveis são detalhados de tal modo a reproduzir o tipo de comportamento inicialmente previsto. A Figura III.2 apresenta alguns dos principais tipos de apoios utilizados nas pontes mais antigas.

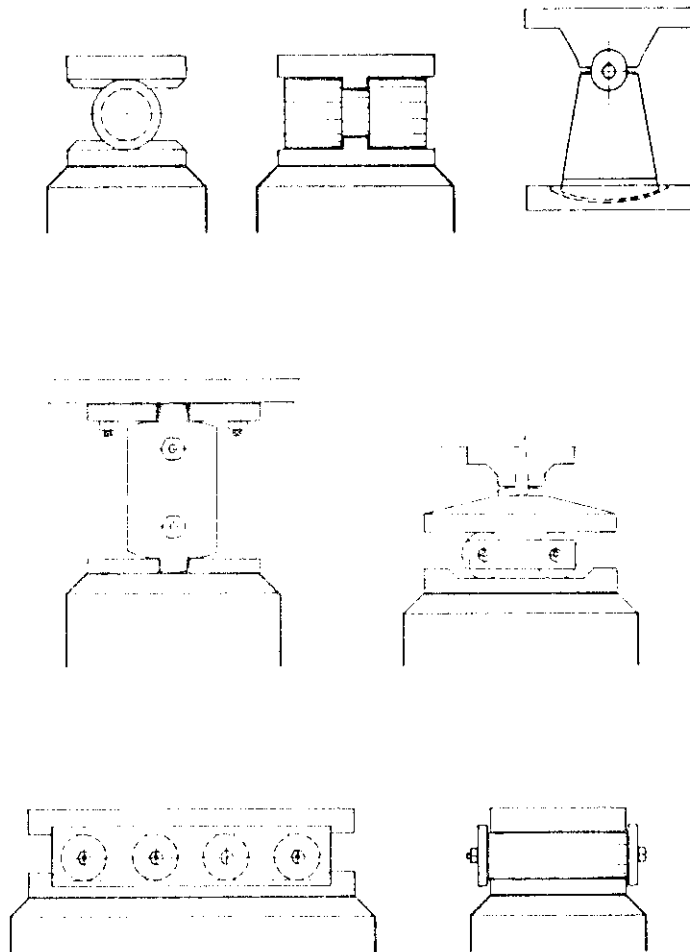


Figura III.2- Exemplos de apoios utilizados em pontes antigas

Exemplifica-se, a seguir, alguns tipos de deterioração de apoios:

a) Presença de sujeira e detritos:

-impedimento de deslocamento horizontal em apoios móveis;

-impedimento ao giro em apoios fixos e móveis;

-favorecimento da corrosão de chapas do apoio, roletes e chumbadores;

Consequências:

-alteração do esquema estático considerado;

-introdução de esforços, algumas vezes significativos, não considerados no cálculo;

b) Movimentação de pilares ou encontros:

-deslocamentos horizontais dos aparelhos de apoio;

-rotação acentuada dos aparelhos de apoio fixos e móveis;

-desnívelamento entre tramos da ponte;

-desalinhamento entre tramos da ponte;

Consequências:

-introdução de esforços não considerados no cálculo provenientes da alteração do ponto de reação na superestrutura;

-concentrações de tensões e plastificações localizadas;

-aumento do efeito do impacto;

-em casos extremos, ruína da ponte.

As fotos, apresentadas a seguir, ilustram alguns destes tipos de deterioração.



Foto III.33: Aparelho de apoio móvel comprometido pela sujeira e detritos. Corrosão acentuada.

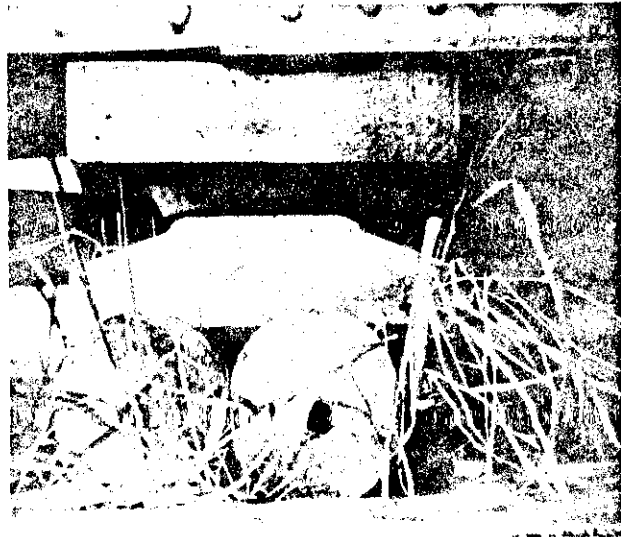


Foto III.34: Aparelho de apoio móvel (roletes) com alteração no ponto de reação e rotação acentuada.



Foto III.35: Deslocamento horizontal do apoio. Flastificação dos chumbadores.

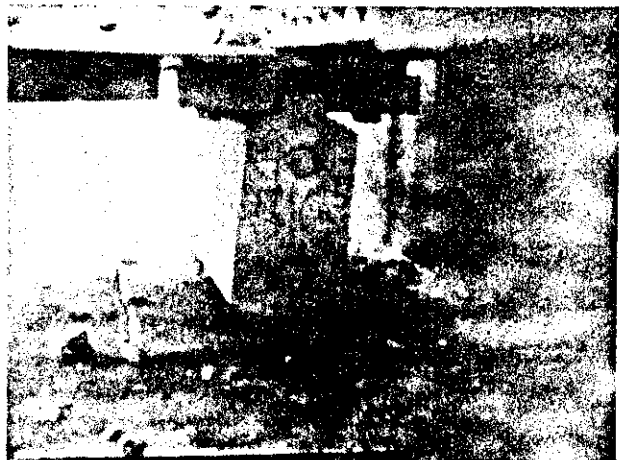


Foto III.36: Apoio pendular com deslocamento excessivo. Notar ausência de verticalidade e o contato da chapa de apoio com o pêndulo.



*Foto III.37: Rotação acentuada de apoio pendular. O pêndulo está totalmente fora de posição.*

### III.6- Má Conservação das Vias

A deterioração das pontes pode ser causada pela utilização inadequada. Pode-se citar os casos mais frequentes de sobrecargas excessivas em pontes rodoviárias e má conservação da via em pontes ferroviárias.

Sobrecargas excessivas podem provocar:

- deslocamentos nos elementos estruturais acima do projetado;
- aumento significativo nas solicitações dos elementos estruturais;
- deterioração de aparelhos de apoio;
- em casos extremos, ruína da estrutura.

Má conservação das vias em pontes ferroviárias podem provocar:

- aumento significativo nas forças geradas pelo impacto (o coeficiente de impacto adotado nas normas técnicas

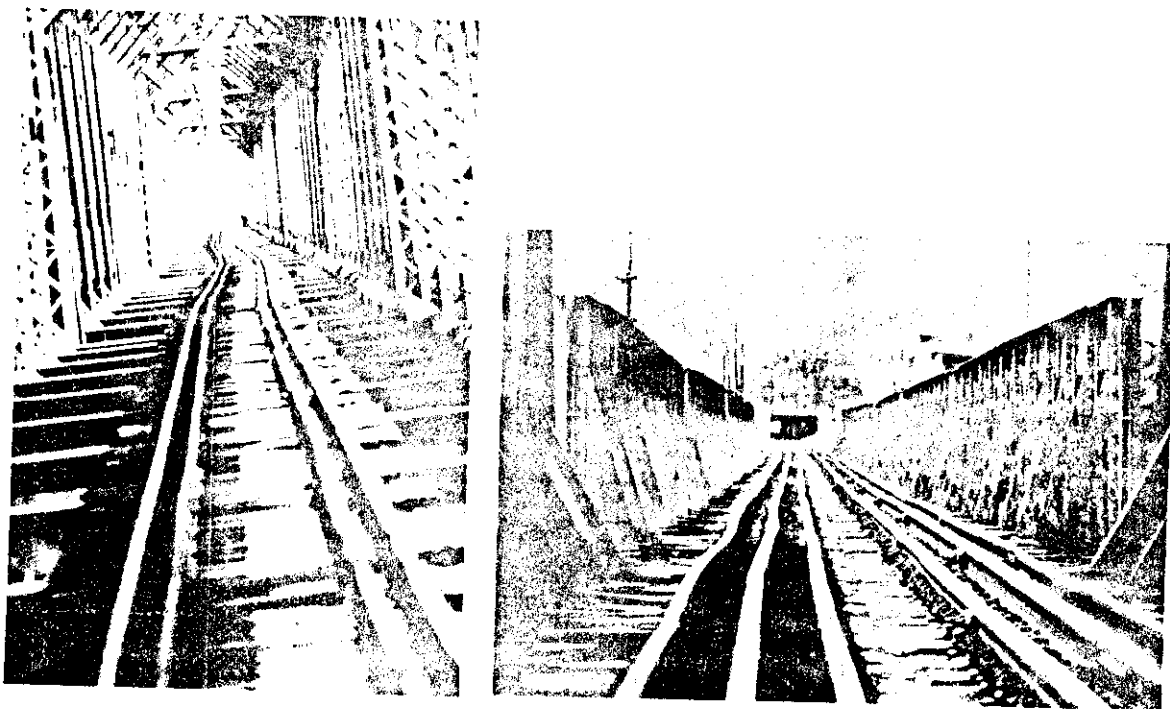
pressupõem que as linhas e trilhos mantêm linearidade e bitola);

-deslocamento da superestrutura proveniente de forças transversais não consideradas no cálculo;

-concentração de tensões devido a má distribuição das forças verticais em função do comprometimento dos dormentes;

-aparecimento de tensões não previstas no cálculo (por exemplo, dormentes apoiados na extremidade da mesa de uma longarina provocando torção).

As fotos III.38 e III.39 ilustram exemplos do desalinhamento de uma via ferroviária.



*Foto III.38 e 39: Desalinhamento dos trilhos sobre pontes.*

### III.7- Fadiga

Pode-se definir a fadiga como o fenômeno que vários materiais apresentam, quando submetidos a carregamentos cíclicos, de romperem com tensões menores que a tensão de ruptura.

Nos aços, a fadiga é caracterizada pelo aparecimento e propagação de fissuras que, dependendo do elemento comprometido, pode conduzir uma ponte à ruína.

A fadiga não deve ser caracterizada somente como uma deterioração mas sim como um estado limite do próprio material e, evidentemente, considerado no projeto.

São vários os fatores que determinam o aparecimento deste estado limite. Nas pontes existentes os procedimentos de inspeção devem considerar a possibilidade da ocorrência deste fenômeno.

Baseado na afirmação acima a fadiga foi incluída, neste trabalho, como um tipo de deterioração de estruturas ou seja, como uma consequência da utilização das pontes. A ocorrência da fadiga está correlacionada com a vida útil da ponte e exige um exame cuidadoso por parte dos engenheiros responsáveis pela manutenção.

Enfatiza-se como detectar sua ocorrência e são apresentados alguns exemplos. Não é objetivo deste trabalho um aprofundamento sobre este tema que é bastante complexo e exigiria um desenvolvimento diferente do aqui apresentado. No entanto deve-se ressaltar a importância do tema com relação a segurança e a integridade de uma ponte.

### III.7.1- Principais Fatores que Propiciam o Surgimento da Fadiga:

Pode-se dizer que os principais fatores que determinam a vida útil à fadiga em pontes são:

#### a) Características geométricas:

As características geométricas irão determinar se, onde e como as fraturas devido à fadiga ocorrerão. Entre estes fatores incluem-se: vãos, distância entre elementos, orientação das tensões nos elementos de ligação, geometria dos nós, concentração de tensões, descontinuidade em soldas, corrosão, etc.

#### b) Amplitude das tensões existentes nos elementos:

A amplitude das tensões e o número de ciclos a que a

ponte foi submetida são os principais fatores a considerar na análise da fadiga. Ressalta-se a influência das tensões residuais nos elementos e ligações, e evidentemente, os efeitos dinâmicos sobre a estrutura, provocados pelos carregamentos.

c) Corrosão:

A presença da corrosão causa concentrações de tensões o que favorece o aparecimento da fadiga em elementos e ligações. A vida útil à fadiga pode estar correlacionada com a ocorrência da corrosão.

d) Propriedade dos materiais empregados na ponte:

As propriedades dos materiais empregados têm grande importância no fenômeno da fadiga e conseqüentemente na vida útil de uma ponte.

Entre as principais propriedades dos aços pode-se citar: o comportamento tensão-deformação, dureza, composição química, homogeneidade, descontinuidade micro ou macro estrutural, etc.

e) Tipo de utilização da ponte:

A vida útil à fadiga está também relacionada ao tipo de carregamento (rodoviário ou ferroviário) que influencia o aparecimento dos efeitos da fadiga. A maneira com que as ações dinâmicas são "absorvidas" e o grau de "amortecimento" da estrutura são os principais fatores a serem considerados.

Pode-se afirmar genericamente que as estruturas que possuem alguns mecanismos ou elementos que favoreçam o amortecimento dos efeitos dinâmicos apresentam uma vida útil maior.

Mesmo com a descrição sucinta dos principais fatores que afetam o fenômeno da fadiga pode-se concluir que existem diferentes combinações possíveis destes fatores. Estas possíveis combinações acarretam um maior grau de dificuldade na identificação dos locais de possível ocorrência da fadiga. A determinação real das tensões atuantes em cada elemento ou ligação de uma ponte também é um fator a considerar.

Para a fadiga deve-se então considerar duas situações:

- a) Projetos de novas pontes: adequação de materiais, detalhes, amplitude das tensões, cuidados na montagem para que a vida útil à fadiga seja, pelo menos, a prevista no cálculo.
- b) Pontes existentes: inspeções periódicas, manutenções preventivas, pinturas para que a vida útil seja ampliada. Nos casos de identificação da ocorrência da fadiga é necessário um estudo completo do problema, a eliminação da fratura e a estimativa da vida útil restante dos demais elementos da ponte deteriorada.

### III.7.2- Aspectos Gerais sobre Recomendações das Normas Técnicas:

A resistência à fadiga de uma estrutura de aço é inversamente proporcional ao número de ciclos a que está submetida. Os ensaios de laboratório e a experiência da observação de pontes existentes permitem concluir que existe uma resistência limite à fadiga.

O gráfico apresentado na Figura III.3 ilustra os resultados de corpos de prova solicitados a força axial. O aço utilizado nestes corpos de prova é o ASTM A-514 com tensão de escoamento igual a  $70,3 \text{ kN/cm}^2$  e tensão de ruptura à tração de  $83,9 \text{ kN/cm}^2$ .

Foram realizados ensaios nos Estados Unidos com três características de solicitação, sendo as curvas da figura apresentam os seguintes padrões de carregamento:

- (a) amplitude da solicitação: zero à tensão de tração de ensaio;
- (b) amplitude da solicitação: compressão (limitado a metade da tensão de tração) e à tensão de tração de ensaio;
- (c) amplitude da solicitação: reversão total de tensões, tensão de compressão a tensão de tração de ensaio.



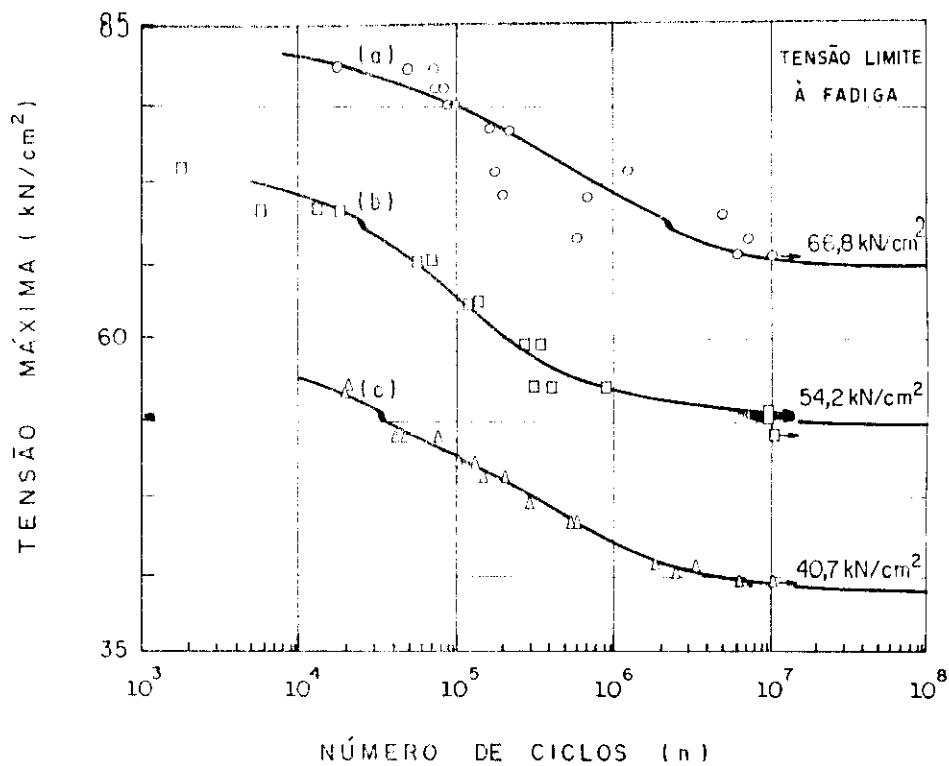


Figura III.3- Exemplos do comportamento à fadiga de corpos de prova submetidos a força axial

As curvas apresentadas no gráfico acima, ilustram não só a existência da tensão limite à fadiga (tensão limite praticamente independente do aumento no número de ciclos) bem como a influência da amplitude das tensões.

A principal referência utilizada quase no mundo todo para o tema fadiga é a norma americana para pontes rodoviárias da AASTHO.<sup>3</sup>

Esta norma estabelece categorias de elementos e detalhes em função da maior ou menor probabilidade de ocorrência da fadiga. Estabelece limites para a amplitude máxima das tensões a que este elemento ou ligação poderá ser submetido em função do número previsto de ciclos.

As Tabelas III.3 e III.4 reproduzem a amplitude das tensões à fadiga considerando o número de ciclos e o tipo de elemento.

<sup>3</sup> AASTHO. Standard specifications for highway bridges, 1981 Interim specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials.

TABELA III.3 - AMPLITUDE DAS TENSÕES À FADIGA

| ESTRUTURAS COM REDUNDÂNCIA  |  |                   |                     |                                |
|-----------------------------|--|-------------------|---------------------|--------------------------------|
| CATEGORIA<br>DO<br>ELEMENTO | AMPLITUDE DA TENSÕES (kN/cm <sup>2</sup> ) |                   |                     |                                |
|                             | 100.000<br>ciclos                          | 500.000<br>ciclos | 2.000.000<br>ciclos | mais de<br>2.000.000<br>ciclos |
| A                           | 42,2                                       | 25,3              | 16,8                | 16,8                           |
| B                           | 31,6                                       | 19,3              | 12,6                | 11,2                           |
| C                           | 22,5                                       | 13,4              | 9,1                 | 7,0                            |
| D                           | 18,9                                       | 11,2              | 7,0                 | 4,9                            |
| E                           | 14,7                                       | 8,8               | 5,6                 | 3,5                            |
| E'                          | 11,3                                       | 6,6               | 4,1                 | 1,8                            |
| F                           | 10,5                                       | 8,4               | 6,3                 | 5,6                            |

TABELA III.4 - AMPLITUDE DAS TENSÕES À FADIGA

| ESTRUTURAS SEM REDUNDÂNCIA  |  |                   |                     |                                |
|-----------------------------|--|-------------------|---------------------|--------------------------------|
| CATEGORIA<br>DO<br>ELEMENTO | AMPLITUDE DA TENSÕES (kN/cm <sup>2</sup> ) |                   |                     |                                |
|                             | 100.000<br>ciclos                          | 500.000<br>ciclos | 2.000.000<br>ciclos | mais de<br>2.000.000<br>ciclos |
| A                           | 25,3                                       | 16,8              | 16,8                | 16,8                           |
| B                           | 19,3                                       | 12,6              | 11,2                | 11,2                           |
| C                           | 13,4                                       | 9,1               | 7,0                 | 6,3                            |
| D                           | 11,2                                       | 7,0               | 4,9                 | 3,5                            |
| E                           | 8,8  | 5,6               | 3,5                 | 1,8                            |
| E'                          | 8,4  | 6,3               | 5,6                 | 4,9                            |
| F                           | 10,5                                       | 8,4               | 6,3                 | 5,6                            |

Nota: 1) Estruturas com redundância são aquelas em que a fratura de um elemento não conduz à ruína da estrutura.

2) A amplitude é definida como a diferença algébrica entre as tensões máximas e mínimas.

A norma americana apresenta também uma relação dos elementos e tipos de solda associados a cada categoria, bem como, a previsão do número de ciclos em função do tipo de elemento e do tipo da ponte e sua utilização.

A fadiga em estruturas rebitadas, independentemente do tipo de detalhe ou elemento, está enquadrada na Categoria D. Estudos recentes, no entanto, [(Fischer (1990), Reensnyder (1975), Brühwiler et ali (1990))] têm concluído que a Categoria C melhor condiz com as estruturas rebitadas. A ocorrência da fadiga em estruturas rebitadas tem demonstrado ser menos crítica do que em estruturas soldadas, pois a redundância interna e a possibilidade de redistribuição das tensões justificam esta afirmação.

É interessante ressaltar que as verificações da fadiga consideram as tensões resultantes das ações de serviço, mesmo quando o dimensionamento é realizado pelo método dos estados limites.

### III.7.3- Exemplos da Ocorrência da Fadiga

Apresentam-se alguns exemplos da ocorrência da fadiga em pontes.

As fotos III.40 e III.41 ilustram a ocorrência da fadiga na ligação longarina-transversina. Na primeira foto, a fratura devido à fadiga ocorre na cantoneira de ligação. Observa-se que, após a ruptura, a longarina ficou apoiada sobre a mesa inferior da transversina.

Na foto III.41, a fratura ocorreu na alma da transversina pois a cantoneira de ligação tem maior seção e rigidez. É possível visualizar o "caminhamento" da fratura, que iniciou no contato alma-cantoneira e, após o término desta, prosseguiu inclinada de aproximadamente 45°.

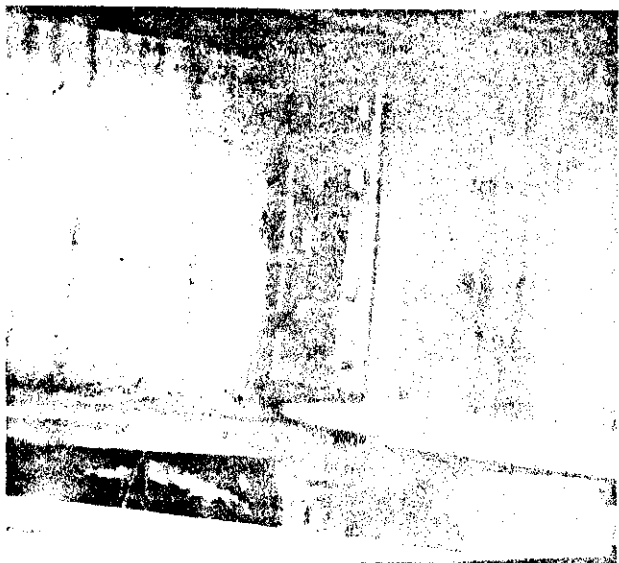


Foto III.40: Fadiga na cantoneira ligando a longarina com a transversina.



Foto III.41: Fadiga na alma de uma transversina.

A Foto III.42 apresenta a fadiga da mesa superior de uma longarina de ponte ferroviária. A fratura iniciou na borda da mesa e prosseguiu atingindo e ultrapassando os furos existentes. A fadiga ocorreu na seção onde há concentração das tensões, ou seja, na seção enfraquecida pela presença do furo.

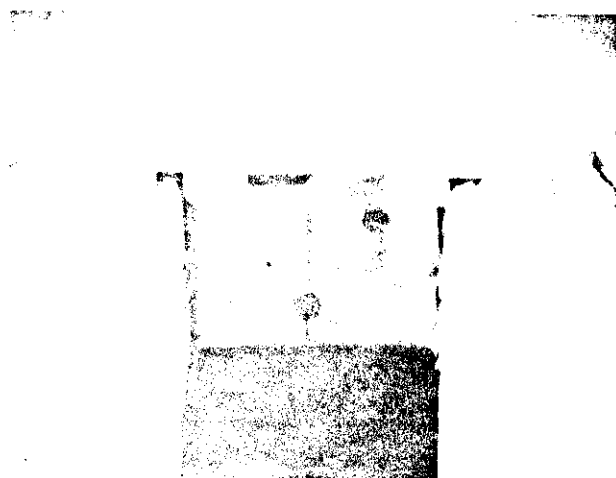
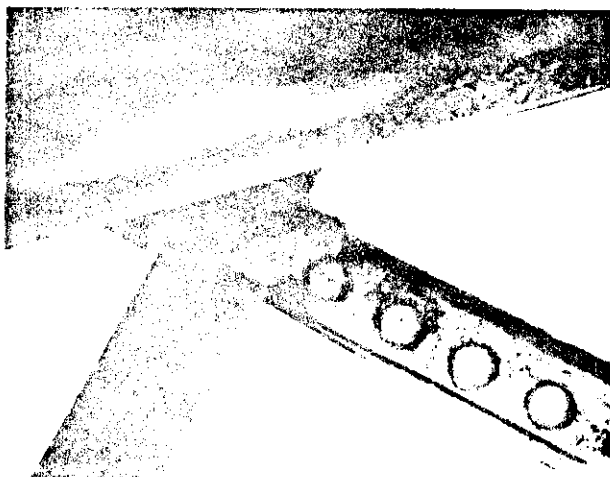


Foto III.42: Fadiga na mesa superior numa longarina

Muitas vezes, a fadiga decorre de solicitações não previstas no cálculo e de detalhes mal executados.

A Foto III.43 ilustra um exemplo deste tipo de deterioração. Apresenta a ruptura por fadiga de uma cantoneira pertencente ao sistema de contraventamento. Este sistema foi mal projetado provocando o apoio dos dormentes sobre estas barras solicitando-as à flexão. Este tipo de solicitação, não prevista no cálculo, ocasionou a ruptura por fadiga.



*Foto III.43- Fratura por fadiga na cantoneira que compõe o contraventamento das longarinas.*

#### III.7.4- Métodos de Inspeção à Fadiga

A inspeção de uma ponte compreende, como já relatado, uma série de medidas e cuidados na observação de todos os tipos possíveis de deterioração.

A identificação de fraturas por fadiga não é uma tarefa simples para os engenheiros responsáveis por inspeções. A localização destas fraturas e a sua pequena extensão dificultam a identificação visual. Os principais pontos a observar estão associados a ocorrências de concentrações de tensões, cordões de solda, etc.

Existem vários tipos de exames não destrutivos que podem ser utilizados no campo para detectar as fraturas por fadiga. Os principais tipos de exames são:

a) Líquido Penetrante:

Este processo de identificação de fraturas é o mais simples e o mais recomendado para uso no campo. Após a limpeza da superfície a ser examinada, é aplicado um líquido de baixa viscosidade (aerosol na cor vermelha). Retira-se o excesso do líquido e após alguns minutos, aplica-se uma outra solução (aerosol na cor branca). O líquido de baixa viscosidade que penetrou na fratura contrasta com a segunda solução apresentando a cor avermelhada em toda a extensão da fratura.

A "revelação" do líquido penetrante permite então identificar visualmente a localização e toda a extensão da fratura. As principais vantagens deste método consistem na sua facilidade de operação e baixo custo. As desvantagens estão na impossibilidade de determinar a profundidade da fratura.

b) Raio X:

Este exame consiste na radiação controlada por um aparelho e um filme posicionado na superfície ou elemento a examinar. Após a emissão do raio X o filme deve ser revelado permitindo a identificação das fraturas por fadiga nos elementos ou os defeitos nas soldas, tais como, fraturas, incrustações, etc.

A principal vantagem deste método é a possibilidade de um estudo pormenorizado no filme após sua revelação. As desvantagens são as dificuldades de operação no campo, a impossibilidade de determinar a profundidade da fratura e a dificuldade de identificação de fraturas perpendiculares ao plano do filme.

c) Ultra-som:

Este exame consiste num emissor de ultra-som e seu funcionamento está baseado na propagação das ondas nos materiais. Os possíveis defeitos e fraturas são identificados através de um monitor pela alteração da

propagação das ondas após serem refletidas no material analisado. Esse equipamento é portátil e possui grande sensibilidade. Apresenta como principal desvantagem a necessidade de um operador treinado para identificar e localizar os defeitos do material e as fraturas.

d) Partículas magnéticas (magnoflux):

Este exame é similar ao líquido penetrante. Aplica-se um campo magnético na peça examinada e espalha-se, através de um aerosol, uma fina camada de partículas de ferro. A distribuição das partículas será uniforme em toda a superfície exceto na região de descontinuidade, onde estas se acumularão. A presença desta concentração de partículas indicará as fraturas existentes. As vantagens e desvantagens são semelhantes ao líquido penetrante.

Existem outros métodos menos utilizados para a identificação das fraturas para fadiga nos testes de campo.

### III.8- Conclusões

Pode-se concluir, após o relato dos principais tipos de deterioração de pontes, que a ocorrência e degeneração de qualquer elemento estrutural correlaciona-se com os cuidados dispendidos nas manutenções periódicas, na acuidade das inspeções e no projeto inicial da ponte associados a uma utilização condizente com este.

Os principais problemas constatados em pontes no Brasil estão relacionados com a deterioração por corrosão, decorrentes, principalmente, da pouca atenção dada às manutenções periódicas.

Os exemplos apresentados dos vários tipos de deterioração possibilitam ao leitor compreender a extensão que este problema atinge. Através destes exemplos é possível também compreender a necessidade de recuperar elementos isolados e evidentemente analisar esta recuperação no contexto da ponte como um todo. Estes dois aspectos estão discutidos nos capítulos subsequentes.

A recuperação de elementos, como será relatada, apresenta várias facetas a serem analisadas sendo que o caso específico das vigas fletidas é objeto de um estudo experimental relatado no capítulo VII, onde foram testados alguns tipos de reforços.

Concluindo, pode-se dizer que a deterioração de elementos estruturais faz parte de um processo natural característico dos materiais ou da utilização da ponte, que devem ser estudados e compreendidos para permitir que as medidas saneadoras do problema sejam as melhores possíveis. Neste sentido, devem ser respeitados todos os aspectos particulares que envolvem a solução técnica englobando os procedimentos de execução e respeitando os limites impostos pelo estudo de viabilidade econômica.



## CAPÍTULO IV

### RECUPERAÇÃO E REFORÇO DE ELEMENTOS QUE COMPÕEM AS PONTES

#### IV.1- Preliminares:

Apresentam-se, neste capítulo, alguns dos principais aspectos relativos à recuperação de elementos que compõem uma ponte. A análise de um elemento isolado que necessite de reparos ou recuperação é extremamente difícil. Normalmente a deterioração ou aumento de capacidade de uma ponte exige uma análise de toda a estrutura, porém, é necessário conhecer todas as possibilidades e dificuldades na recuperação do elemento isolado, uma vez que é a partir da modificação destes elementos que se produzem as alterações e reforços nas pontes.

As considerações e exemplos, apresentados a seguir, permitem uma visão geral das possibilidades de recuperação ou reforço de elementos. É interessante ressaltar que os problemas possíveis de ocorrer em uma ponte são caracterizados pela individualidade e particularidade exigindo, portanto, uma análise igualmente particular.

As soluções propostas, se observadas de maneira isolada, podem conduzir a avaliações errôneas. É necessária uma análise global de todas as possibilidades. O estudo da viabilidade econômica do projeto de reforço e suas

implicações é extremamente importante. Deve-se considerar, por exemplo, o período necessário de interrupção de tráfego, tempo global do serviço com velocidade restrita (principalmente em pontes ferroviárias), interferências da solução adotada com outras vias, etc.

A recuperação de uma barra ou ligação de uma estrutura necessariamente implica no conhecimento e identificação das causas da deterioração.

O conceito "recuperar" normalmente está associado ao reforço do elemento e vários aspectos devem ser considerados quer na execução do reforço, quer nos procedimentos de cálculo.

O primeiro aspecto importante a considerar para o reforço de um elemento é o tipo de solicitação a que este está submetido. Elementos tracionados, comprimidos ou fletidos devem ser recuperados ou reforçados considerando as particularidades de cada solicitação.

O segundo aspecto é que, na maioria dos casos, a recuperação de elementos ocorre sob a ação de cargas que não podem ser retiradas ou aliviadas. O reforço proposto deverá considerar estas condições, principalmente nos procedimentos necessários para sua execução com segurança.

Como exemplo, uma coluna de um edifício, uma longarina de uma ponte ou uma barra de uma treliça não podem e não devem ser recuperados ou reforçados utilizando das mesmas premissas. Cada elemento estrutural deve ser analisado considerando todos os aspectos envolvidos. A segurança na execução, custos diretos e indiretos, condições físicas, interferências com os demais elementos e tempo necessário para execução são extremamente importantes além de todas as verificações de cálculo necessárias para cada caso.

As recuperações de pontes realizadas no Brasil ocorrem basicamente devido a um defeito grave observado na utilização ou devido ao aumento do trem tipo.

A falta de planejamento e de recursos financeiros transformam as inspeções rotineiras (recomendáveis anualmente) em inspeções esporádicas, aumentando as

possibilidades de agravamento da deterioração. Os problemas passam a ter dimensões maiores, exigindo maiores recursos e, muitas vezes, não sendo solucionados.

Neste preâmbulo, enfatiza-se que a recuperação e o reforço de elementos estruturais de aço é um tema extremamente amplo. Apresenta particularidades que vão desde a tipologia estrutural, passando pelo tipo de deterioração, envolvendo informações multidisciplinares (condições de tráfego, tipo de veículos, velocidade no caso de trens, etc.), manutenções anteriores e pelas inspeções da obra.

Pretende-se, portanto, apresentar os principais aspectos da recuperação de elementos e o relato de algumas experiências observadas no Brasil.

#### **IV.2- Caracterização de Alguns Tipos de Recuperação ou Reforço de Elementos**

A recuperação ou reforço de um elemento de uma ponte de aço inicia-se pela determinação da causa de deterioração ou na definição do aumento nominal das cargas móveis (normalmente do trem tipo).

A diversidade da tipologia estrutural das pontes não permite estabelecer procedimentos padrões, nem mesmo quando é necessário um reforço estrutural devido ao aumento do trem-tipo.


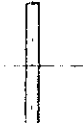

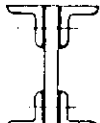
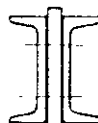
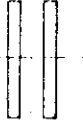
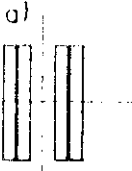
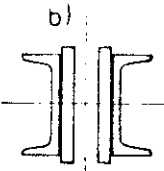

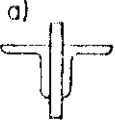
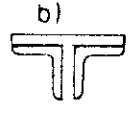
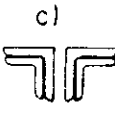



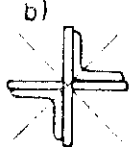
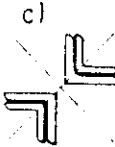
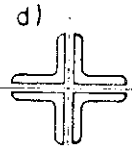
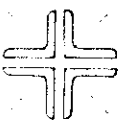
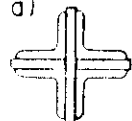
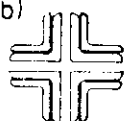
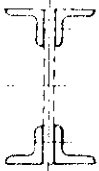
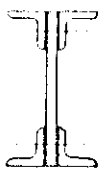
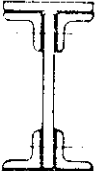
É necessário um conjunto de procedimentos anteriores para a definição do tipo de solução a adotar na recuperação de um elemento. A solução adotada deve estar inserida num contexto maior que é a análise da ponte como um conjunto. O projeto executado ("as built") da ponte, levantamento dos pontos deteriorados e identificação de suas causas, condições de carregamento são os itens necessários para o início de qualquer verificação estrutural.

Alguns problemas que ocorrem nas pontes são de fácil identificação, como por exemplo a corrosão de um elemento. Outros são mais difíceis de serem observados, como por exemplo, a fratura de uma solda devido à fadiga. As soluções

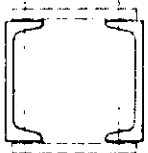
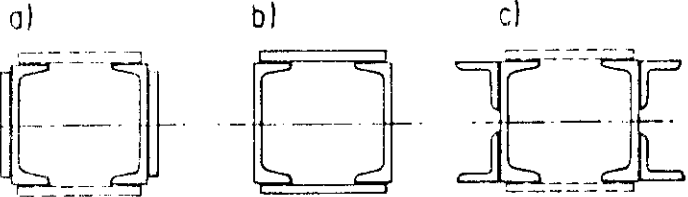
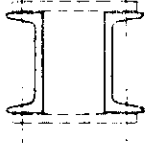
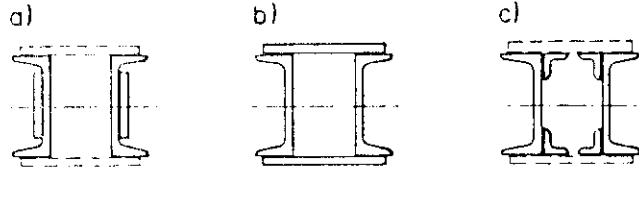
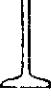
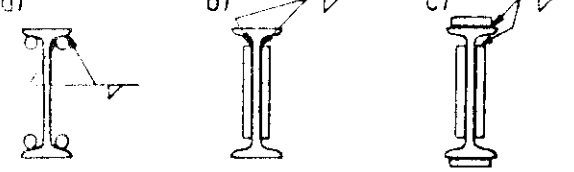
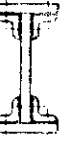
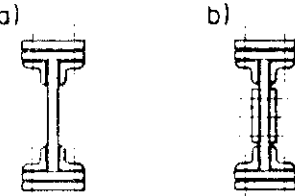
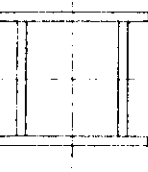
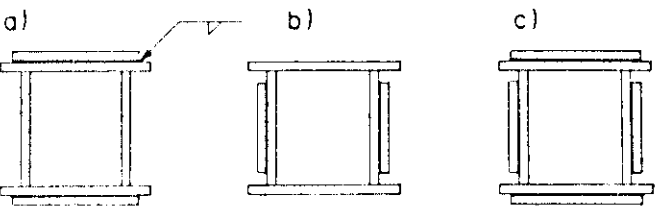
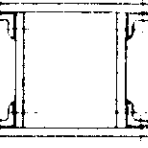
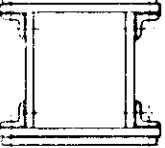
para a recuperação de elementos são, portanto, as mais variadas.

Nas tabelas, a seguir, apresenta-se alguns tipos de elementos estruturais existentes em pontes e os principais aspectos a serem considerados quer no cálculo, quer na execução. Apresentam-se também alguns exemplos de elementos estruturais de pontes e os principais procedimentos de reforço ou recuperação. Estes elementos estão subdivididos de acordo com o tipo de solicitação. Ressalta-se que as recomendações de cálculo e execução foram feitas de maneira abrangente.

Seções Transversais mais Utilizadas nas Pontes:

| Tipo da Seção Transversal   | Recuperação ou Reforço   |
|---|--|
| 1 -    | Substituição   |
| 2 -    | a)  b)  c)   |
| 3 -  | a)  b)   |
| 4 -  | a)  b)  c)  d)  |
| 5 -  | a)  b)  c)  d)  |
| 6 -  | a)  b)   |
| 7 -  | a)  b)   |

Seções Transversais mais Utilizadas nas Pontes:

| Tipo da Seção Transversal  | Recuperação ou Reforço   |
|--|--|
| 8 -     |    |
| 9 -    |   |
| 10 -  |  |
| 11 -  |  |
| 12 -  |  |
| 13 -  |   |

|  |  |     |
|--|--|-----|
| <b>ASSUNTO: ELEMENTOS TRACIONADOS</b>  |  | T-3 |
| <b>Recuperação ou aumento da capacidade resistente</b>   |  |     |
| <b>Utilização:</b>   | <b>Principais Tipos de Deterioração:</b>   |     |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contraventamentos;</li> <li>- Barras de Treliça;</li> <li>- Pendurais.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Corrosão;</li> <li>- Fadiga.</li> </ul> |     |
| <b>Recomendações de Cálculo:</b>   |  |     |
| <b>I. Recuperação da Seção Transversal do Elemento:</b>  |  |     |
| <b>I.1. Substituição do elemento por equivalente (área e inércia):</b>   |  |     |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compatibilização geométrica e física (interferências) com os demais elementos;</li> <li>- Área e inércia do novo elemento compatível com solicitações existentes (prever redistribuição dos esforços em caso de inércias diferentes);</li> <li>- Dimensionamento das ligações compatível com possibilidades físicas dos elementos da ligação (chapas, rebites, parafusos, solda);</li> <li>- Especificação do esquema de substituição (necessidade ou não de dispositivo de transferência de esforços);</li> <li>- Cálculo compatível ao esquema de substituição proposto</li> <li>- Limitação do Tráfego (interrupção, limites de carga e/ou velocidade).</li> </ul> |  |     |
| <b>I.2. Adição de novos elementos ao existente:</b>  |  |     |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Área e inércia dos elementos de reforço compatível ao calculado;</li> <li>- Centro de gravidade e eixos principais de inércia o mais próximo possível do existente no elemento a reforçar;</li> <li>- Cálculo da estrutura com área e inércia do novo elemento (existente + reforço);</li> <li>- Garantir a efetiva distribuição das tensões entre elemento existente e reforços;</li> <li>- Cálculo das ligações para o novo elemento;</li> <li>- Detalhamento adequando interferências físicas com os demais elementos da estrutura.</li> </ul>   |  |     |

## Recuperação ou aumento da capacidade resistente

## Recomendações de Cálculo:

## I.3. Substituição por elemento com maior área e inércia:

- Idem I.1

## II. Compatibilização do Elemento Existente e Reforço:

- Cálculo considerando o alívio de tensões no elemento existente (inclusive efeitos da carga permanente);
- Cálculo só considerando a participação do reforço para as cargas acidentais

## III. Verificações Recomendadas

- Tensões na seção de área mínima (redução por furos, corrosão) no elemento existente, devido a carga permanente e sobrecargas;
- Tensões na seção reforçada ou no novo elemento;
- Verificações da capacidade da ligação;
- Limite do índice de esbeltez;
- Resistência à fadiga (previsão da vida útil do reforço);
- Verificações nos demais elementos (influência do reforço na redistribuição das tensões, deslocamentos, fadiga, etc).



**Recomendações de Execução do Reforço ou Substituição****I. Elementos do Sistema de Contraventamento:**

Seções mais comuns (1),(2),(4),(5),(6),(7)

- Substituição em intervalos de tráfego (ferrovias) ou com tráfego restrito (rodovias);
- Contraventamento de vigas: substituição ou reforço sem problemas;
- Contraventamento banzos de treliça: dispositivo temporário para garantir estabilidade lateral;

**II. Elementos de Treliça:**

- Evitar a hipostacidade: utilização de elementos auxiliares para transferência das solicitações devido à carga permanente;
- Previsão das interferências físicas na retirada e substituição do elemento;
- Previsão do tempo dispendido na substituição;
- Substituição com interrupção do tráfego para elementos do sistema principal da treliça.

**III. Cabos:**

- Para a maioria das estruturas que utilizam cabos são necessário sistemas de apoios auxiliares para a substituição;
- Para os cabos portantes a substituição deve ocorrer após a transferência das solicitações para os novos cabos;
- Para os pendurais é necessário sistemas auxiliares para a transferência.

**IV. Substituição de Rebites:**

- Saque parcial dos rebites;
- Garantir capacidade da ligação para carga permanente;
- Substituição dos rebites no menor prazo possível;
- Utilização de parafusos substituindo temporariamente os rebites.

## Recomendações de Execução do Reforço ou Substituição


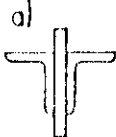
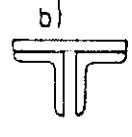

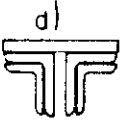


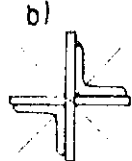
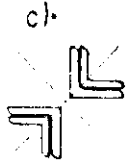
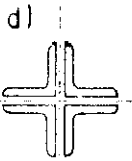


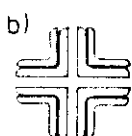

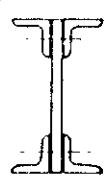
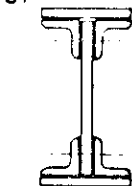
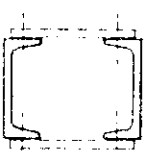
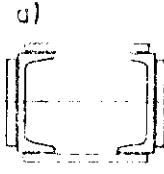
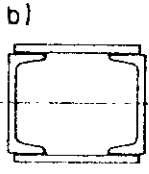
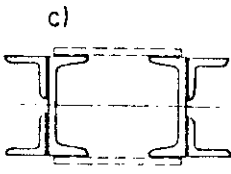
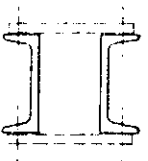
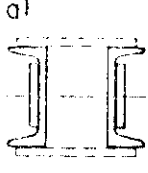
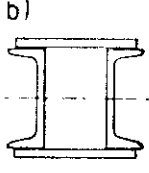
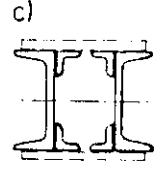
## V. Aumento da Capacidade da Ligação:

- Ligações Rebitadas:
  - a) aumento do diâmetro dos rebites;
  - b) aumento do número de rebites (normalmente rebites de diâmetro menor posicionado entre os existentes);
  - c) Adoção de elementos complementares;
  - d) Excepcionalmente utilização de solda elétrica (deve ser dimensionada para a solicitação total, com às restrições à fadiga).
- Ligações Parafusadas:
  - a) Substituição de parafusos comuns por alta resistência;
  - b) Aumento do diâmetro dos parafusos de alta resistência;
  - c) Utilização de cobrejuntas;
  - d) Excepcionalmente utilização de solda elétrica (deve ser dimensionada para a solicitação total, com as restrições à fadiga).
- Ligações Soldadas:
  - a) Aumento da altura da solda (limitada à altura e as dimensões dos elementos);
  - b) Soldas complementares do tipo bujão;
  - c) Utilização de elementos complementares.


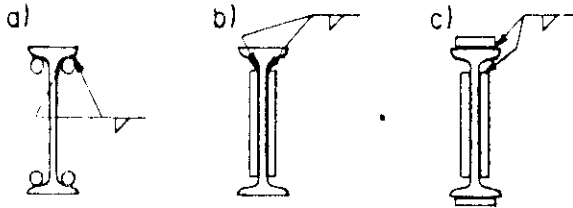

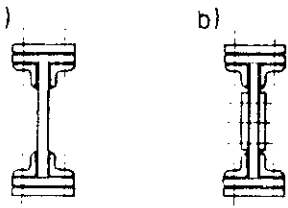
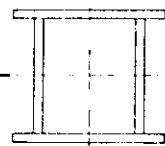
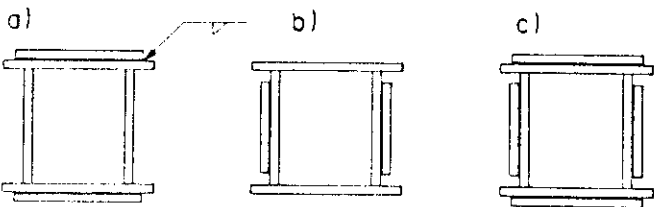
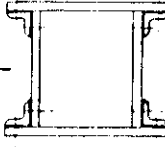
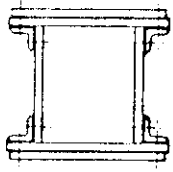
## VI. Elementos auxiliares para execução do reforço:

- Barras:
  - a) utilização de dispositivos especiais com cabos (transmissão temporária dos esforços);
  - b) apoio parcial da estrutura (utilização de fogueiras de dormentes, cimbramento metálico, etc.);
  - c) elementos auxiliares constituídos de perfis vinculado aos nós da treliça.
- Ligações:
  - a) utilização de parafusos auxiliares ou pinos.

Seções Transversais mais Utilizadas nas Pontes:

| Tipo da Seção Transversal   | Recuperação ou Reforço  |
|---|---|
| <p>1-</p>    | <p>a)     b)     c)     d) </p>     |
| <p>2-</p>   | <p>a)     b)     c)     d) </p> |
| <p>3-</p>  | <p>a)     b) </p>   |
| <p>4-</p>  | <p>a)     b) </p>   |
| <p>5-</p>  | <p>a)     b)     c) </p>  |
| <p>6-</p>  | <p>a)     b)     c) </p>  |

Seções Transversais mais Utilizadas nas Pontes:

| Tipo da Seção Transversal   | Recuperação ou Reforço   |
|---|--|
| <p>7 -</p>     |    |
| <p>8 -</p>   |  |
| <p>9 -</p>   |  |
| <p>10 -</p>  |   |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| <b>ASSUNTO: ELEMENTOS COMPRIMIDOS</b>  |   | <b>C-3</b> |
| <b>Recuperação ou aumento da capacidade resistente</b>   |   |            |
| <b>Utilização:</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- Contraventamentos;</li> <li>- Barras de Treliça;</li> </ul>   | <b>Principais Tipos de Deterioração:</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- Corrosão;</li> </ul> |            |
| <b>Recomendações de Cálculo:</b>   |   |            |
| <b>I. Recuperação da Seção Transversal:</b>  |   |            |
| <b>I.1. Substituição do elemento por equivalente (área e inércia):</b>   |   |            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- A substituição de elementos comprimidos do sistema de contraventamento é comum e simples;</li> <li>- A substituição de elementos comprimidos de treliças (diagonais ou montantes) é complexa exigindo um sistema de transferência das solicitações igualmente complexo (elemento auxiliar de transferência, escoramento de toda estrutura);</li> <li>- Compatibilização geométrica e física (interferências) com os demais elementos;</li> <li>- Área e inércia do novo elemento compatível as solicitações existentes (prever redistribuição dos esforços em caso de inércias diferentes);</li> <li>- Dimensionamento do sistema de transferência;</li> <li>- Limitação do tráfego (interrupção no caso de elementos de treliças, restrição de carga ou velocidade para contraventamentos).</li> </ul> |   |            |
| <b>I.2. Adição de novos elementos ao existente:</b>  |   |            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Área e inércia dos elementos de reforço compatível com o calculado;</li> <li>- Centro de gravidade e eixos principais de inércia o mais próximo possível do existente;</li> <li>- Limitação, para perfis compostos parafusados ou rebitados, do índice de esbeltez de cada elemento durante a execução do reforço;</li> <li>- Garantir efetiva distribuição das tensões entre os elementos novos e o existente;</li> </ul>  |   |            |

## Recuperação ou aumento da capacidade resistente

## Recomendações de Cálculo:

## I.3. Substituição por elementos com maior área e inércia:

- Idem ao I.1.

## II. Verificações Recomendadas

- Limitação do índice de esbeltez global do elemento;
- Limitação do índice de esbeltez local de cada elemento da seção composta, particular atenção na execução de reforços por adição de elementos rebitados ou parafusados;
- Limitação da tensão atuante à tensão crítica de flambagem respeitadas as recomendações das normas técnicas específicas;
- Verificação da capacidade da ligação após o reforço e consequente redistribuição das tensões.

## Recomendações de Execução do Reforço ou Substituição

**I. Elemento do Sistema de Contraventamento:**

Seções mais comuns (1),(2),(4),(5),(7)

- Substituição em intervalos de tráfego (ferrovias) ou com tráfego restrito (rodovias);
- Contraventamento de vigas: substituição ou reforço sem problemas;
- Contraventamento banzos de treliça: dispositivo temporário para garantir estabilidade lateral;

**II. Elementos de Treliça:**

- Necessidade de elementos auxiliares para a transferência das solicitações ou escoramento no caso de substituição de elementos;
- Corte e saque de rebites devem respeitar a limitação do índice de esbeltez evitando a possibilidade da flambagem de um elemento em caso de seção composta;
- Previsão das interferências físicas quer para a retirada do elemento existente quer para a introdução do novo elemento;
- Substituição com interrupção do tráfego.


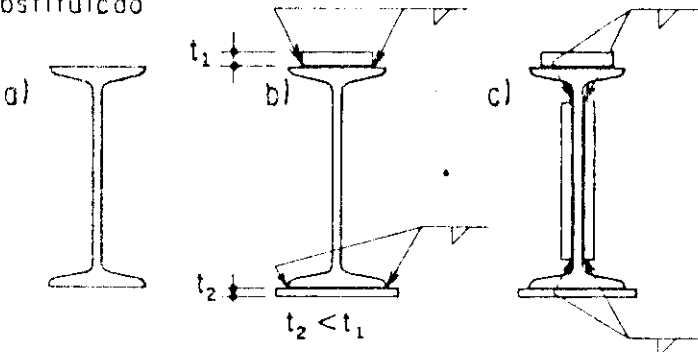

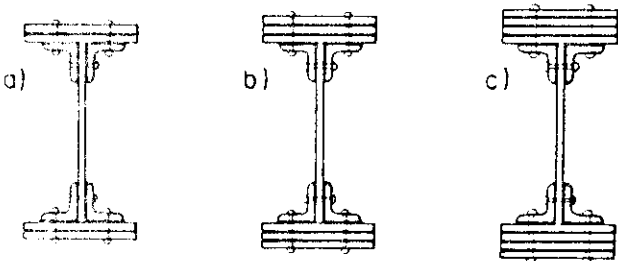
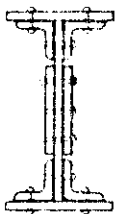
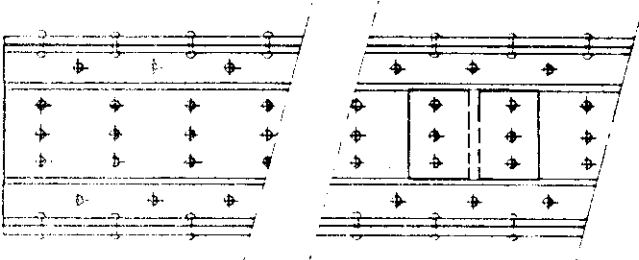
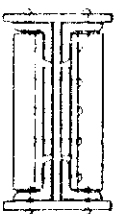
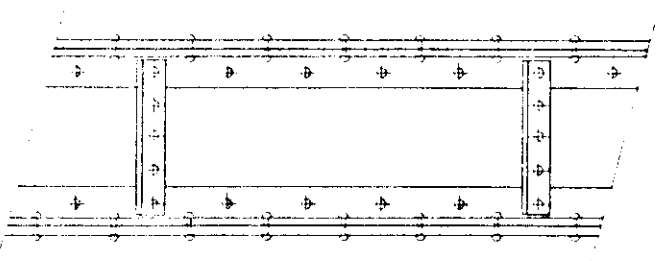
**III. Substituição de rebites:**

- Idem barras tracionadas.

**IV. Aumento da capacidade de ligação:**

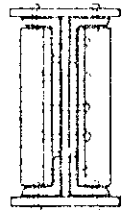
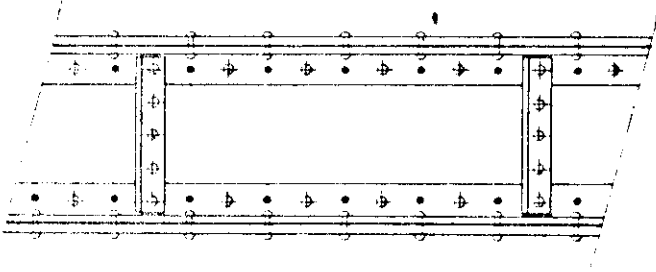

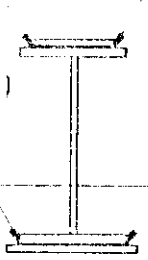
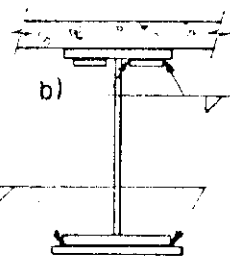
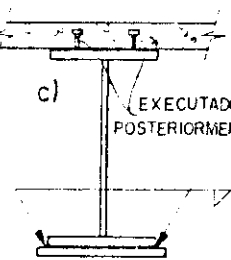
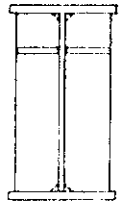
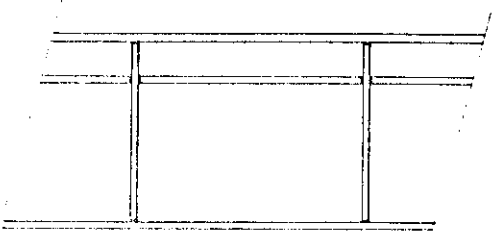
- Idem barras tracionadas.

Seções Transversais mais Utilizadas nas Pontes:

| Tipo da Seção Transversal  | Recuperação ou Reforço  |
|--|---|
| <p>1 -</p>   | <p>Substituição</p>  |
| <p>2 -</p>  |                     |
| <p>3 -</p>  |                     |
| <p>4 -</p>  |                     |



Seções Transversais mais Utilizadas nas Pontes:

| Tipo da Seção Transversal   | Recuperação ou Reforço   |
|---|--|
| <p>5-</p>   |   |
| <p>6-</p>  | <p>a) </p> <p>b) </p> <p>c) </p> |
| <p>7-</p>  |    |

|  |   |     |
|--|---|-----|
| <b>ASSUNTO: ELEMENTOS FLETIDOS</b>   |   | F-3 |
| <b>Recuperação ou aumento da capacidade resistente</b>   |   |     |
| <b>Utilização:</b>   | <b>Principais Tipos de Deterioração:</b>  |     |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Longarinas;</li> <li>- Transversinas;</li> <li>- Vigas Principais (pequenos vãos).</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Corrosão;</li> <li>- Fadiga;</li> <li>- Afrouxamento de Ligações.</li> </ul> |     |
| <b>Recomendações de Cálculo:</b>   |   |     |
| <b>I. Recuperação da Seção Transversal do Elemento</b>   |   |     |
| <p style="margin-left: 40px;"><b>I.1. Substituição do elemento por equivalente (área e inércia)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compatibilização geométrica e física (interferência) com os demais elementos;</li> <li>- Área e inércia do novo elemento compatível com as solicitações (incluindo verificação de fadiga);</li> <li>- Ligações compatíveis com as solicitações (o cálculo e detalhamento deve considerar as condições de substituição do elemento);</li> <li>- Interrupção do tráfego;</li> <li>- A substituição de vigas principais exige do calculista a previsão de um sistema de escoramento de toda a estrutura (esta solução é de difícil execução).</li> </ul> <p style="margin-left: 40px;"><b>I.2. Adição de novos elementos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Normalmente, esta é a solução mais recomendada (reforço de mesas e alma); seções (2) e (3), (6)</li> <li>- Centro de gravidade e eixos principais de inércia devem ser mantidos;</li> <li>- Dimensionamento das ligações compatível com a capacidade dos novos elementos (incluindo verificação da fadiga);</li> <li>- Garantir a efetiva distribuição das tensões entre o elemento existente e reforços;</li> <li>- Verificar reforço parcial das mesas;</li> <li>- Verificação da ligação entre elementos existentes e reforço.</li> </ul> |   |     |

## Recuperação ou aumento da capacidade resistente

## Recomendações de Cálculo:

## I.3. Substituição por elemento de maior inércia:

- Idem I.1.

## II. Verificações Recomendadas

- Compatibilização do elemento existente e o reforço (principalmente para vigas principais);
- Cálculo considerando alívio ou não de tensões devido à carga permanente;
- Verificação das condições dos sistemas de contraventamento da mesa comprimida;
- No caso do reforço ser realizado através da continuidade de vigas isostáticas é necessário reestudar o sistema de contraventamento;
- Verificação do número máximo de rebites possíveis de serem sacados para recuperação com a ponte em serviço (distância máxima entre rebites);
- Verificação de resistência, estabilidade global da mesa comprimida, estabilidade local das chapas;
- Verificação dos rebites em peças reforçadas por adição de chapas.

## Recuperação ou aumento da capacidade resistente

## Recomendações e Execução do Reforço ou Substituição

## I. Vigas Principais da Ponte:

- Reforço ou substituição exigem interrupção da via;
- Corte e saque de rebites devem ser calculados para manter a integridade dos perfis compostos, utilizar parafusos após o saque;
- A substituição de chapas de mesa e cantoneiras em perfis compostos rebitados pode ser feita em partes utilizando cobrejuntas nas emendas;
- A substituição de chapas de alma normalmente não é executada devido a grande dificuldade, adota-se chapas de alma complementares rebitadas nas cantoneiras;
- Reforço por solda elétrica não apresenta maiores problemas, detalhes do reforço para evitar solda sobre a cabeça. Seção (6).

## II. Longarinas:

- Reforço pouco utilizado;
- Substituição exige cuidados especiais. É necessário prever as interferências na retirada da viga existente e o posicionamento da nova. Normalmente corta-se parte das mesas para permitir a retirada e colocação da nova.

## III- Transversinas

- Reforço por adição de chapas nas mesas com os cuidados necessários para o saque dos rebites;
- A execução estará vinculada a tipologia estrutural (estrado inferior, intermediário ou apoiado em treliças).

**NOTA GERAL:** A solução de reforço utilizando cabos com ou sem protensão inicial é extremamente interessante e conduz a soluções econômicas. Esta solução será melhor detalhada no Capítulo V.

#### IV.3- Recuperação ou Reforço de Ligações

A recuperação de uma ligação está diretamente relacionada ao tipo de deterioração. A corrosão, por exemplo, pode comprometer os elementos de uma ligação (rebites, parafusos, chapas de nó), a fadiga pode ocasionar a fratura destes elementos. É necessário associar as soluções com as causas da deterioração.

##### IV.3.1- Ligações Rebitadas

-Corrosão: normalmente, a ocorrência da corrosão em rebites esta associada à corrosão das chapas e elementos que compõem um nó. A substituição dos rebites comprometidos é a solução normalmente utilizada. É necessário cortar e retirar os rebites existentes. Deve-se prever e calcular, nos casos da ponte em serviço, o número e posição dos rebites a serem cortados. Após a retirada dos rebites, deve-se refurar as chapas para uma uniformização das bordas dos furos.

-Fadiga: a ocorrência de fadiga em rebites está, normalmente, associada a problemas com o detalhamento da ligação. Deve-se substituir os rebites e examinar cuidadosamente o tipo de detalhe existente e adequá-lo às recomendações das normas técnicas sobre o tema.

-Ruptura de rebites por cisalhamento: a ruptura de rebites por cisalhamento caracteriza um estado limite último da ligação e é indicativo de problemas graves na estrutura. Após a constatação deste tipo de ruptura é necessária a interferência imediata dos engenheiros responsáveis no sentido de identificação das causas. Dependendo da importância da ligação interrompe-se imediatamente o tráfego, sob pena da ruína da estrutura.

Cabe ressaltar que estruturas rebitadas possuem um grau de redundância elevado o que permite grandes redistribuições de tensões. Quando é atingido o estado limite último dos

rebites fica caracterizada a gravidade do problema. Normalmente este estado limite é decorrente de elevadas concentrações de tensões. As principais consequências deste tipo de ruptura estão diretamente relacionadas ao tipo de ligação comprometida.

-Defeitos de execução: é razoavelmente comum a ocorrência de defeitos de rebitagem. Podem ocorrer na fabricação ou na substituição de rebites e as consequências dependem do tipo de problema e da importância da ligação. É igualmente comum a dificuldade de detectá-los e os defeitos mais comuns foram apresentados no Capítulo, III.

#### IV.3.2- Ligações Soldadas

-Corrosão: a soldagem executada no campo requer cuidados especiais, principalmente na limpeza. É comum observar soldas de campo sem a devida limpeza, principalmente quando utilizadas para unir elementos já existentes e reforços. A escória resultante do processo da soldagem, não sendo devidamente retirada, com o passar do tempo "descola-se" do cordão expondo o metal base às intempéries, favorecendo o aparecimento da corrosão.

Outro aspecto de interesse a ressaltar é que a soldagem de reforços muitas vezes é realizada em elementos já existentes cujo aço não apresenta boa soldabilidade. A consequência deste fato é o comprometimento por corrosão do aço do reforço.

-Fadiga: a ocorrência de fadiga em ligações soldadas é comum. Os aspectos principais deste fenômeno já foram comentados no Capítulo III. A recuperação de uma ligação com fraturas de fadiga exige do engenheiro um reexame completo das tensões existentes. A solução necessariamente exige um detalhamento adequado para evitar as concentrações de tensão.

-Ruptura da solda: a ruptura de ligações soldadas ou de soldas em elementos compostos é extremamente grave. Caracteriza um estado limite último que, dependendo do

elemento da ligação comprometido pode conduzir à ruína da estrutura. Exige intervenção imediata dos engenheiros responsáveis.

As fotos, apresentadas a seguir, ilustram alguns exemplos da recuperação ou reforço de elementos de pontes.

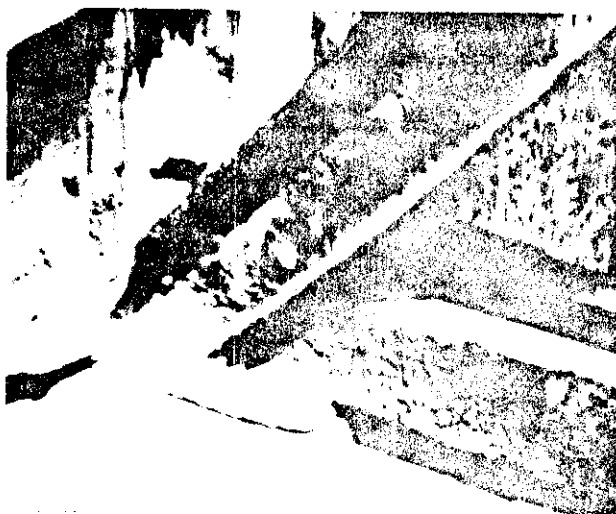


Foto IV.1 - Diagonal de apoio de uma ponte em treliça com alto grau de corrosão.

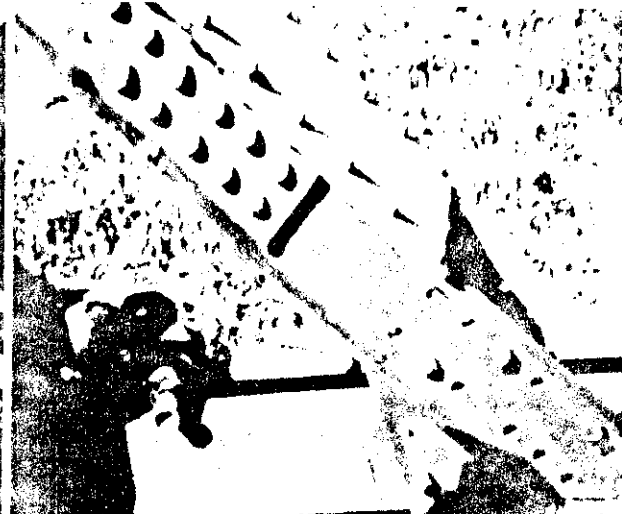


Foto IV.2 - Recuperação da diagonal de apoio.



Foto IV.3 - Montante de apoio de uma ponte em treliça bastante corroído.

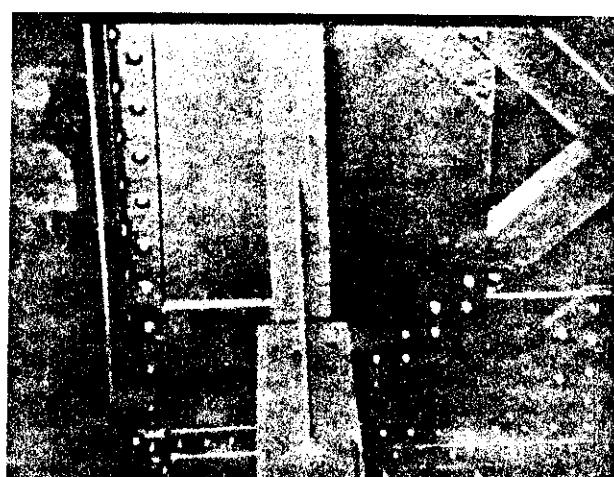


Foto IV.4 - Montante de apoio após a recuperação.

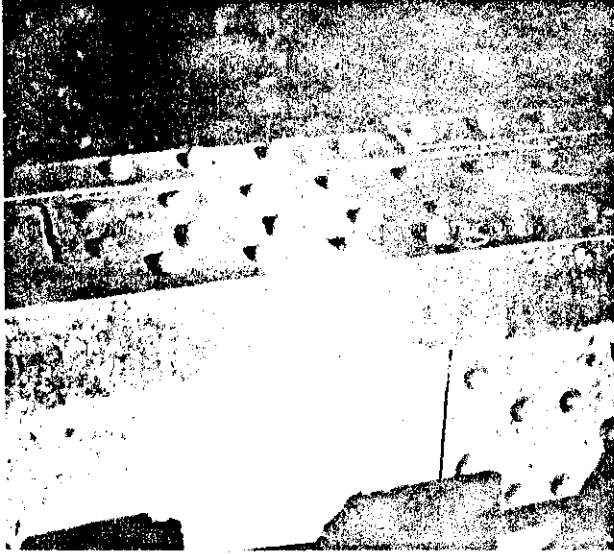


Foto IV.5- Viga em alma cheia com reforço por adição de chapas e cantoneiras nas mesas.

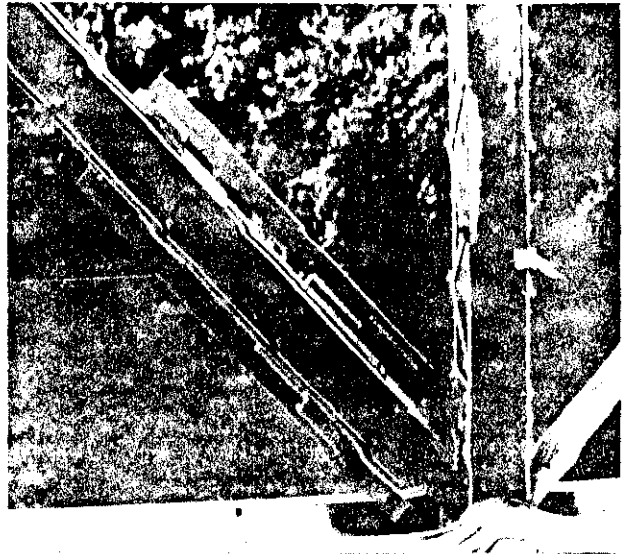


Foto IV.6- Diagonal (chapa e olhal) reforçada pela adição de perfis (U). Dispositivo para aplicação de força externa.

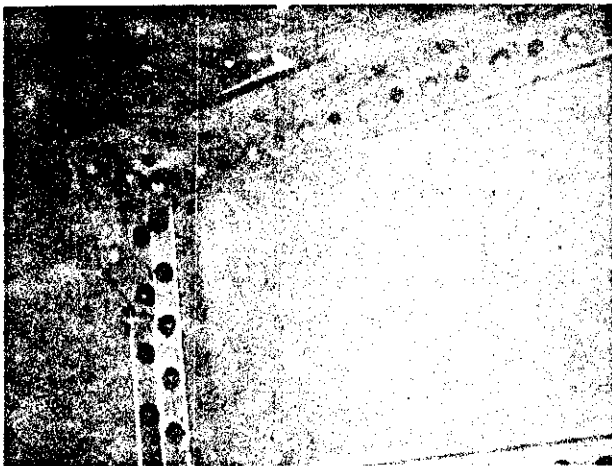


Foto IV.7 - Reforço com rebites adicionais em viga fletida.

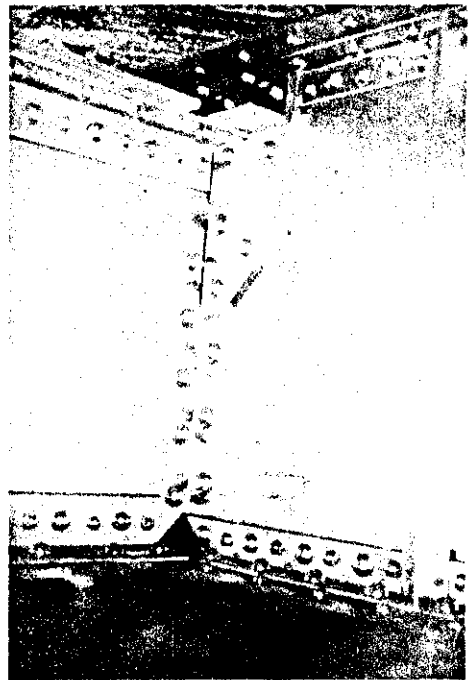


Foto IV.8 - Viga da foto anterior já pintada.



#### IV.4- Conclusões

Como pode ser observado, a apresentação da recuperação e reforço de elementos isolados procurou ser a mais abrangente possível, tendo em vista a extensão e dificuldade na abordagem do tema decorrente das particularidades de cada elemento estrutural.

A utilização de tabelas resumindo os principais aspectos de cada elemento estrutural, subdivididos pela solicitação, foi realizada procurando sintetizar as informações e possibilitar ao leitor uma visão geral de todos os aspectos envolvidos e as principais soluções passíveis de serem adotadas.

Pode-se concluir que o reforço ou recuperação de um elemento estrutural deve considerar num primeiro momento o tipo de solicitação e, a seguir, a deterioração ou aumento de capacidade que origina esta necessidade.

Como recomendações gerais pode-se dizer que o reforço proposto deverá, sempre que possível, "respeitar" o elemento de ligação utilizado, manter os eixos principais de inércia o mais próximo possível do existente e não introduzir concentrações de tensões.

Pode-se afirmar também que para o reforço num elemento estrutural deve-se priorizar inicialmente as soluções baseadas na adição de novos elementos e em segundo lugar, a utilização de barras protendidas. Estas duas soluções têm demonstrado ao longo do tempo serem as mais adequadas.

Como já relatado anteriormente não é possível dissociar o estudo da recuperação de uma ponte dos elementos que a compõem, sendo necessária uma análise global de todo o problema. A divisão aqui realizada, reforço de elementos e da ponte como um todo, teve o caráter de facilitar a apresentação destes dois aspectos, que no entanto são interdependentes.

No capítulo a seguir aborda-se a recuperação ou reforço da ponte como um todo.

Enfatiza-se também o estudo experimental apresentado no

capítulo VII onde procurou-se estudar e obter informações e subsídios dos tipos mais comuns da recuperação de elementos fletidos.

Concluindo este capítulo, pode-se afirmar que a necessidade de recuperação e reforço de elementos estruturais de pontes é uma realidade no estágio atual e idade das pontes em operação no Brasil. É necessário ao projetista conhecer todos os aspectos que estão envolvidos no problema, estabelecer critérios de projeto específicos para as recuperações que contemplem os aspectos técnicos, as condições de execução, as particularidades da solução proposta e sua viabilidade econômica.

## CAPÍTULO V

### AUMENTO DA CAPACIDADE DE PONTES EXISTENTES

#### V.1- Preliminares

O transporte rodoviário e ferroviário passou por profundas modificações nas últimas décadas e hoje as cargas por eixo nos veículos e nos vagões aumentou significativamente. As sobrecargas são cada vez maiores em todo o sistema viário e, em particular, nas pontes.

A simples substituição de pontes antigas — algumas centenárias — envolve custos extremamente elevados o que justifica, na maioria dos casos, o reforço e a recuperação das pontes existentes.

A necessidade de reforçar uma ponte tem várias causas. O aumento do trem tipo exige estudos da segurança estrutural da ponte e também do tipo de reforço mais indicado. Salienta-se a necessidade de uma análise custo-benefício onde todos os aspectos financeiros e técnicos devem ser considerados (novo traçado da via, custos diretos e indiretos, quer do reforço, quer da substituição, vida útil da ponte, etc).

A alteração do gabarito de uma ponte (vertical, ou horizontal) também exige soluções técnicas que em geral envolvem o reforço localizado de elementos ou de toda a

ponte.

A vida útil da ponte está associada ao regime de tráfego e à manutenção realizada, sendo estes fatores determinantes no estabelecimento da necessidade de reforço.

Finalizando, no Brasil a deterioração de uma ponte (corrosão, fadiga, impacto de objetos, etc.) é o principal fator gerador de reforços .

A recuperação e reforço de elementos isolados que compõem uma ponte foi tratada no Capítulo IV. Apresentam-se, a seguir, as principais soluções destinadas ao reforço ou aumento da capacidade das pontes:

- redução da carga permanente;
- viga mista;
- aumento da rigidez transversal;
- aumento da seção transversal dos elementos;
- adição ou substituição de elementos;
- reforço ou alteração nas ligações;
- protensão da estrutura com cabos externos;
- alteração no esquema estático da ponte ou superposição de nova estrutura.

Os procedimentos acima relacionados têm sido utilizados para o aumento da capacidade de pontes existentes no Brasil e no Mundo. Constantemente é necessário associar mais de uma das soluções acima apresentadas, bem como o reforço de elementos que compõem a ponte.

A política de reforçar as pontes existentes tem sido recomendada pelos principais órgãos responsáveis pela manutenção e operação de pontes no mundo.

Os principais trabalhos pesquisados têm enfatizado a grande facilidade apresentada pelas pontes metálicas para a recuperação ou reforço, possibilitando aumentar a vida útil concomitantemente a sua capacidade resistente.

Os principais aspectos relativos ao reforço de pontes existentes estão apresentados a seguir, sendo que o detalhamento de cada método e sua utilização dependem do tipo de ponte e do estudo custo-benefício.

A complexidade e variedade da tipologia estrutural dificultam uma análise mais detalhada de cada processo. Cada caso de reforço tem suas peculiaridades; fatores como o tipo de ponte e até sua localização irão influenciar na escolha do método de reforço mais adequado. A opção substituição também não deve ser descartada, apesar das ressalvas já feitas.

## V.2- Redução da Carga Permanente

É evidente que qualquer redução de cargas sobre uma estrutura reduzirá as tensões, em particular, aquelas geradas pela carga permanente.

Para cada tipo de ponte, rodoviária ou ferroviária, e para cada tipo de sistema estrutural, a diminuição da carga permanente exige uma solução diferenciada.

Raramente é utilizada em pontes ferroviárias pois, excetuando-se a retirada de dutos, passarelas ou pequenos complementos, a superestrutura deste tipo de ponte não possibilita grandes alterações.

Nas pontes rodoviárias existe a possibilidade da diminuição do peso próprio do tabuleiro através de vários tipos de solução como por exemplo: diminuição da espessura das lajes de concreto armado através da utilização da ação composta com a viga de aço, substituição do tabuleiro de concreto por grelhas de aço, etc.

Um exemplo da substituição do tabuleiro está sendo empregado na Ponte Ercílio Luz - Florianópolis - SC, onde grelhas de aço estão substituindo o piso de concreto armado.

## V.3- Viga Mista

A ligação entre o tabuleiro de concreto e o sistema de vigas (longarinas e transversinas) é um método muito eficiente para o aumento da capacidade resistente de pontes, em particular aquelas com sistema de vigas principais.

O comportamento do conjunto viga de aço-laje de

concreto reduz consideravelmente as tensões provenientes da carga móvel e também os deslocamentos em função do aumento significativo da rigidez transversal.

A eficiência desta solução está baseada na utilização mais adequada destes dois materiais, ou seja, o concreto submetido à compressão e o aço à tração.

O comportamento como viga mista é obtido com a utilização de conectores interligando a laje de concreto com as vigas de aço. Estes conectores devem garantir a transferência das tensões de cisalhamento entre os dois materiais.

A interligação laje-vigas de aço é utilizada em pontes rodoviárias onde, necessariamente, existe o tabuleiro que, em geral, é de concreto armado.

Esta solução é utilizada para o aumento da capacidade das pontes existentes, basicamente nos três casos relatados abaixo.

Quando ocorre a substituição do tabuleiro de madeira por laje de concreto; com a retirada deste é possível dispor adequadamente os conectores e soldá-los às longarinas e transversinas. A laje poderá então ser moldada "in loco" ou pré-moldada. Os tipos de conectores e os procedimentos construtivos serão detalhados a seguir.

No caso da recuperação ou reforço de pontes onde o tabuleiro é constituído de uma laje de concreto faz-se necessária a abertura de buracos nas lajes onde os conectores, devidamente dimensionados, serão soldados nas vigas. Após esta operação, a abertura onde os conectores foram posicionados é preenchida com concreto.

Nas pontes dimensionadas e executadas como vigas mistas muitas vezes é necessário o reforço dos conectores quando o projeto original é inadequado. É necessário aumentar a capacidade à cisalhamento na ligação viga-laje. Os procedimentos são análogos aos citados no parágrafo anterior.

### V.3.1- Tipos de Conectores

Uma grande variedade de conectores foi estudada e utilizada em pontes. A Figura V.1 ilustra os principais tipos.

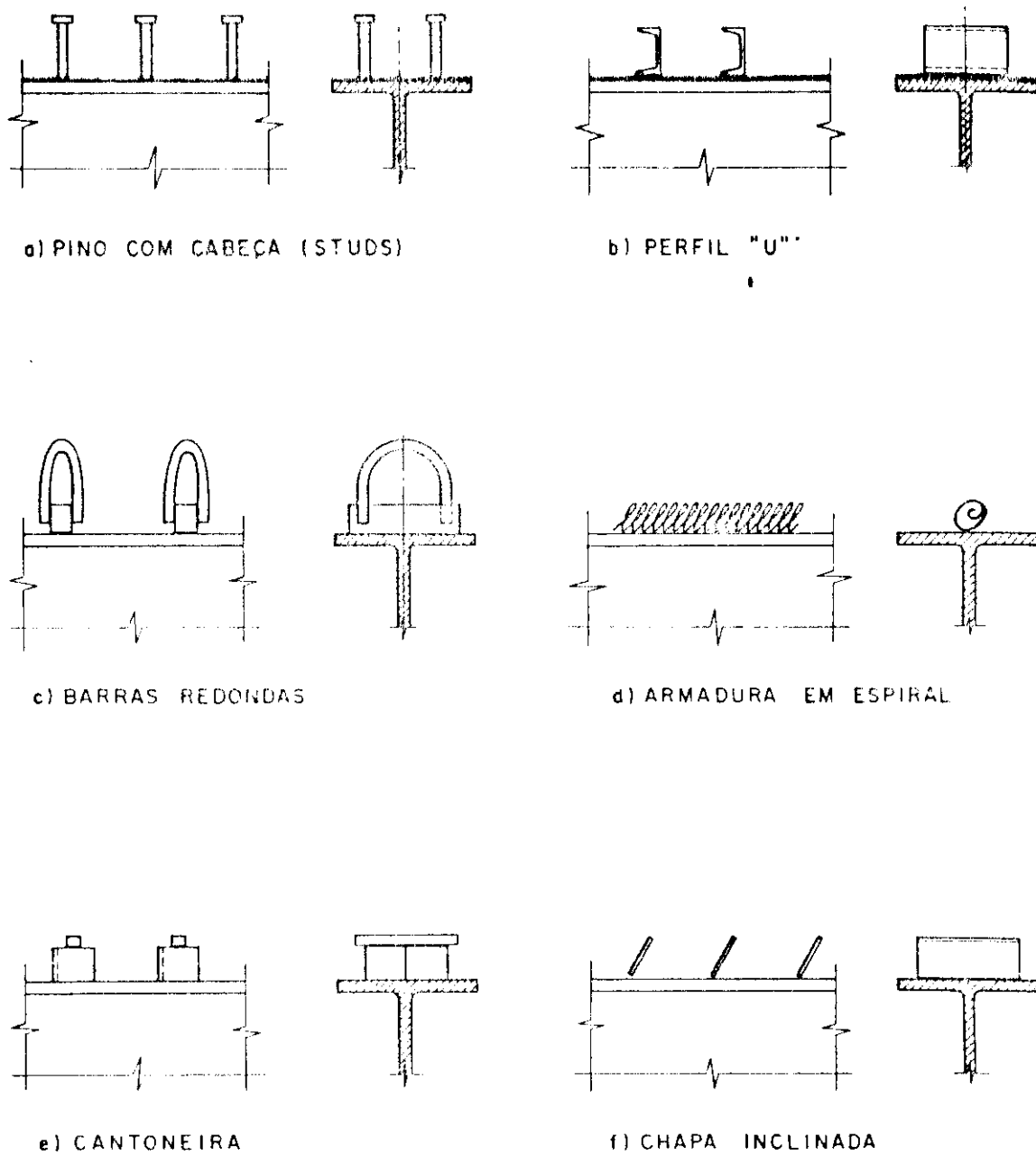


Figura V.1- Conectores utilizados em vigas mistas de ponte

Atualmente, as principais normas técnicas recomendam os conectores tipo pino com cabeça, perfis U e barra redonda Figuras V.1 a), b) e c), respectivamente.

As dimensões e espaçamentos dos conectores dependem do fluxo de tensões de cisalhamento entre a laje e a viga de aço. Recomenda-se a norma americana da AASHTO e a norma inglesa BS-5400 Part 5 para o dimensionamento de vigas mistas para pontes.

É interessante ressaltar que os conectores são hoje verificados no estado limite último à fadiga. Este procedimento decorre de estudos recentes e muitas pontes existentes, dimensionadas como viga mista, necessitam de reforço nos conectores pois não atendem a este estado limite.

A melhor solução para aumentar a capacidade da viga mista ao cisalhamento é o aumento do número de conectores, pois é a que resulta em menores custos. Este acréscimo no número de conectores pode ser realizado com a abertura de buracos na laje e colocação de novos conectores. O problema principal desta solução é a necessidade de interrupção do tráfego.

Outra solução possível é utilizar parafusos como conectores. Uma máquina especial faz o corte do concreto (furo com pequeno diâmetro) e após a furação da viga de aço o parafuso é fixado com porca e contra porca. O furo da laje é preenchido com graute. Esta solução também é utilizada quando o aço da viga apresenta baixa soldabilidade.

A Figura V.2 exemplifica este tipo de solução.

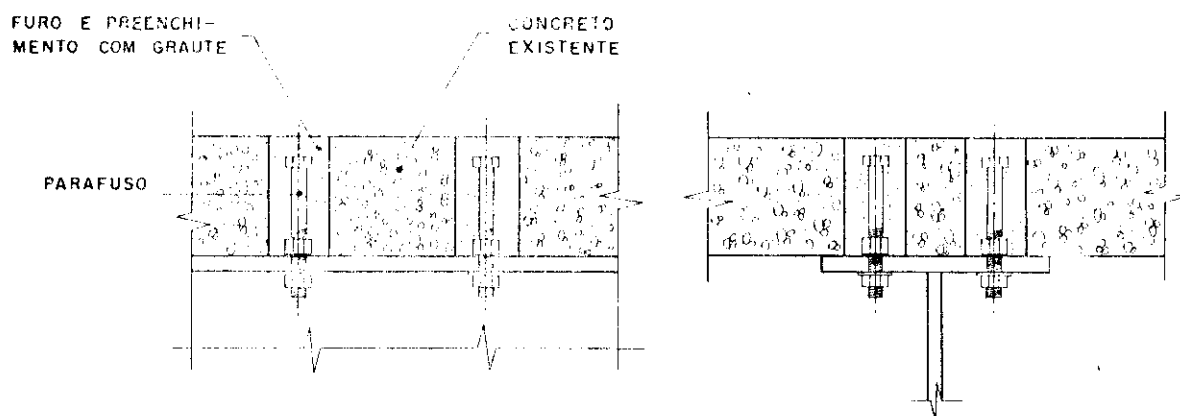


Figura V.2- Parafusos utilizados como conectores.



A terceira possibilidade é a utilização de pinos em espiral<sup>1</sup>. A principal vantagem deste tipo de conector consiste no fato de sua colocação ser feita sem interrupção no tráfego. Abre-se um furo pela mesa do perfil incluindo o concreto. Após isto o pino é colocado sob pressão no furo utilizando um macaco hidráulico apoiado na mesa inferior. A Figura V.3 ilustra este procedimento.

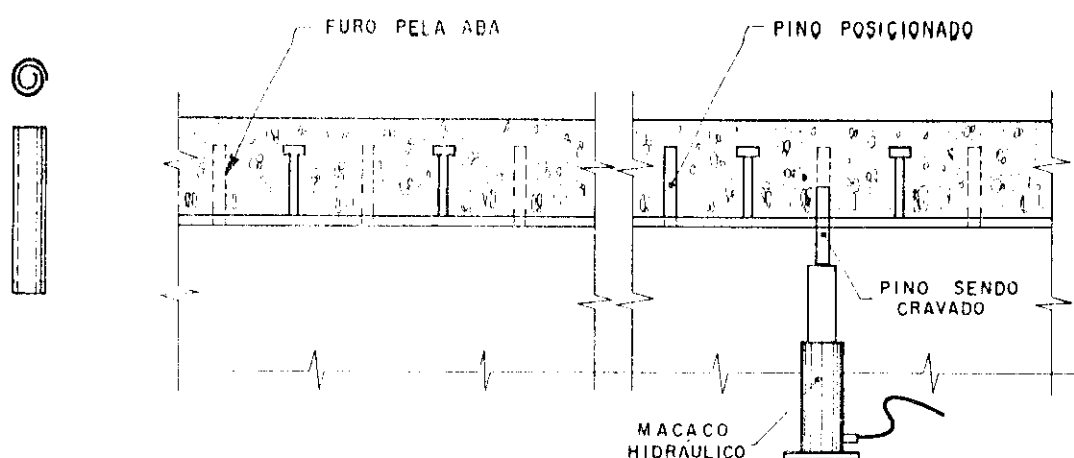


Figura V.3- Dispositivo de colocação de conectores tipo espiral.

#### V.4- Aumento da Rigidez Transversal

O aumento da rigidez transversal de uma ponte é realizado através da introdução de sistemas de contraventamento transversais entre vigas ou pela utilização de diafragmas. Este tipo de solução é normalmente utilizado em pontes rodoviárias quando o sistema estrutural é constituído de várias vigas principais.

Este sistema, destinado a aumentar a capacidade das

1

*Estes pinos foram testados no Welding Institute - Cambridge, Inglaterra e apresentaram desempenho semelhante aos pinos com cabeça. Para efeito de dimensionamento, podem ser considerados conectores flexíveis.*

PRITCHARD, B. Bridge strengthening using load relieving techniques. Bridge Management Inspection, Maintenance Assessment and Repair. Ed. Elsevier Applied Science p. 667-676, 1990.

pontes, baseia-se na redistribuição das solicitações da carga móvel. O principal objetivo é fazer com que o sistema de vigas passe a trabalhar conjuntamente, efetivando a redistribuição dos momentos fletores e da força cortante.

O primeiro aspecto negativo deste processo consiste justamente na necessidade de transmissão dos momentos fletores entre os novos elementos transversais e as vigas existentes. As ligações são de difícil execução e exigem um grande consumo de elementos de ligação (normalmente parafusos).

O segundo aspecto a ser considerado é a eficácia da redistribuição dos momentos fletores, no aumento da capacidade resistente da ponte. Vários pesquisadores admitem que esta solução, embora muito usada no passado, não apresenta grandes vantagens do ponto de vista econômico.

Os procedimentos de cálculo deverão simular a transmissão de momentos fletores entre as vigas existentes e o reforço, considerando o grau efetivo desta transferência. O cálculo da estrutura como uma grelha é o sistema mais utilizado quando o reforço transversal é feito por vigas. O cálculo estático deve considerar a rigidez transversal quando esta é obtida por um sistema de contraventamentos.

Como comentário final, este processo é recomendável quando a ponte já apresenta problemas relacionados a rigidez transversal.

A Figura V.4 ilustra um exemplo esquemático de vigas enrijecidas transversalmente através de um sistema de contraventamento vertical.

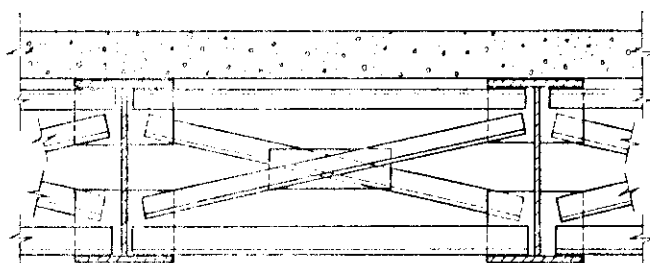


Figura V.4- Sistema de contraventamento vertical entre vigas

## V.5- Alteração no Esquema Estático - Vínculos Externos

A alteração no esquema estático em pontes existentes é realizada com o aumento do grau de hiperestaticidade. É um importante método para o aumento da capacidade resistente de pontes existentes.

Em função do esquema estrutural das pontes existem várias soluções possíveis para o aumento do grau de hiperestaticidade (responsável pela redistribuição das solicitações e deslocamentos). Esta solução aumenta, em alguns casos de maneira considerável, a capacidade resistente.

Pontes em vigas isoladas podem ser transformadas em contínuas. Apoios intermediários podem ser obtidos pela execução de novos pilares ou por estruturas auxiliares. Cabos podem ser utilizados como apoios intermediários. Estes são alguns exemplos deste procedimento de reforço estrutural. Portanto, para cada tipologia estrutural da ponte é possível obter uma solução adequada destinada a aumentar a capacidade resistente que seja economicamente viável.

Qualquer análise para a adoção deste tipo de reforço deve considerar que a solução proposta contemple as particularidades da estrutura a reforçar (tipologia estrutural, condições locais, viabilidade econômica, vida útil após o reforço, etc).

Deve-se adequar o esquema estático proposto às possibilidades físicas da obra quanto a viabilidade de execução (compatibilização entre a solução e as condições locais da obra). O detalhamento da solução deve estar adequado ao modelo teórico proposto (ligações, apoios, engastamentos executados como tal).

Deve-se compatibilizar as deformações da estrutura existente com a estrutura de reforço e considerar as deformações e deslocamentos da estrutura de reforço no cálculo.

### V.5.1- Exemplos de Alteração do Esquema Estático

A alteração do esquema estático de uma ponte pode ser realizada utilizando-se várias soluções, tais como, pilares intermediários, continuidade em vigas simplesmente apoiadas, apoios intermediários obtidos pela adição de arcos ou pórticos, duplicação de vigas principais, etc.

Apoios intermediários são muito utilizados como solução para reforço e são extremamente simples do ponto de vista de cálculo.

A função principal destes apoios é diminuir o vão da ponte e conseqüentemente os momentos fletores (ponte em viga, treliça, etc.).

O aumento do grau de hiperestaticidade reduz os momentos positivos e também os deslocamentos. Há, porém, o aparecimento de momentos negativos e forças cortantes significativas sobre o vínculo introduzido.

Principais aspectos a considerar:

- verificação dos elementos sujeitos a inversão do momento fletor;

- verificação da força cortante na região dos novos vínculos;

- verificação do sistema de contraventamento, adequando-o às novas situações;

- verificação do efeito local da reação de apoio;

- compatibilização entre a estrutura existente e a estrutura de reforço (novos apoios).

Estes apoios intermediários podem ser obtidos de várias maneiras como por exemplo:

- pilares adicionais;

- apoios introduzidos por pórticos inferiores ou superiores;

- apoios introduzidos por cabos.

O aumento do grau de hiperestaticidade foi uma técnica muito utilizada no mundo todo principalmente entre 1930 e 1950. A recuperação do sistema viário da Europa (principalmente Alemanha, Hungria e Romenia) após a 2<sup>a</sup> Guerra Mundial, associado à necessidade do aumento da

capacidade das pontes devido aos novos "trens-tipos", popularizou este tipo de solução.

A continuidade de vigas simplesmente apoiadas também é uma solução que apresenta bons resultados. É obtida através da introdução de chapas interligando as mesas e a alma das vigas. O aumento do grau de hiperestaticidade obtido pela continuidade apresenta como principal vantagem a redução dos momentos fletores positivos.

A título de exemplo, a Figura V.5<sup>2</sup> apresenta um histograma percentual entre os momentos máximos para uma ponte rodoviária de comprimento  $l$  (20 e 30m) com dois tramos simplesmente apoiados e os obtidos através da continuidade entre estes tramos. Estas relações foram estabelecidas aproximadamente para uma ponte em viga com carga móvel posicionada no ponto de momento positivo máximo. É evidente a eficiência desta solução, na redução dos momentos fletores, porém deve-se tomar cuidado com o surgimento de momentos fletores negativos e com o aumento da força cortante no apoio central.

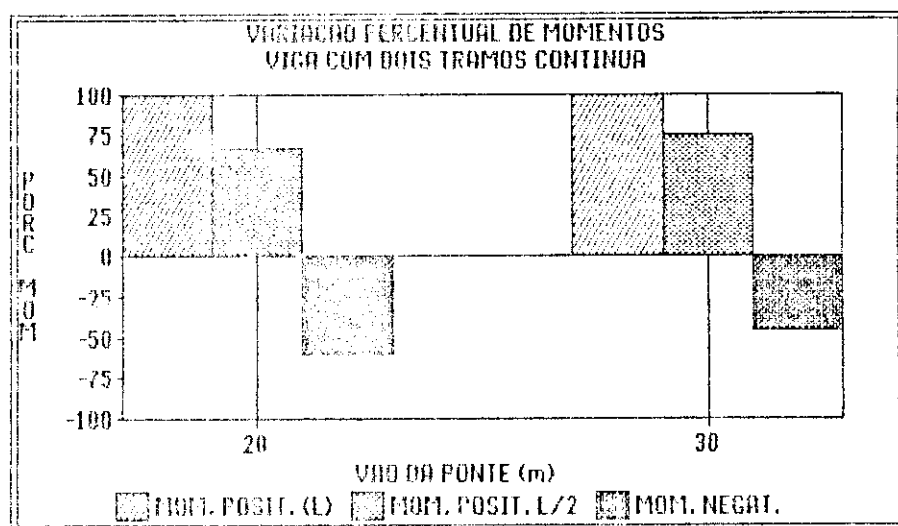


Figura V.5- Variação aproximada dos momentos. Viga simplesmente apoiada de dois tramos para viga contínua.

<sup>2</sup> KLAIBER, F.W. et alii "Methods of strengthening existing highway bridges" National Cooperative Highway Research Program, Report 293, TRB, Washington, sept 1987.

A adição de vigas principais como reforço estrutural também é uma solução possível e foi utilizada principalmente na Europa na década de trinta.

Este reforço consiste na introdução de novas vigas, com altura igual às já existentes, e interligadas de maneira adequada. Esta interligação deve ser tal que as tensões oriundas da carga móvel sejam devidamente distribuídas entre as vigas existentes e de reforço.

Embora tenha sido muito utilizada na década de 30, apresenta como principais problemas a dificuldade de garantir uma distribuição efetiva das tensões e deslocamentos compatível com a inércia das longarinas e os problemas para as manutenções posteriores devido ao pouco espaço existente entre as duas vigas.

A superposição de arcos é um tipo de reforço utilizado quando a ponte tem como estrutura portante principal as treliças.

Normalmente superpõe-se o arco na treliça existente e utilizam-se tirantes vinculados aos nós para efetivar a ligação estrutura existente e o reforço. Este tipo de reforço estrutural tem como principal vantagem a rapidez de execução.

Qualquer das soluções acima apresentadas necessitam de um estudo adequado da relação custo-benefício considerando as várias alternativas possíveis. A melhor solução é decorrente da análise particular do caso analisado.

Abaixo apresentam-se os principais fatores envolvidos:  
-características da ponte existente (tipologia estrutural, tipos de detalhes, ano de fabricação, condições de utilização e manutenção, vida útil remanescente, etc.);

-características locais (condições do solo, altura livre da ponte, fundações existentes, condições de acesso dos equipamentos, etc.);

-características da utilização (condições de tráfego rodoviário ou frequência de trens, possibilidade de interrupção do tráfego total ou parcial, etc.);

Resumidamente, pode-se dizer que a solução estrutural

deve ser "adaptada" a todas estas características. O estudo de viabilidade econômica deve incorporar não só os custos diretos do próprio reforço como também os custos indiretos associados aos itens acima citados.

As Fotos V.1 a V.4 apresentam exemplos de pontes reforçadas com apoios intermediários.

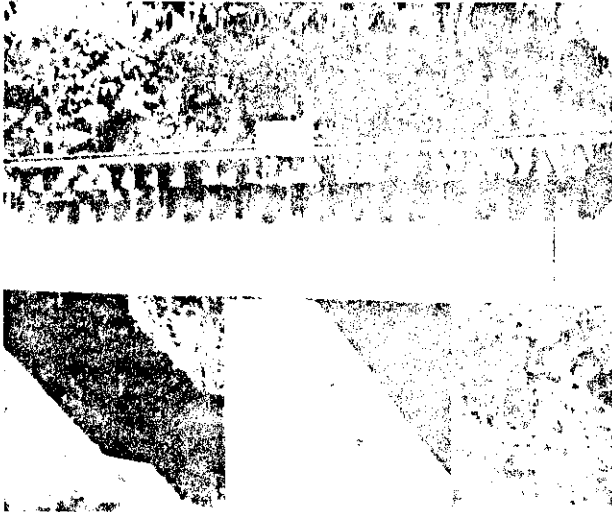


Foto V.1- Pilar intermediário de concreto armado.



Foto V.2- Apoios intermediários arco inferior e colunetas.



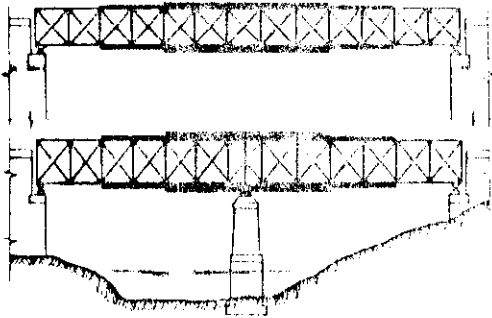
Foto V.3- Pilar pendular



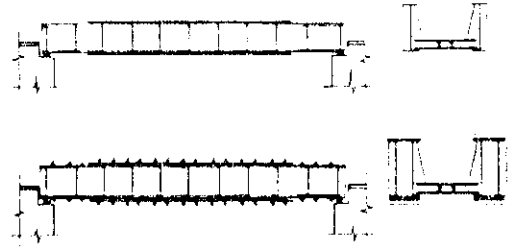
Foto V.4- Apoios intermediários sobre pórticos.

Na Figura V.6 apresenta-se esquematicamente alguns exemplos de pontes reforçadas.

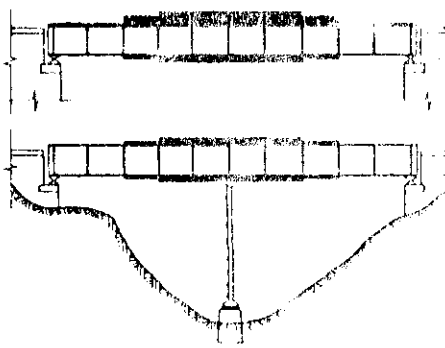
REFORÇO COM PILAR CENTRAL  
VIGA CONTÍNUA



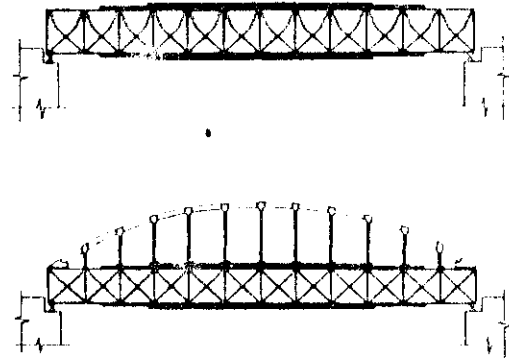
REFORÇO POR ADIÇÃO DE VIGAS



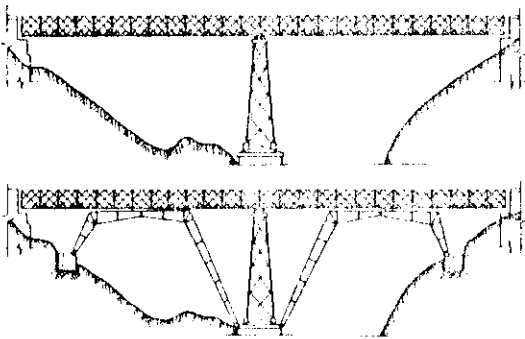
REFORÇO COM PILAR CENTRAL PENDULAR  
VIGA CONTÍNUA



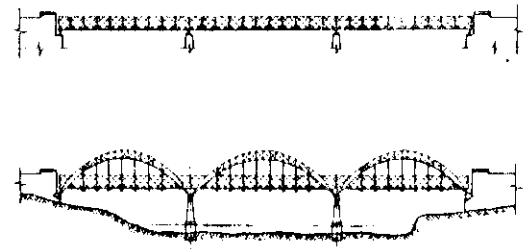
REFORÇO VIGA TRELICADA - ARCO SUPERIOR BI-ARTICULADO



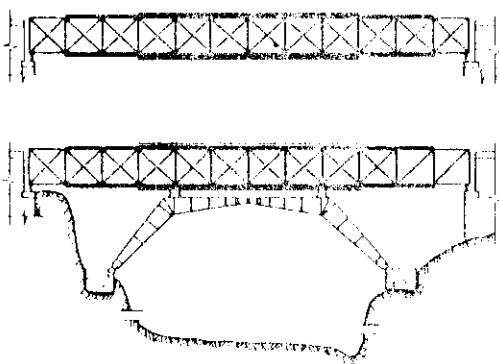
REFORÇO ARCO TRIARTICULADO INFERIOR  
EM VIGA CONTÍNUA



REFORÇO EM VIGA CONTÍNUA COM ARCOS  
SUPERIORES ARTICULADOS



REFORÇO COM ARCO TRIARTICULADO INFERIOR



REFORÇO VIGA ARMADA • PILARES ARTICULADOS  
Viaduto SINIMBÚ

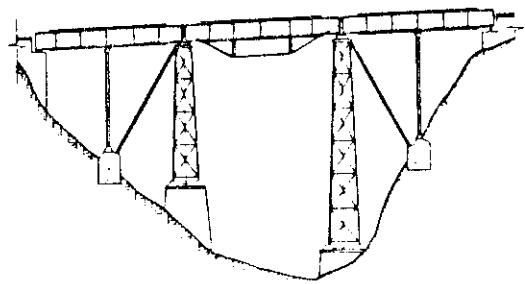


Figura V.6 - Exemplos de reforço em pontes com alteração do esquema estático



## V.6- Utilização de Cabos para Reforço ou Aumento da Capacidade das Pontes

Os elementos pré-tensionados<sup>3</sup> (protendidos) para o reforço ou aumento da capacidade das pontes foi muito utilizada nas últimas décadas. É um sistema eficiente para a recuperação ou aumento de capacidade de pontes existentes.

Uma das primeiras pontes reforçadas com cabos data do século 19. Era constituída de vigas de madeira e foi reforçada com barras de ferro fundido (viga armada).

No Brasil, destaca-se o trabalho do Eng. Oscar Machado da Costa que projetou reforços em várias pontes na década de trinta. Várias destas pontes foram reforçadas utilizando-se cabos (vigas armadas) com grande sucesso. Estas pontes encontram-se em operação até a presente data e em especial as pontes ferroviárias do trecho Curitiba - Paranaguá.

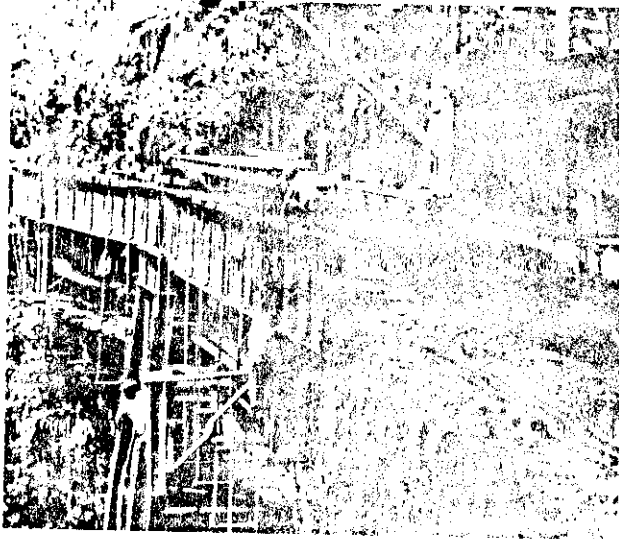
As fotos V.5 e V.6 ilustram uma das pontes reforçadas pelo referido engenheiro, que foi objeto de uma prova de carga, cujos resultados e comentários estão relatados no Capítulo VI deste trabalho.

É interessante ressaltar que os estudos relativos à protensão em estruturas de aço tiveram um desenvolvimento significativo após a década de 50. Isto deve-se também ao desenvolvimento do projeto e execução de estruturas em concreto protendido.

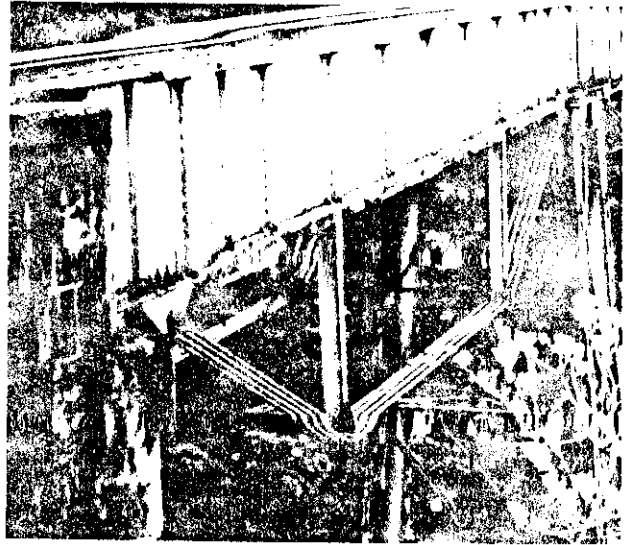
Paralelamente a este avanço, os cabos passaram também a ser mais utilizados no aumento da capacidade de pontes existentes.

3

Utilizar-se-á os termos pré-tensão ou protensão de maneira indistinta.



*Foto V.5- Reforço da ponte em construção - Viga Armada. Projeto e execução Engo. Machado da Costa. (1932)*



*Foto V.6 - Foto atual da ponte reforçada por viga armada. Ferrovia Curitiba-Paranaguá.*

Na Tabela V.1, a seguir, apresenta-se uma série de exemplos de pontes reforçadas com cabos com o objetivo de demonstrar a versatilidade deste tipo de reforço.

Nesta Tabela apresenta-se uma descrição sucinta de cada ponte, o vão, os objetivos do reforço e um esquema de cada ponte.

Tabela V.1- Exemplos de Pontes Reforçadas - Protensão

| DESCRIÇÃO DA PONTE  | VÃO (m) | LOCAL                             | ANO FSB | ANO REI | OBJETIVOS DO REFORÇO  | ESQUEMA DA PONTE | CONSERVAÇÕES  |
|---|---------|-----------------------------------|---------|---------|---|------------------|---|
| (1) Ponte rodoviária em treliça-ferro fundido (Lattice Girder) quatro tirantes por treliça  | 45,30   | Rio Wye<br>Mormouth<br>Inglaterra | 1876    | 1907    | Recuperação devido a corrosão e reforço da seção transversal do tabo inferior     |                  | Quatro vão com duas treliças principais   |
| (2) Ponte rodoviária em treliça de bancos paralelos-ferro fundido<br>Dois tirantes por treliça  | 47,00   | Arwangen<br>Suíça                 | --      | 1920    | Reforço devido ao aumento do tráfego devido a deslocamentos                       |                  | Treliça cantoneira - Dois tirantes  |
| (3) Ponte rodoviária em treliça tipo Warren dupla<br>1 tirante por treliça encastelado por concreto   | 24,40   | Agognetta<br>Italia               | --      | 1934    | Recuperação devido a corrosão e reforço para aumento do tráfego                   |                  | Treliça simplesmente apoiada  |
| (4) Ponte rodoviária em treliça tipo Pratt<br>banco superior com altura variável<br>8 tirantes por treliça  | 35,00   | Birmingham<br>Inglaterra          | 1900    | 1930    | Recuperação devido a corrosão e reforço para aumento do tráfego                   |                  | Treliça simplesmente apoiada  |
| (5) Ponte rodoviária em viga de alma cheia rebitada - um tirante por viga   | 10,00   | Westchaska<br>Minnesota<br>EUA    | 1929    | 1970    | Reforço provisório para aumento do tráfego para previsão de substituição da ponte |                  | Reforço provisório das vigas utilizando blocos de madeira no meio do vão (apoiado do tirante) |
| (6) Ponte ferroviária viga de alma cheia soldada tabuleiro inferior com duas linhas de cabos de protensão GTM (6500KN) por viga encastelados por concreto | 21,00   | Argenteuil-<br>Juvisy<br>França   | 1934    | 1994    | Recuperação e reforço devido a fadiga da mesa inferior                            |                  | Reforço foi realizado em várias pontes similares a esta                                       |

Tabela V.1- Exemplos de Pontes Reforçadas - Protensão










| DESCRIÇÃO DA PONTE  | VÃO (m) | LOCAL                                     | ANO FAB. ATU. | OBJETIVOS DO REFORÇO  | ESQUEMA DA PONTE   | OBSERVAÇÕES   |
|---|---------|---|---------------|---|--|---|
| (7) Ponte rodoviária em treliça tipo Pratt com banços paralelos 4 tirantes externos ao banço interior   | 84,00   | Bystol, Rússia<br>URSS                    | 1930          | Reforço devido ao aumento do trem-tipo e substituição do tabuleiro de madeira por concreto armado                               |    | Reforço com tirantes no banço inferior (comprimente parcial e na "primária" diagonal)   |
| (8) Ponte ferroviária em treliça tipo Pratt banço superior com altura variável "trigida" em cantoneiras | 42,00   | Bucaresta-Petesti<br>Romenia              | --            | Reforço para aumento do trem-tipo com ajuste da dimensão do tirante realizado no campo  |    | Protensão obtida por deformações no tirante com o aumento de temperatura. O vapor gerado pela máquina foi injetado em tubo que envolvia o tirante |
| (9) Ponte ferroviária em viga de alma cheia um tirante de dupla cantoneira sob cada viga                | 18,27   | Rio Sabar<br>Romenia                      | 1964          | Reforço para o aumento do trem-tipo   |    | Protensão por aumento de temperatura no tirante   |
| (10) Ponte ferroviária em viga de alma cheia tirantes em dupla cantoneira e reforço na mesa superior    | 20,40   | Ostrava<br>Tcheco-Eslôvaquia              | 1954          | Reforço para o aumento do trem-tipo   |   | Ponte esbelta. Protensão por aumento de temperatura no tirante  |
| (11) Viaduto rodoviário em viga mista tirantes internos e mesa inferior                                 | 21,04   | Tulone<br>California<br>EUA               | 1962          | Reforço para o aumento do trem-tipo   |  | Viga simplesmente apoiada com tabuleiro em concreto armado  |
| (12) Ponte rodoviária reforço das longarinas na região de momento negativo                              | 10,50   | Rio Pitt<br>Shastake<br>California<br>EUA | 1974          | Recuperação completa da ponte e reforço na região de momento negativo com cabos e juntivo da seção transversal da mesa inferior |  | Longarinas reforçadas e aumento na largura da ponte. A mesa inferior foi reforçada com adição de chapas   |

Tabela V.1- Exemplos de Pontes Reforçadas - Protensão

| DESCRIÇÃO DA PONTE   | VÃO (m)                         | LOCAL   | ANO FAB. | ANO REC. | OBJETIVOS DO REFORÇO   | ESQUEMA DA PONTE  | OBSERVAÇÕES  |
|--|---------------------------------|---|----------|----------|--|---|--|
| (13) Ponte rodoviária contínua nas longarinas simplesmente apoiadas                      | --                              | Alemanha  | --       | 1950     | Redução das deformações das longarinas obtida pela contínuidade  |  | CONTINUIDADE DAS LONGARINAS SOBRE AS TRANSVERSÁRIAS                          |
| (14) Viaduto rodoviário com vigas mistas e tramos contínuos                              | 12x7<br>36,60<br>65,10<br>45,10 | Viaduto<br>Riverside<br>Yorkshire<br>Inglaterra | 1967     | 1969     | Adequação da capacidade existente às novas terminações da Norma Inglesa BS-5400 reforço por cabos nos dois vãos centrais |  | Três pares de cabos por terminação com comprimentos diferentes               |
| (15) Ponte rodoviária viga de seção caixa contínua reforço na região de momento negativo | --                              | Rio Clyde<br>Glasgow<br>Escócia                 | 1971     | 1976     | Reforço para adequação às novas recomendações da Norma Inglesa BS-5400   |  | Dito tirantes de comprimento variável por alma na região de momento negativo |

### V.6.1- Aspectos Gerais do Projeto de Reforços com Cabos

A utilização de cabos (tirantes), protendidos ou não, como método de reforço tem a particularidade de permitir o aumento da capacidade resistente da ponte à flexão, força cortante ou mesmo alguns efeitos da torção. São várias as possibilidades na disposição de cabos como reforço e a Figura V.7 ilustra alguns exemplos.

Apresentam-se , a seguir, alguns comentários sobre a Figura V.7.

A configuração com cabo reto no eixo da viga (a) somente gera esforços axiais de compressão. O cabo excêntrico (b) introduz na estrutura momentos negativos e esforços axiais de compressão. É possível variar independentemente momentos fletores e força axial em função da excentricidade do cabo.

A configuração poligonal (c) e (d) introduz, além do momento fletor e força normal a força da cortante. A variação do momento fletor também pode ser "controlada" em função da excentricidade.

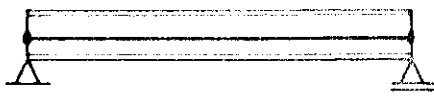
Para pontes em treliça é possível também adequar a posição do cabo ao tipo de solicitação externa desejada ou a necessidade de reforço de um elemento.

No item (e) está esquematizado uma viga armada com excentricidade. Esta mesma solução pode ser adotada vinculado-se os cabos no eixo da viga.

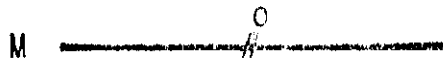
Uma treliça com reforço no banzo superior associado a um cabo poligonal vinculado no meio do vão está esquematizada no item (f).

O item (g) esquematiza o reforço do banzo inferior de uma treliça com cabo reto e o item (h) um cabo poligonal disposto no banzo inferior.

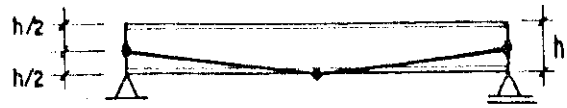
a) CABO RETO - eixo da viga



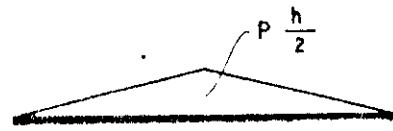
$N = P$        $V = 0$



b) POLIGONAL



$N e V$



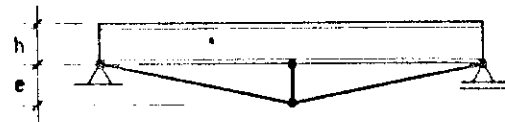
c) CABO RETO - excêntrico



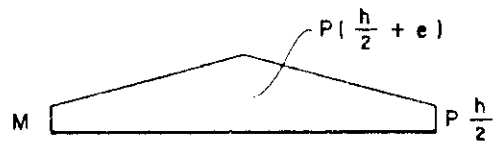
$N = P$        $V = 0$



d) POLIGONAL EXCÊNTRICO

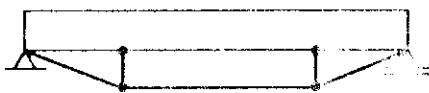


$N e V$

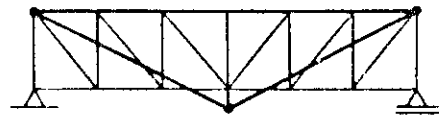


- OUTROS EXEMPLOS -

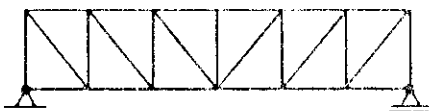
e) VIGA ARMADA



f) TRELIÇA ARMADA



g) CABO RETO - TRELIÇA



h) CABO POLIGONAL - TRELIÇA

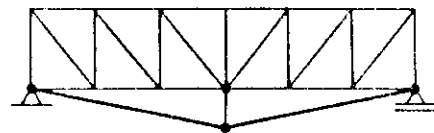


Figura V.7- Exemplos de utilização de cabos como elemento para reforço de pontes.

Com as várias configurações do cabo é possível introduzir solicitações externas, contrárias as existentes,

com intensidades adequadas para cada caso em particular. Reside nestas várias configurações a versatilidade na utilização dos cabos como reforço estrutural, associada à facilidade de execução.

Em contrapartida, os efeitos locais gerados pela aplicação da força de protensão devem ser cuidadosamente analisados nos pontos de ligação dos cabos. Como exemplo, pode-se citar a concentração de tensões nas regiões dos consolos, problemas devido à fadiga, efeitos localizados da força cortante, etc.

As principais verificações de cálculo quando da utilização de cabos como reforço estão abaixo relacionados:

a) Determinação dos momentos máximos para carga permanente, carga móvel, ação do vento; considerar os efeitos do impacto, frenagem, força centrífuga, etc.;

b) Determinação das tensões com base no projeto da estrutura existente;

c) Cálculo das forças externas necessárias para que as tensões introduzidas reduzam aquelas geradas pela carga permanente. O cálculo das tensões introduzidas pela protensão devem considerar as excentricidades do cabo e do consolo de ancoragem;

d) Verificação das tensões geradas pela força de protensão em todos os elementos da ponte para o estado em vazio (somente carga permanente) e em serviço;

e) Garantir a estabilidade lateral nas mesas de perfis ou nos elementos de treliça que, devido à força externa aplicada, passam a ser comprimidos. Reexame do sistema de contraventamento da ponte (quer para viga de alma cheia, quer para treliças);

f) Utilizar fatores de minoração ou majoração da força externa aplicada de acordo com os efeitos gerados. Os valores destes coeficientes devem ser adotados em função do método de dimensionamento utilizado (tensões admissíveis ou estados limites).



g) Verificação das tensões localizadas geradas no consolo de ancoragem dos cabos. Enrijecedores devem ser projetados para melhor distribuir estas tensões;

h) Verificação das tensões nos elementos da ponte em que o consolo é fixado, verificação da resistência, flambagem local e fadiga;

i) O projeto do sistema de ancoragem deve ser tal que permita a execução com espaço suficiente, seja de fácil inspeção visual, manutenção e permita uma proteção adequada contra a corrosão;

j) É necessária a verificação das tensões para as várias etapas da protensão. O projeto deve prever todos os procedimentos e etapas necessárias bem como o tipo de aparelho a ser utilizado para o monitoramento da força aplicada.

Os principais aspectos relativos à execução e manutenção observados e compilados na bibliografia estão abaixo relatados.

A execução dos consolos de ancoragem e os procedimentos da execução de protensão são relativamente simples quando o projeto foi bem elaborado, não apresentando maiores problemas.

O acompanhamento da força aplicada é normalmente realizado utilizando os manômetros dos próprios macacos hidráulicos ou por células de carga. Na maioria dos exemplos recém executados há o acompanhamento das deformações nos tirantes e nos elementos principais da ponte. As medidas de deformação são realizadas através de extensômetros elétricos de resistência.

Quanto ao aspecto manutenção<sup>4</sup> nenhuma observação digna de nota é comentada nos principais trabalhos pesquisados. A

4 \_\_\_\_\_  
MANCARTI, D.G. em seu trabalho "Strengthening California's steel bridges by prettressing", relata que os engenheiros responsáveis pela inspeção e manutenção de pontes rodoviárias da Califórnia, reforçadas por tirantes. (pré-tensionados) não observaram nenhum problema nestas pontes. Período de observação foi de cinco anos.

preocupação maior reside no efetivo desempenho dos tirantes (em especial os cabos de aço) no aspecto corrosão.

#### V.6.2- Informações Gerais para o Dimensionamento de Vigas Reforçadas com Cabos Protendidos

Apresentam-se, a seguir, alguns dados relativos ao dimensionamento e principais verificações necessárias para o reforço de vigas com cabos protendidos.

O modelo desenvolvido é para uma viga simplesmente apoiada com reforço constituído de cabos retos.

A utilização de cabos retos com comprimento inferior ao da viga apresenta algumas vantagens tais como: facilidade de execução devido ao acesso fácil à viga existente, rapidez na execução da ligação consolo-viga, possibilidade de inspeção visual e facilidade de manutenção.

As deduções serão desenvolvidas no regime elástico e com considerações que possam ser utilizadas quer para o dimensionamento pelo método das tensões admissíveis (Normalização americana. AASHTO para pontes rodoviárias ou AREA para pontes ferroviárias) quer pelo método dos estados limites (Normalização Inglesa - BS 5400, Tcheco-Eslováquia e Russa).

É interessante ressaltar que na bibliografia pesquisada somente uma norma específica foi encontrada sobre estruturas de aço protendida: Norma OM 73-1405 da Tcheco-Eslováquia. Não se tem conhecimento da existência de normalização destas estruturas em outros países.

#### V.6.3- Análise das Tensões em Vigas Reforçadas por Cabos Protendidos

Como já explicitado anteriormente, todas as considerações e verificações serão desenvolvidos para o regime elástico. A viga a reforçar é suposta simétrica em relação aos dois eixos principais de inércia.

A Figura V.8 ilustra as condições iniciais do problema, ou seja, uma viga simplesmente apoiada submetida a um

carregamento uniformemente distribuído ( $q$ ) e protendida com uma força ( $P$ ) excêntrica em relação ao eixo da viga ( $e$ ).

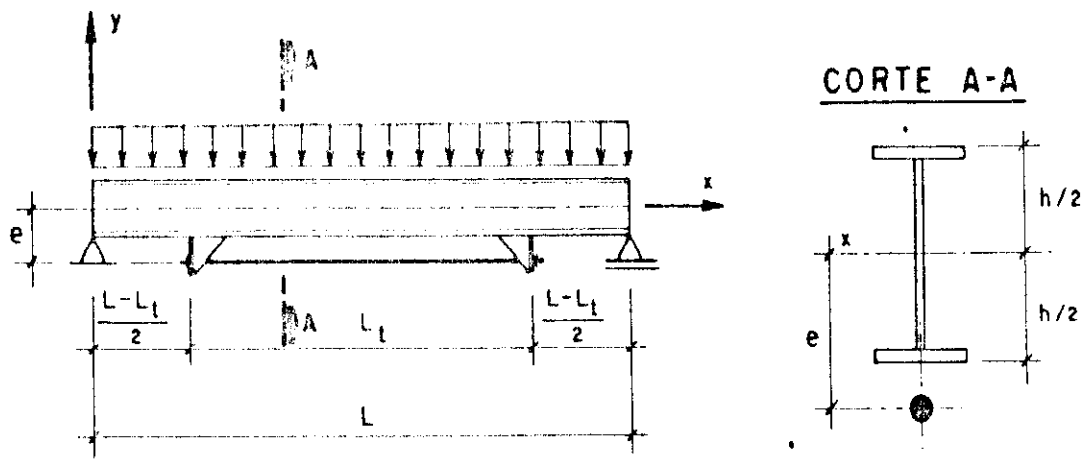


Figura V.8- Características gerais da viga com reforço com cabo protendido.

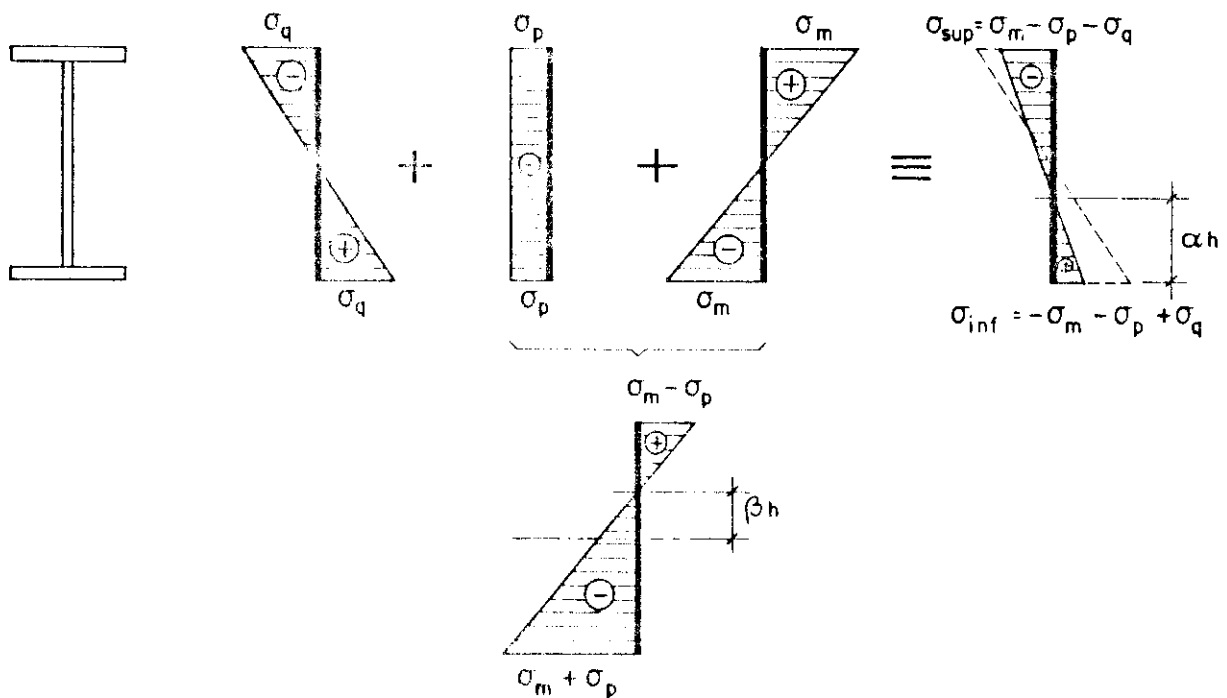


Figura V.9- Diagramas de tensões devidas à carga permanente e à força de protensão na viga.

A formulação a seguir procura apresentar não só as condições necessárias para o dimensionamento do reforço mas também as principais informações para direcionar o

ante-projeto quanto à força de protensão a aplicar, comprimento e posição do tirante. A variação das tensões na viga a reforçar dependerá destas variáveis.

A Figura V.9 ilustra os diagramas da tensão normal ( $\sigma$ ) para uma seção da viga localizada entre os consolos, onde:

$$\sigma_q = \frac{M}{W} \quad \text{tensão devido à carga } q$$

$$\sigma_p = \frac{P}{A_g} \quad \text{tensão devido à força de protensão } P$$

$$\sigma_m = \frac{Pe}{W} \quad \text{tensão devido ao momento da força de protensão } P$$

sendo a nomenclatura para as tensões:

$\sigma_{sup}$  tensão resultante na fibra externa da mesa superior

$\sigma_{inf}$  tensão resultante na fibra externa na mesa inferior

$\alpha$  coeficiente, posição final da linha neutra

$\beta$  coeficiente, posição da linha neutra para a protensão

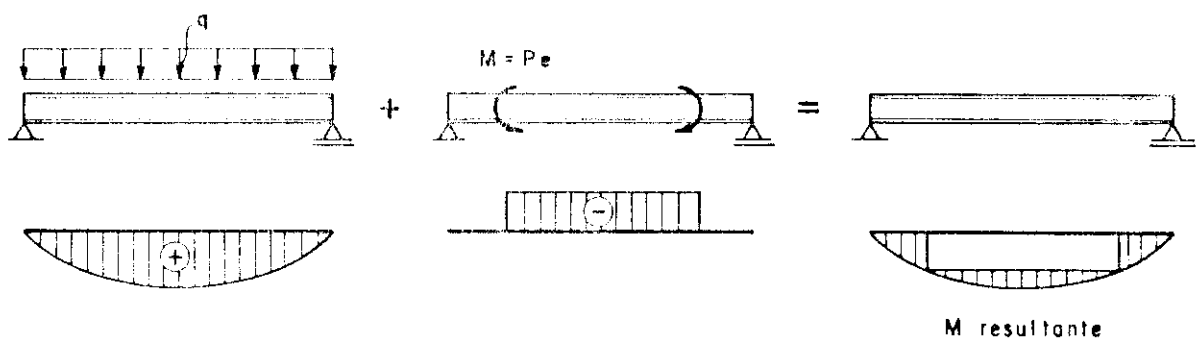


Figura V.10- Diagrama esquemático dos momentos fletores

A Figura V.10 esquematiza os diagramas do momento fletor devido à carga uniformemente distribuída e devido à força de protensão aplicada excêntrica em relação ao centro de gravidade da viga.

As tensões resultantes podem ser assim escritas:

$$\sigma_{sup} = \sigma_m - \sigma_p - \sigma_q \quad (5.1)$$

$$\sigma_{inf} = -\sigma_m - \sigma_p + \sigma_q \quad (5.2)$$

É possível sobrepor ao carregamento distribuído uma carga accidental, por exemplo, o trem tipo de uma ponte ferroviária. Este novo carregamento irá gerar tensões normais que em nada afetarão a análise a ser desenvolvida. É válido, no caso, o princípio da superposição de efeitos.

Pode-se supor que a seção de sollicitação máxima é a do meio vão ou seja  $x = 0,5L$ .

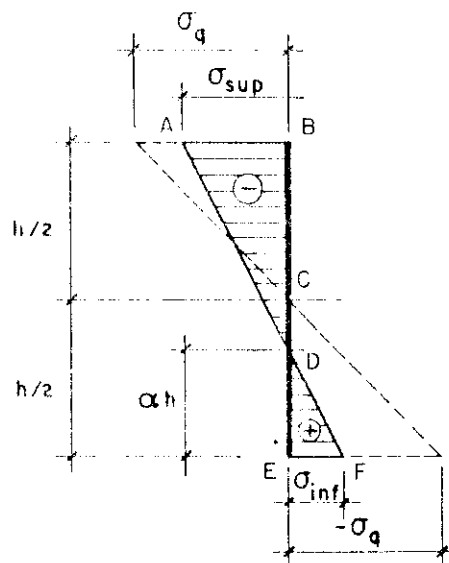


Figura V.11- Diagrama de tensões resultantes devido a carga q e protensão.

A tensão resultante superior  $\sigma_{sup}$  pode ser expressa em função de  $\sigma_p$  e  $\sigma_{inf}$ , através da relação obtida no diagrama final de tensões (Figura V.11).

A relação entre triângulos permite obter

$$h \rightarrow \sigma_{inf} + \sigma_{sup}$$

$$h/2 \rightarrow \sigma_{inf} + \sigma_p$$

O que resulta em

$$\sigma_{sup} = 2\sigma_p + \sigma_{inf} \quad (5.3)$$

Da análise da sobreposição entre o diagrama de tensão devido a carga (q) e o diagrama resultante (Figura V.11), pode-se estabelecer a relação entre triângulos e obter:

$$\begin{aligned} h/2 &\rightarrow \alpha h \\ \sigma_q &\rightarrow (\sigma_q - \sigma_{inf}) \end{aligned}$$

O que permite escrever a equação abaixo:

$$\sigma_{inf} = \sigma_q (1 - 2\alpha) \quad (5.4)$$

A expressão (5.4) permite avaliar a posição da linha neutra em função das tensões introduzidas pela força de protensão. Nesta análise as variáveis envolvidas são diversas como por exemplo: o comprimento do tirante a adotar, o valor da excentricidade (e) do tirante e a determinação do efeito da auto-protensão no tirante decorrente da carga móvel (a estrutura viga e tirante é hiperestática).

Pode-se analisar a posição da linha neutra variando o parâmetro  $\alpha$ . A tensão máxima em qualquer fibra está limitada à tensão de escoamento ( $f_y$ ).

a) mesa inferior tracionada:

$$0 < \alpha < 0,5 \longrightarrow 0 < \sigma_{inf} < \sigma_q \quad \text{tração}$$

b) tensão nula na mesa inferior:

$$\alpha = 0,5 \longrightarrow \sigma_{inf} = 0$$

c) Compressão na mesa inferior:

$$0,5 < \alpha \longrightarrow \sigma_{inf} \quad \text{compressão}$$

d) Posição limite de linha neutra: (Equação 5.4)

$$\sigma_{\text{inf}} = -f_y \longrightarrow \alpha = 0,5(1 + \frac{f_y}{\sigma_q})$$

Portanto, o parâmetro  $\alpha$  já permite ao calculista definir o tipo de comportamento que deseja: inversão ou não das tensões na mesa inferior da viga a reforçar.

O comprimento do tirante a ser fixado está diretamente relacionado à solicitação na seção transversal onde será fixado.

São as tensões nesta seção que limitarão o comprimento mínimo do tirante em função da carga externa aplicada.

A seguir, apresenta-se uma metodologia que permitirá definir, em primeira aproximação, o comprimento do tirante em função de uma carga uniformemente distribuída. Este carregamento pode incorporar as cargas permanentes e acidentais.

Fica estabelecido como limite a tensão de escoamento ( $f_y$ ) na seção mais solicitada. A máxima tensão de compressão na mesa inferior admite-se como a de escoamento.

Portanto tem-se dois limites para as tensões:

- para a viga, na seção em que o tirante está vinculado;
- para a viga, na seção onde o momento é máximo para o estado em vazio (inversão máxima das tensões devido à força de protensão).

Para um ponto qualquer de ordenada (x), a tensão na mesa inferior é limitada a:

$$\sigma_{\text{inf},x} = -f_y$$

Portanto pode-se reescrever:

$$\sigma_{\text{inf},x} = \sigma_{q,x} - \sigma_m - \sigma_p \longrightarrow -f_y = \sigma_{q,x} - \sigma_m - \sigma_p \longrightarrow$$

$$f_y + \sigma_{q,x} = \sigma_m + \sigma_p \quad (5.5)$$

Para a seção no meio do vão ( $x = \ell/2$ ) obtém-se:

$$\sigma_{inf} = -\sigma_m - \sigma_p + \sigma_q \quad (5.6)$$

Igualando as equações (5.4) e (5.6)

$$\sigma_q (1 - 2\alpha) = -\sigma_m - \sigma_p + \sigma_q \quad (5.7)$$

As tensões devido a protensão são:

$$\sigma_m + \sigma_p \quad (5.8)$$

Substituindo  $\sigma_m + \sigma_p$  em (5.7) obtém-se:

$$\sigma_q - 2\alpha\sigma_q = - (f_y + \sigma_{q,x}) + \sigma_q \quad (5.9)$$

Rearranjando a equação acima obtém-se:

$$\sigma_{q,x} + f_y = 2\sigma_q\alpha \quad (5.10)$$

sendo que:

$$W\sigma_{q,x} = \left(\frac{q\ell x}{2} - \frac{qx^2}{2}\right) \quad (5.11)$$

$$\sigma_q = \frac{\frac{q\ell^2}{8}}{W} \quad \text{tensão máxima devido à carga } q \quad (5.12)$$

$$f_y = \frac{\frac{q_y \ell^2}{8}}{W} \quad \text{tensão de plastificação} \quad (5.13)$$

Multiplicando (5.10) pelo módulo de resistência (W) e rearranjando obtém-se:

$$x^2 - \ell x + \frac{\ell^2}{4} \left(2\alpha - \frac{q_y}{q}\right) \quad (5.14)$$

Portanto as raízes da equação (5.14) determinarão a posição do afastamento máximo do consolo que irá resultar na condição de tensão máxima na mesa inferior igual a tensão de escoamento ( $f_y$ ).



Das equações (5.12) e (5.13).

$$\frac{q_y}{q} = \frac{f_y}{\sigma_q} \quad (5.15)$$

Substituindo na equação (5.14), obtém-se os valores das raízes que determinarão a posição dos consolos.

$$x_1 = 0,5l \left( 1 \pm \sqrt{1 + \frac{f_y}{\sigma_q} - 2\alpha} \right) \quad (5.16)$$

A equação (5.16) tem como valores incógnitos o parâmetro  $\alpha$  e a relação entre a tensão devido à carga acidental ( $\sigma_q$ ) e a tensão de escoamento ( $f_y$ ).

É possível obter, a partir da relação  $f_y/\sigma_q$  previamente definido pelo calculista, a posição da linha neutra em função do comprimento do tirante.

Fixado o comprimento do tirante e a "taxa de trabalho" para a tensão ( $\sigma_q/f_y$ ) é possível determinar a força de protensão no tirante. Igualando as equações (5.2) e (5.4):

$$-\sigma_m - \sigma_p + \sigma_q = \sigma_q(1-2\alpha)$$

rearranjando e substituindo:

$$\sigma_m = \frac{Pe}{W} \quad e \quad \sigma_p = \frac{P}{A_g}$$

obtém-se:

$$P = 2\alpha\sigma_q A_g \left( \frac{W}{A_g e + W} \right) \quad (5.17)$$

Pode-se definir o parâmetro adimensional

$$\gamma = \left( \frac{W}{A_g e + W} \right) \quad (5.18)$$

Este parâmetro pode ser avaliado a partir das relações recomendadas entre altura do perfil, largura e espessura da

mesa, altura e espessura da alma.

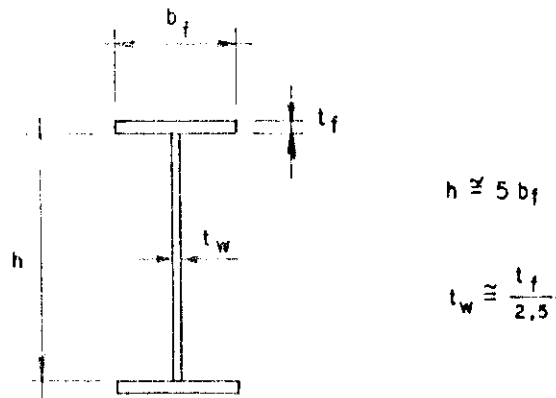


Figura V.12- Relações mais comuns em perfis de vigas de pontes

As relações indicadas na Figura V.12 são as comumente recomendadas para o dimensionamento de vigas de ponte.

Com base nestas relações é possível calcular a área e o módulo de resistência:

$$A_g = 2(b_f t_f) + t_w h$$

substituindo a altura (h) e a espessura da alma ( $t_w$ ), obtém-se:

$$A_g = 4 b_f t_f \tag{5.19}$$

$$I = 2(b_f t_f) \left(\frac{h}{2}\right)^2 + \frac{t_w h^3}{12}$$

Substituindo  $t_w$ :

$$I = \frac{2}{3} b_f t_f h^2$$

Portanto, o módulo de resistência

$$W = \frac{4}{3} b_f t_f h \tag{5.20}$$

Substituindo (5.19) e (5.20) em (5.18):

$$\gamma = \frac{\frac{4}{3} t_w h}{4 e t_w + \frac{4}{3} t_w h} \quad (5.21)$$

Com o valor da excentricidade (e) como função da altura do perfil (h), calcula-se aproximadamente o parâmetro  $\gamma$ .

|          |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| e        | 0,5h  | 0,6h  | 0,7h  | 0,8h  | 0,9h  | 1,0h  | 1,5h  |
| $\gamma$ | 0,399 | 0,357 | 0,323 | 0,294 | 0,270 | 0,250 | 0,182 |

A equação (5.17) pode ser reescrita e o valor aproximado da força protensão pode ser rapidamente estimado.

$$P = 2 \alpha \sigma_q A_g \gamma \quad (5.22)$$

Pode-se reescrever o valor de P:

$$P = 2 \alpha \frac{\sigma_q}{f_y} A_g f_y \gamma \quad (5.23)$$

onde a força de protensão passa a ser escrita como função da força normal de plastificação da viga ( $A_g f_y$ ).

A expressão (5.23) permite uma primeira estimativa da força de protensão a aplicar na viga em estudo.

A estrutura viga-tirante tem grau de hiperestaticidade igual a 1. O cálculo estático pode ser feito utilizando-se o processo dos deslocamentos com a força no tirante sendo a incógnita hiperestática.

O carregamento externo aplicado ao conjunto viga tirante introduzirá um acréscimo na força de protensão.

Este acréscimo ( $\Delta P$ ) é denominado auto-protensão e corresponde ao valor da incógnita hiperestática obtida no processo dos deslocamentos.

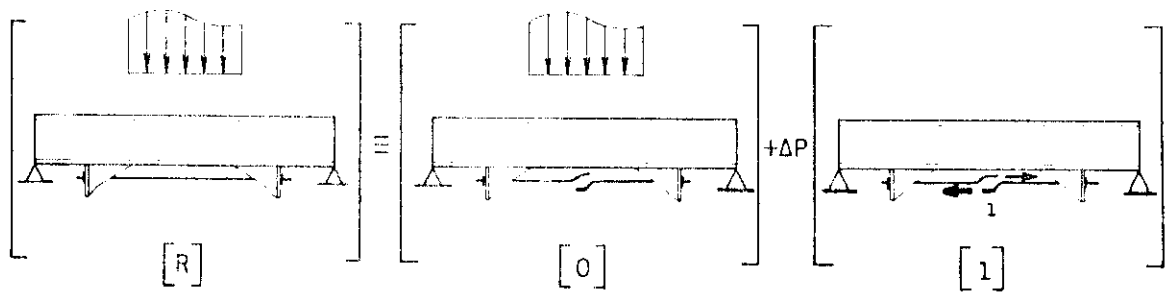


Figura V-13 - Esquema para o cálculo da viga pelo processo dos deslocamentos.

Pode-se então escrever:

$$\delta_{1r} = \delta_{10} + \Delta P \delta_{11} \Rightarrow \delta_{1r} = 0$$

Portanto

$$\Delta P = - \frac{\delta_{10}}{\delta_{11}}$$

onde

$$\delta_{10} = \int_0^{\ell} \frac{M_o m_1}{EI} dx \quad (5.24)$$

$$\delta_{11} = \int_0^{\ell} -\frac{M^2}{EI} dx + \int_0^{\ell} \frac{n_1 n_1}{E A_t} dx + \int_0^{\ell} \frac{n_1 n_1}{EI} dx \quad (5.25)$$

onde

$\delta_{10}$  = deslocamento da estrutura isostática devido ao carregamento;

$\delta_{11}$  = deslocamento da estrutura devido a uma força unitária no vínculo referido (tirante);

$M_o$  = momento na viga isostática devido ao carregamento externo;

$m_1$  = momento na viga isostática devido a força unitária no tirante;

$n_1$  = força unitária no tirante;

Nota: a parcela do deslocamento devida ao esforço normal na viga pode ser desprezada.

Portanto:

$$m_1 = 1 \text{ e } \quad n_1 = 1$$

onde  $e$  = excentricidade do tirante em relação ao eixo da viga.

Apresenta-se, a seguir, o desenvolvimento do cálculo da força de auto-protensão para uma viga carregada com uma carga uniformemente distribuída.

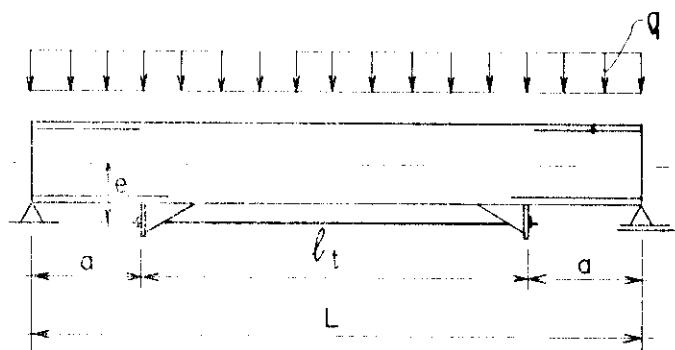


Figura V.14 - Exemplo de viga atirantada com carga uniformemente ditribuída.

O valor do deslocamento  $\delta_{11}$  pode ser calculado por:

$$\delta_{11} = \int_a^{\ell-a} \frac{e \ e}{EI} dx + \int_a^{\ell-a} \frac{1 \ 1}{E A_g} dx + \int_a^{\ell-a} \frac{1 \ 1}{E_t A_t} dx \quad (5.26)$$

Calculando as integrais obtem-se:

$$\delta_{11} = \frac{e^2}{EI} x \Big|_a^{\ell-a} + \frac{1}{EA_g} x \Big|_a^{\ell-a} + \frac{1}{E_t A_t} x \Big|_a^{\ell-a}$$

Substituindo e rearranjando obtem-se:

$$\delta_{11} = \frac{\ell_t}{EI} \left( e^2 + \frac{I}{A_g} + \frac{EI}{E_t I_t} \right) \quad (5.27)$$

O deslocamento  $\delta_{10}$  pode ser calculado por:

$$M_{(x)} = \frac{qlx}{2} - \frac{qx^2}{2} \quad (5.28)$$

onde  $M_{(x)}$  é o momento na ordenada  $x$  devido a carga uniformemente distribuída.

$$m_1 = 1 \text{ e } \quad \text{para } a < x < l-a$$

$$m_1 = 0 \quad \text{para } x < a \text{ e } x > l-a$$

Portanto:

$$\delta_{10} = \int_0^l \frac{\left( \frac{qlx}{2} - qx^2 \right)}{EI} e \, dx \quad (5.29)$$

$$\delta_{10} = \frac{qe}{EI} \left[ \frac{l}{4} x^2 \Big|_a^{l-a} - \frac{x^3}{6} \Big|_a^{l-a} \right]$$

Substituindo-se os limites de integração ( $a$ ) e ( $l-a$ ) e rearranjando obtemos:

$$\delta_{10} = \frac{qe}{12EI} (l^3 - 6a^2l + 4a^3) \quad (5.30)$$

A auto-protensão obtida é:

$$\Delta P = \frac{eql^2}{12 \left[ e^2 + \frac{EI}{E_t A_t} + \frac{I}{A_g} \right]} \frac{(l^3 - 6a^2l + 4a^3)}{[l^2(l - 2a)]} \quad (5.31)$$

Para o cálculo das pontes deve-se considerar que estas são carregadas com cargas móveis. Os trens-tipo, ferroviário ou rodoviário, são constituídos de cargas concentradas e distribuídas.

Para a verificação das tensões na viga e no tirante é necessário considerar a auto-protensão. A força resultante no tirante passa a ser:

$$P + \Delta P \quad (5.32)$$

e na viga a tensões podem-ser obtidas por:

$$\sigma_{\text{sup}} = - \frac{P+\Delta P}{A_g} - \frac{M - (P+\Delta P)e}{W} \quad (5.33)$$

$$\sigma_{\text{inf}} = - \frac{P+\Delta P}{A_g} + \frac{M - (P+\Delta P)e}{W} \quad (5.34)$$

onde M é o momento devido ao carregamento externo considerado na viga isostática.

P é a força de protensão

$\Delta P$  é a auto-protensão

e excentricidade do cabo em relação ao centro de gravidade da viga.

Relacionam-se, a seguir, as verificações necessárias para o dimensionamento de uma viga reforçada por tirantes. Salienta-se que estas verificações devem ser adequadas ao tipo de ponte (ferroviária e rodoviária) e as correspondentes normalizações:

- determinação do comprimento do tirante;
- cálculo de protensão;
- cálculo da auto-protensão;
- verificação da resistência do tirante;
- verificação das tensões na viga para o estado em vazio e em serviço;
- verificação do consolo de ancoragem;
- verificação da flambagem local da mesa inferior para o estado em vazio;
- verificação da perda de estabilidade global da viga para o estado em serviço;
- verificação dos deslocamentos.

Os tipos de fios, cabos e barras utilizados para a protensão de vigas de aço são os mesmos utilizados no concreto protendido.

As adaptações são necessárias somente nos consolos de ancoragem que devem ser detalhados, considerando os dispositivos de ancoragem, devidamente adaptados para o aço

e as limitações geométricas impostas pelos macacos de protensão.

Os coeficientes de minoração e majoração da força de protensão também podem ser os adotados nas recomendações de cálculo para concreto protendido.

É necessário ressaltar somente os cuidados relativos à proteção destes cabos contra os efeitos da corrosão. Esta proteção deverá ser adequada a cada tipo de barra utilizada na protensão.

O sistema de protensão com barras tipo Dywidag apresentam algumas vantagens tais como dispositivos de ancoragem adaptados a consolos de aço, facilidade de manutenção e substituição.

#### V.6.4- Carga Equivalente para Pontes Ferroviárias

Foram deduzidas no item anterior as expressões que permitem obter a força de protensão e o regime de trabalho de vigas reforçadas por tirantes protendidos. Apresenta-se, a seguir, alguns gráficos para obtenção da carga uniformemente distribuída equivalente para as cargas móveis dos vários trens-tipo de pontes ferroviários. Esta carga equivalente produz numa dada seção da viga as mesmas solicitações provenientes do trem-tipo.

Os valores da carga equivalente devem ser utilizadas como um dado preliminar para o ante-projeto e avaliação das tensões nos elementos estruturais.

Os gráficos, apresentados a seguir, estão baseados nos carregamentos indicados na Norma Brasileira NBR- 7189 "Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias" que estabelece o trem-tipo (TB) a serem utilizados em função do tipo da via férrea.

A NBR-7189 estabelece as seguintes classes para o trem tipo:

- TB-360: para ferrovias sujeitas a transporte de minério de ferro ou outros carregamentos equivalentes;
- TB-270: para ferrovias sujeitas a transporte de carga geral;



- TB-240: para ser adotado somente na verificação de estabilidade e projeto de reforço de obras existentes;
- TB-170: para vias sujeitas exclusivamente ao transporte de passageiros em regiões metropolitanas ou suburbanas;

As características geométricas e cargas do trem tipo encontram-se abaixo apresentadas: (Figura V-15)

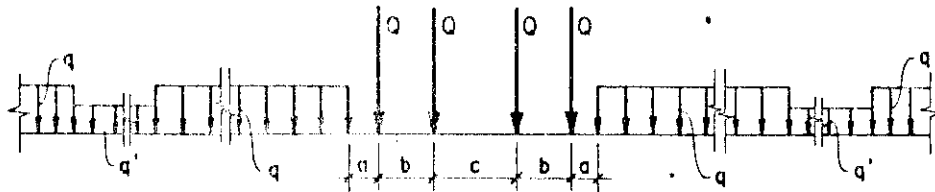


Figura V-15 - Características gerais trem tipo de pontes ferroviárias - NBR 7189

TABELA 2 - CARGAS DOS TRENS TIPO

| TB  | Q (kN) | q (kN/m) | q' (kN/m) | a (m) | b (m) | c (m) |
|-----|--------|----------|-----------|-------|-------|-------|
| 360 | 360    | 120      | 20        | 1,00  | 2,00  | 2,00  |
| 270 | 270    | 90       | 15        | 1,00  | 2,00  | 2,00  |
| 240 | 240    | 80       | 15        | 1,00  | 2,00  | 2,00  |
| 170 | 170    | 25       | 15        | 1,00  | 2,50  | 5,00  |

A norma brasileira faculta, para o caso de verificação ou reforço de obras existentes a utilização do trem padrão operacional. Para o caso de reforço também é necessário que as verificações atendam a um dos trem-tipos regulamentados.

A partir dos trens-tipo definidos na NBR-7189 é possível determinar a carga uniformemente distribuída

equivalente que produz as mesmas solicitações para uma dada seção.

Este procedimento permite simplificar o cálculo e, na fase de ante-projeto, determinar os valores da força de protensão a aplicar em uma viga.

Os gráficos apresentados abaixo representam o valor de carga equivalente para os vários trens-tipo considerando:

-a carga equivalente corresponde ao carregamento móvel total, admitindo-se todos os vagões carregados;

-apresenta-se a carga equivalente correspondente ao momento fletor nas seções da ponte (0,5L; 0,3L; 0,1L) tendo estes comprimentos como referência o apoio esquerdo;

-a carga equivalente é função do vão da viga e da forma da linha de influência variando para cada seção transversal considerada;

É interessante ressaltar que o Prof. Hermann Schulte<sup>5</sup> apresenta este procedimento para os trens-tipo da antiga NB-7 em sua apostila intitulada "Pontes Metálicas".

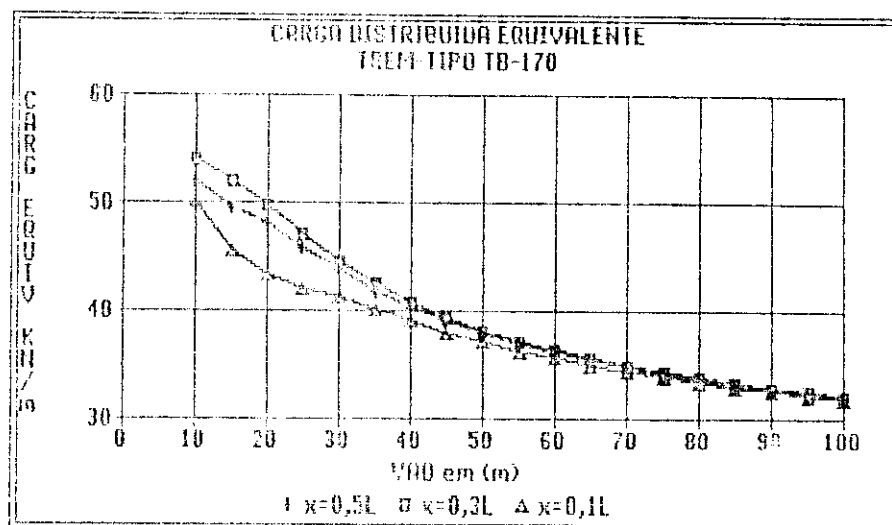


Figura V-16 - Carga distribuída equivalente TB-170

<sup>5</sup> SCHULTE, H. Pontes metálicas. São Paulo: Instituto Mackenzie, s.d.

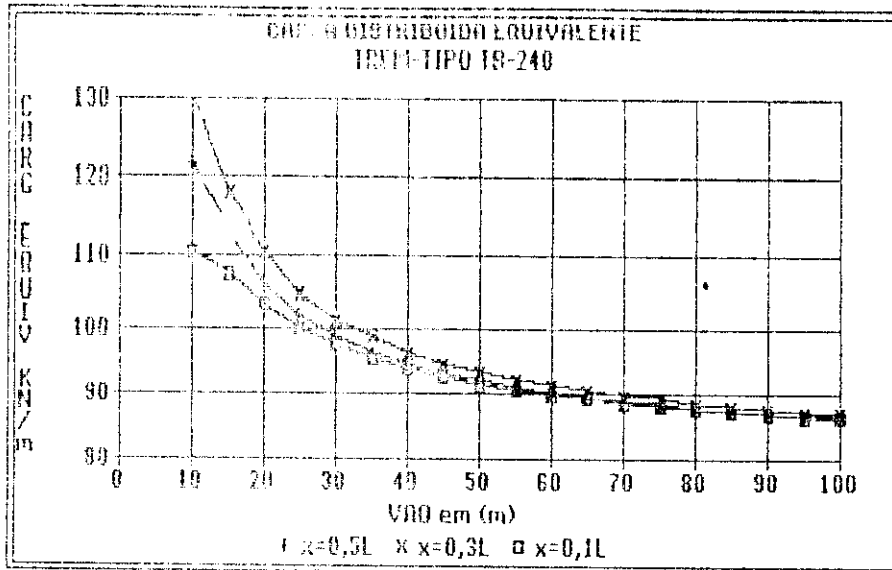


Figura V-17 - Carga distribuída equivalente TB-240

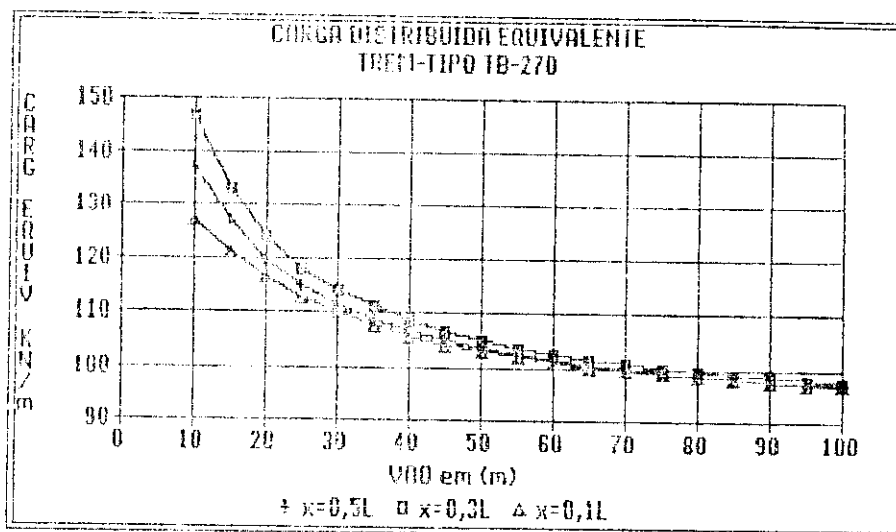


Figura V-18 - Carga distribuída equivalente TB-270

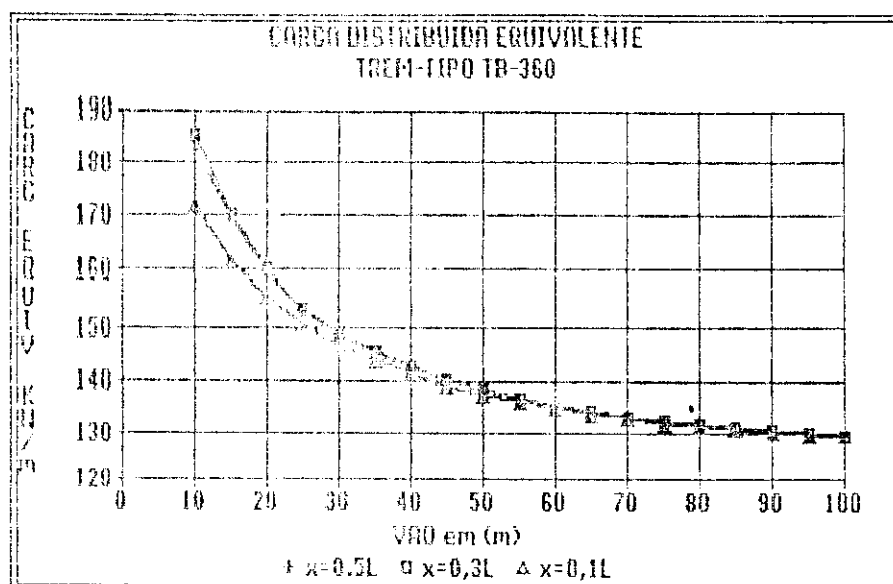


Figura V-19 - Carga distribuída equivalente TB-360

#### V.7- Conclusões

A descrição, mesmo que sucinta, dos principais procedimentos destinados ao reforço ou aumento da capacidade de pontes, apresentados neste capítulo, foi realizada no intuito de permitir ao leitor uma visão global de todas as principais soluções possíveis de serem adotadas.

Pode-se concluir que os sistemas de reforços, anteriormente relatados (redução da carga permanente, viga mista, aumento da rigidez transversal, aumento da seção de elementos, alteração do esquema estático, utilização de cabos ou barras protendidos), destinados também a aumentar a capacidade das pontes deve ser tal que a solução adotada atenda as particularidades de cada projeto.

É sempre interessante ressaltar que as experiências anteriores devem ser analisadas e avaliadas pois nem sempre o melhor projeto idealizado na prancheta corresponde a melhor solução ao longo da vida útil da ponte. Vários

fracassos redundantes neste campo produziram outras tantas excelentes soluções e a "história" dessas recuperações deve ser necessariamente incorporada à formação dos engenheiros responsáveis pelo projeto e execução de reforços em pontes.

Pode-se também afirmar, com base em exemplos desenvolvidos no Brasil e no mundo, que a alteração do esquema estático de uma ponte — em geral com o aumento do grau de hiperestaticidade — constitui o principal processo para o aumento da capacidade resistente.

A utilização de elementos adicionais protendidos como reforço estrutural também é uma excelente opção. Para o caso específico das pontes metálicas é recomendável a utilização de barras nestes elementos, pois permitem ancoragens mais adequadas ao material aço, facilitando o detalhamento e execução destes nós. Apresentam maior facilidade na manutenção e também a possibilidade de retirada e reaplicação da protensão — o sistema Dywidag é um bom exemplo.

A experiência de outros países tem demonstrado que a utilização de cabos ou cordoalhas como elementos protendidos para o reforço de pontes de aço tem apresentado alguns aspectos negativos: exigem maiores cuidados na proteção contra a corrosão e dificuldades na sua detecção; no caso de substituição as dificuldades executivas são maiores assim como nos procedimentos da manutenção dos demais elementos da ponte.

Concluindo, salienta-se mais uma vez que os estudos da recuperação ou aumento da capacidade de pontes deve considerar as particularidades de cada projeto, ser adequada as condições locais permitindo sua execução, ser adequada as limitações do tráfego e , evidentemente, economicamente viável.

## CAPÍTULO VI

### AUSCULTAÇÃO E PROVAS DE CARGA

#### VI.1- Preliminares

A auscultação de uma estrutura têm como objetivos principais obter informações sobre o estado geral, o comportamento estrutural ou a avaliação da segurança.

Na falta de normalização específica sobre provas de carga em estruturas de aço, utilizar-se-á a Norma Brasileira NBR-9607, Prova de Carga em Estruturas de Concreto Armado e Protendido. A definição de Prova de Carga encontra-se no item 3.1 "Conjunto de atividades destinadas a analisar o desempenho de uma estrutura através da medição e controle de efeitos causados pela aplicação de ações externas de intensidade e natureza previamente estabelecidas".

A realização de provas de carga em pontes metálicas e em especial nas pontes em operação, tem particularidades que serão discutidas a seguir.

O principal objetivo a ser atingido na realização de provas de carga de pontes em operação é obter informações sobre o comportamento estático e o "caminhamento das cargas". Os resultados obtidos auxiliam o calculista, na compreensão deste comportamento e permitem identificar possíveis "reservas de resistência" decorrentes das redundâncias internas da estrutura e do comportamento

tridimensional, muitas vezes difícil de ser avaliado durante os procedimentos rotineiros de cálculo.

Com a utilização dos computadores no cálculo estrutural e o conseqüente avanço dos métodos analíticos (elementos finitos, elementos de contorno, processos matriciais), os cálculos dos esforços solicitantes passaram a ser realizados baseados em modelos mais próximos da realidade. Estes cálculos numéricos apresentam maior grau de "precisão". A importância da realização de provas de carga deriva da necessária identificação do real "caminhamento das cargas" numa ponte para que a modelagem numérica seja mais representativa da estrutura real.

O Prof. A.S.Nowak<sup>1</sup>, em seu artigo intitulado "Bridge Reliability Evaluation Using Load Tests", expressa com extrema felicidade a necessidade da realização de provas de carga e sua importância. "...Os procedimentos correntes de análise estrutural para os cálculos de tensões e deformações em estruturas complexas são absolutamente corretos. Entretanto, os testes indicam que as pontes resistem aos carregamentos por caminhos diferentes daqueles considerados".

As provas de carga realizadas em pontes com algum tipo de deterioração também fornecem subsídios quanto ao comportamento global da estrutura. Os resultados devem ser cuidadosamente avaliados pelo engenheiro calculista, pois problemas locais podem comprometer a segurança da estrutura.

O carregamento - conjunto de ações externas - deve ser previamente definido para que nenhum dos estados limites últimos sejam atingidos nas provas de carga de pontes em operação.

Pode-se dividir as provas de carga em duas categorias - estática e dinâmica - função do tipo de carregamento utilizado e dos resultados a serem obtidos.

Estão apresentadas nos itens seguintes deste capítulo

<sup>1</sup> NOWAK, A. S., THARNABALA, T. *Bridge Reliability Evaluation Using Load Tests. Journal of Structural Engineering, ASCE, v. 114, n. 10, p. 2268-2279, Oct. 1988*

as principais técnicas utilizadas em ensaios<sup>2</sup>, os principais aparelhos de medição e comentários sobre algumas provas de carga realizadas pelo Laboratório de Estruturas-EESC e em outros países.

## VI.2- Preparação e Objetivos da Prova de Carga

As etapas de preparação de uma prova de carga estão intimamente relacionadas com os objetivos a serem atingidos.

Em geral, a realização de provas de carga está associada à análise do comportamento estrutural das pontes que apresentam deterioração ou deficiências estruturais.

Os altos custos envolvidos na decisão de substituir ou reparar uma ponte, quase sempre, justificam um plano de inspeção e verificação estrutural no qual a prova de carga está inserida.

Por outro lado, a realização de uma prova de carga também envolve custos elevados. Exige a interrupção do tráfego, com o conseqüente custo direto (caso da ferrovia) ou indireto (rodovia). O programa de ensaio deve ser planejado adequadamente, assim como os estudos de viabilidade econômica.

Em contrapartida aos aspectos financeiros alertados no parágrafo acima, os benefícios oriundos de um programa de ensaio em pontes são elevados. No contexto brasileiro, em particular na ferrovia, há a necessidade de recuperação de inúmeras pontes. Existe uma grande quantidade de pontes com as mesmas características (fabricante, idade, tipologia estrutural, dimensões, etc.); este fato deve-se a época e ao processo construtivo utilizado na implantação da ferrovia (importação de pontes, utilização de vãos pré-determinados e adequação do traçado às pontes). Portanto, os resultados obtidos não estão restritos a uma única ponte, podendo ser estendidos a várias.

O programa para o ensaio em uma ponte deve ser

2 \_\_\_\_\_  
Utilizar-se-á ensaio e prova de carga de maneira indistinta.



executado com a máxima acuidade, envolvendo diretamente os engenheiros responsáveis pelo cálculo estrutural, os técnicos e engenheiros responsáveis pelo ensaio e os técnicos de operação e manutenção da ponte.

Os principais pontos de um programa de ensaios - prova de carga - estão abaixo relacionados:

- inspeção preliminar da ponte para a preparação da prova de carga: esta inspeção preliminar deverá ser realizada para que todos os aspectos relativos à instrumentação sejam avaliados pela equipe responsável pela prova de carga. Entre os principais aspectos pode-se citar as condições locais, acesso aos pontos previamente definidos para medições e as condições de trabalho.

Nesta etapa, os cálculos referentes à estrutura da ponte e a definição das medições a serem efetuadas já deverão estar concluídos. É importante o trabalho conjunto do engenheiro calculista e dos técnicos responsáveis pela prova de carga.

- definição do programa de medições: após a inspeção da ponte, os pontos de medição (deslocamentos, deformações, giros) deverão ser efetivamente definidos. As possíveis interferências físicas para a fixação e leitura dos aparelhos já deverão estar equacionadas. Prepara-se um cronograma com as estimativas de horas a serem dispendidas na preparação dos pontos a serem instrumentados bem como a previsão da duração do ensaio em consonância com os engenheiros responsáveis pelo tráfego sobre a ponte.

- equipamentos de medição: a equipe responsável pelo ensaio deverá definir os equipamentos de medição (defletômetros, clinômetros, sistemas de transferência de leituras, indicadores de deformação, termômetros, etc.) em função das medições a serem efetuadas e do tempo disponível para o ensaio. Os principais equipamentos utilizados em provas de carga estão apresentados no item VI.3 deste capítulo.

- estudo das propriedades dos materiais: deverão ser realizados ensaios em laboratório de corpos de prova quando existirem dúvidas sobre as características mecânicas do aço

utilizado na ponte ou por exigência do calculista.

Estes ensaios normalmente consistem na determinação do módulo de elasticidade, tensão de escoamento e ruptura - ensaios mecânicos de corpos de prova padronizados e normalizados. Em outros casos é necessária a realização de ensaios específicos para determinação da composição química dos aços, testes de soldabilidade, testes de dureza, etc..

Os corpos de prova devem ser retirados de elementos estruturais representativos do tipo de aço estrutural da ponte. A escolha destes elementos deve ser feita de forma a não reduzir a capacidade última de barras que compõem o sistema estrutural principal da ponte.

Quando há a necessidade de substituição de um elemento estrutural deteriorado, os corpos de prova podem ser retirados deste elemento.

- medições durante a realização de prova de carga: após a definição dos equipamentos a serem utilizados para a medição é necessário um planejamento detalhado para execução da prova de carga.

Após este planejamento, o pessoal envolvido deve ser devidamente treinado a fim de executar as leituras dos aparelhos para maior confiabilidade das medições.

As condições desfavoráveis à realização da prova de carga, associados ao período disponível de interrupção do tráfego exigem uma eficiente coordenação das operações pelo engenheiro responsável. Há a necessidade de um perfeito entrosamento do pessoal técnico, com definição clara e precisa das funções a serem exercidas por cada elemento da equipe.

- carregamentos: quanto as ações externas a serem aplicadas, convém tecer alguns comentários para as pontes ferroviárias e rodoviárias.

Nas pontes rodoviárias utiliza-se como carga externa um ou mais caminhões carregados com o peso total devidamente conhecido.

O posicionamento deste "trem tipo de ensaio" deverá ser feito em função dos estudos prévios realizados pelo calculista considerando o tipo de medição a ser efetuada.

É recomendável que o "trem tipo de ensaio" seja posicionado de forma a se obter solicitações máximas nos elementos que estão sendo estudados.

O posicionamento destes caminhões deve ser realizado com muita precisão de forma que seja possível interpretar as medidas de deslocamentos, deformações em barras e giros obtidos e estabelecer as devidas correlações com os cálculos efetuados.

Nas pontes ferroviárias utiliza-se uma composição especial como "trem tipo de ensaio", onde o peso das locomotivas e vagões são previamente conhecidos.

O posicionamento deste "trem tipo de ensaio" é facilitado no caso de pontes ferroviárias, pois, somente é necessária a verificação da posição de uma roda. Como no caso anterior, estará previamente definido procurando-se posicioná-lo para as solicitações máximas nos elementos analisados. Este procedimento é utilizado para carregamentos estáticos.

O posicionamento do carregamento externo em uma ponte é um fator extremamente importante nos procedimentos de ensaio assim como o valor nominal do carregamento. A confiabilidade dos resultados obtidos está diretamente relacionada ao carregamento utilizado e seu posicionamento.

Não é recomendável, no caso de pontes ferroviárias, a utilização de composições normais tendo em vista a grande variabilidade no peso de cada vagão e mesmo na distribuição por eixos. Dados de ensaios realizados na França para composição de 100 vagões, indicaram variações da ordem de 15% no peso total, 10% considerando uma fila de rodas e a considerável variação de 22% entre rodas de um mesmo eixo.

Não é possível, na maioria dos casos, carregar a ponte de maneira incremental - em etapas de cargas - o que resultará em resultados únicos de medições para a solicitação máxima em um dado elemento da ponte.

Recomenda-se a realização de medidas de deslocamentos e deformações em todos os pontos analisados para as várias posições do carregamento. Obtém-se vários resultados de medições de deformações para o mesmo elemento estrutural

assim como deslocamentos de toda a estrutura. Este procedimento permitirá uma melhor análise dos resultados e também minimizará possíveis erros de leitura que, evidentemente, não serão considerados.

O tipo de carregamento a ser aplicado irá caracterizar a prova de carga: estática ou dinâmica.

Na prova de carga estática a carga é obtida através do "trem tipo de ensaio" posicionado estaticamente sobre a ponte ou através de macacos hidráulicos apoiados em estruturas especiais.

Na dinâmica, a carga utilizada pode ser o tráfego normal de veículos ou composições, veículos especiais ou mesmo excitadores mecânicos (motores dotados de eixos excêntricos).

Comumente, uma prova de carga com carregamentos dinâmicos tem como objetivo determinar as características dinâmicas da ponte (frequência natural, modo de vibração, amortecimento). Estas informações também irão facilitar a análise do comportamento de toda a estrutura ou de seus elementos quando submetidos às cargas cíclicas - fator importante na análise da fadiga.

A verificação de deformações em elementos estruturais de uma ponte é realizada com frequência. Em alguns casos há necessidade de avaliar o comportamento de pontos específicos da estrutura.

Na recuperação de elementos principais de uma ponte, por adição de novos elementos ou pela utilização de barras protendidas, é recomendável o acompanhamento das deformações no elemento existente e no reforço.

Estas medições permitem avaliar a distribuição da carga móvel entre ambos e também se são compatíveis com os calculados.

O caso em que se aplica uma força externa, no elemento de reforço, de tal modo a gerar deformações da ordem de grandeza do elemento reforçado devido a carga permanente é um bom exemplo onde estas medições são extremamente importantes.

A utilização de cabos como reforço estrutural é

relativamente comum em pontes. Recomenda-se o acompanhamento de medições da força aplicada (através de células de carga) e deformações do reforço e de outros elementos principais da ponte.

### VI.3- Equipamentos de Medição

Os equipamentos a serem utilizados durante um ensaio estão diretamente relacionados ao tipo de estrutura a ser submetida à prova de carga, à precisão necessária ou desejável, duração das observações a serem realizadas e, evidentemente, aos custos diretos e indiretos destes equipamentos.

A confiabilidade nas medições dependerá destes equipamentos e está diretamente relacionada ao grau de treinamento e experiência do pessoal técnico envolvido.

#### VI.3.1- Deslocamentos Lineares

As medições de deslocamentos lineares em ensaios de pontes são de extrema importância pela sua confiabilidade e também por permitir uma comparação do comportamento global da estrutura com os resultados teóricos. Os deslocamentos são utilizados para caracterizar o estado limite de utilização de uma estrutura. Os limites dos deslocamentos são expressos de forma clara nas principais normas técnicas.

Os equipamentos utilizados devem ser escolhidos em função dos valores a serem medidos: amplitude dos deslocamentos, tempo de observação e precisão desejada das medições.

##### VI.3.1.1- Defletômetros ou Relógios Comparadores

São instrumentos onde as medições de deslocamentos lineares são obtidas através de uma haste associada a um sistema de ampliação do deslocamento, transformando-os em deslocamento angular de um ou mais ponteiros.

A utilização destes defletômetros exige uma base fixa

na qual o aparelho é posicionado. A haste é colocada no ponto em que se deseja medir os deslocamentos lineares. Muitas vezes utiliza-se um sistema de transferência do deslocamento - por exemplo um de fio de aço, tensionado por um peso, fixado no ponto de medida - para um ponto de fácil acesso ao operador.

A sensibilidade destes aparelhos varia de 0,1 a 0,001mm e o curso dos defletômetros comerciais pode chegar até 50mm.

A Figura VI.1 ilustra um relógio comparador e seu sistema interno.

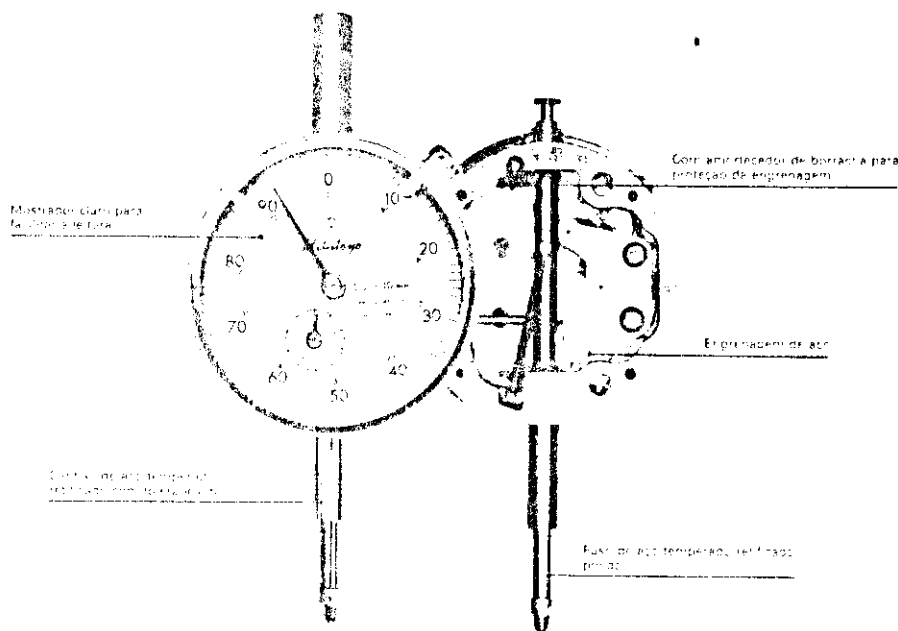


Figura VI.1- Esquema do relógio comparador

#### VI.3.1.2- Transdutores Indutivos de Deslocamento

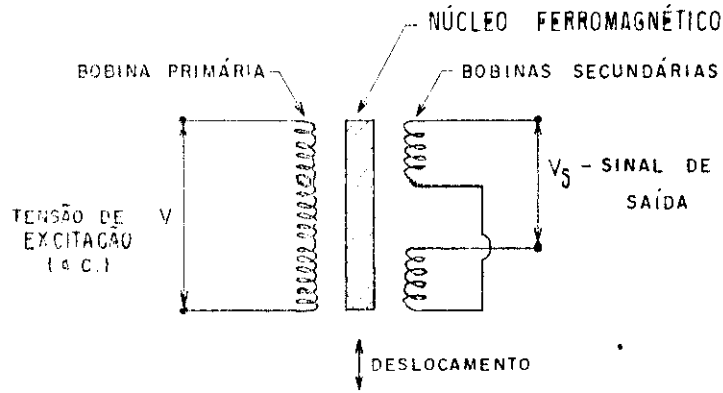
São instrumentos que associam a variação da indutância elétrica ao deslocamento a ser medido através de indicadores próprios para tal associação.

Basicamente, o transdutor associa o deslocamento a ser medido ao deslocamento de um núcleo ferromagnético disposto entre bobinas. A alteração da indutância será provocada pela movimentação da haste que contém o núcleo ferromagnético. A haste deve estar fixada no ponto em que se deseja efetuar a medida.

Existem basicamente dois tipos comerciais de transdutores indutivos:

-L.V.D.T. (Linear Variable Differential Transformer)

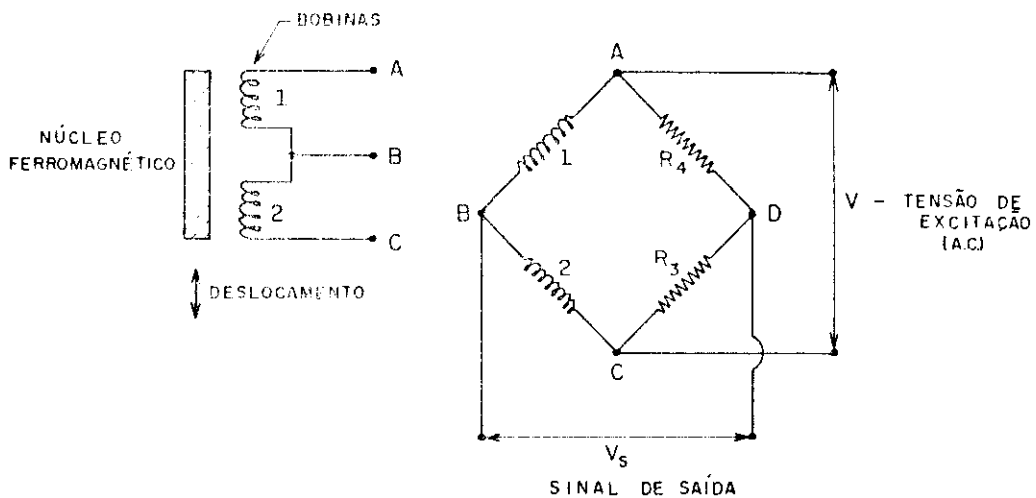
Composto por um sistema de bobinas e núcleo ferromagnético, alimentado por corrente alternada, mede a variação de tensão que é associada ao deslocamento do núcleo (Figura VI.2);



TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO - LVDT

Figura VI.2- Esquema do transdutor de deslocamento - L.V.D.T

-Meia ponte de Wheatstone: Núcleo ferromagnético e bobinas associados às resistências elétricas formando a meia ponte de Wheatstone. O deslocamento é obtido pelas medidas da tensão entre as duas diagonais da ponte (Figura VI.3).



TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO - 1/2 PONTE DE WHEATSTONE

Figura VI.3- Esquema do transdutor de deslocamento Tipo 1/2 ponte de Wheatstone

A própria descrição de cada um dos tipos de transdutores de deslocamentos permite concluir que há necessidade de aparelhos indicadores que permitam transformar a variação da indutância ou tensão em deslocamentos.

Para ensaios no campo é preciso que estes aparelhos indicadores sejam portáteis e tenham seu funcionamento garantido à base de baterias.

A sensibilidade da medida a ser efetuada dependerá da amplitude do deslocamento a ser medido e da qualidade do equipamento de aquisição de dados.

#### VI.3.1.3- Medições Topográficas

Medições topográficas são utilizadas em provas de carga de pontes quando não é possível ou não é desejável obter deslocamentos por outros meios mais sensíveis.

Os resultados obtidos topograficamente estão sujeitos a variações decorrentes do efeito da temperatura sobre os aparelhos e miras. Quando a ordem de grandeza dos deslocamentos são de alguns milímetros, a sensibilidade deste processo aproxima-se das leituras a serem efetuadas, o que limita sua utilização.

A utilização de aparelhos com maior sensibilidade e miras especiais, por exemplo de invar, permitem obter resultados mais confiáveis. Este método de medição de deslocamentos somente é recomendável como avaliação preliminar para os ensaios da maioria das pontes existentes.

#### VI.3.1.4- Leitura direta de réguas milimetradas

Este método de avaliação dos deslocamentos consiste em leituras diretas de réguas milimetradas posicionadas na ponte, tendo como referência um fio de aço ou invar.

O fio de referência deve ser posicionado externamente à ponte e estar submetido a uma tensão constante, por exemplo através de roldanas e pesos posicionados sobre os encontros ou pilares.

Este processo de leitura de deslocamentos também está sujeito às variações de temperatura sobre as réguas e



vibrações na ponte o que pode acarretar variações nas leituras efetuadas.

Com estas observações, conclui-se que a utilização deste método estará sujeita a erros que serão tão maiores quanto menor for a amplitude dos deslocamentos. Este é um método de simples "avaliação" dos deslocamentos.

#### VI.3.1.5- Vasos Comunicantes

É possível obter medições de deslocamentos através da utilização de vasos comunicantes associados aos pontos de medida previamente definidos sobre a ponte.

Este método permite obter sensibilidade de décimos de milímetro.

Um exemplo do mecanismo utilizando os vasos comunicantes está esquematizado na Figura VI.4. Foi desenvolvido pelo LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal e utilizado durante a execução e acompanhamento posterior da ponte da Arrabida.

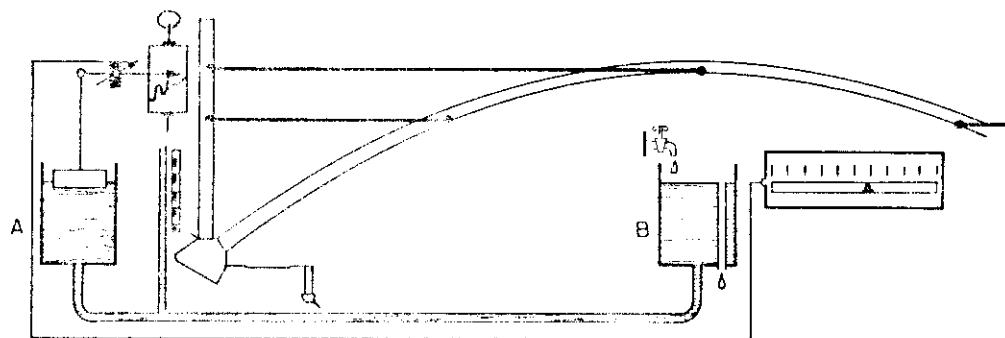


Figura VI.4- Desenho esquemático do equipamento de medição de deslocamentos - vasos comunicantes- desenvolvidos pelo LNEC.

Resumidamente, descreve-se o processo de funcionamento deste equipamento:

-Reservatório A - Fixo nas colunas - Nível variável associado a um dispositivo de leitura.

-Reservatório B - Fixo no ponto de leitura

(inicialmente no cimbramento metálico e posteriormente nos arcos de concreto) mantido com nível fixo através de extravasor.

-O movimento do reservatório B em relação ao A permite registrar o deslocamento do ponto medido.

-A sensibilidade do dispositivo é de 1mm.

### VI.3.2- Deslocamentos Angulares

As medidas de deslocamentos angulares são de grande interesse quando se deseja conhecer o giro de um elemento estrutural ou de um apoio.

Os resultados de deslocamentos angulares possibilitam ao calculista avaliar, por exemplo, a rigidez de uma ligação de vigas fletidas. Isto é de grande importância quando o tipo de detalhe classifica-se como uma ligação semi-rígida, permitindo um modelo de cálculo mais realista que a simples adoção de uma ligação articulada.

Uma outra situação possível consiste na avaliação do giro de um apoio (quer para pontes em treliças, quer para pontes em vigas). Os impedimentos produzidos por corrosão, atrito ou deformação excessiva do aparelho de apoio podem acarretar um comportamento estrutural bastante distante do idealizado no cálculo.

#### VI.3.2.1- Clinômetro de Bólha

O clinômetro de bôlha é um aparelho utilizado para medir deslocamentos angulares e consiste na associação do nivelamento de uma bôlha ao giro que ocorre no aparelho.

A sensibilidade do aparelho é da ordem de um segundo de grau sexagesimal. Para a utilização destes aparelhos é recomendável a fixação de uma base de leitura, constituída de três apoios sobre o elemento estrutural possibilitando a retirada do aparelho e sua utilização em outros pontos através de leituras comparativas entre a posição inicial e a posição deslocada.

#### VI.3.2.2- Defletômetros

A utilização de defletômetros permite avaliar o deslocamento angular através de medidas de deslocamentos lineares, em pontos previamente estudados, a uma distância conhecida do centro de rotação (mesmo que teórico) do elemento.

O giro é calculado através da associação da tangente do ângulo, obtido pela divisão do deslocamento linear medido pela distância entre este e o centro de rotação do elemento. Cabe ressaltar que estes resultados são razoáveis para pequenos deslocamentos admitindo-se a possibilidade de associar o ângulo à sua tangente.

#### VI.3.3- Medidas de Deformações

A medição de deformações em elementos de uma estrutura, em particular as pontes, é de grande interesse. Permite avaliar com precisão aceitável o comportamento local quando a estrutura é solicitada por um carregamento conhecido.

As medidas de deformações fornecem subsídios consideráveis aos engenheiros calculistas no esclarecimento do estado de deformação de partes da estrutura analisada. É possível também uma avaliação das tensões - através da associação do comportamento tensão-deformação do material ao elemento - permitindo compará-las aos modelos teóricos utilizados.

Pode-se dizer que as medidas de deformações fornecem resultados localizados do estado de deformação, possibilitando um melhor conhecimento do comportamento do elemento estrutural analisado ou detectando possíveis defeitos ou anomalias.

Para o caso específico do aço, o comportamento tensão-deformação é conhecido, o que permite uma razoável avaliação das tensões.

Admitindo o comportamento elástico, é possível estimar as tensões supondo a linearidade da relação tensão-deformação, portanto:

$$\sigma = E \varepsilon \quad \text{onde } E = \text{módulo da elasticidade}$$
$$\varepsilon = \text{deformação medida}$$

Na análise dos resultados da medição de deformações é necessário considerar as particularidades do aço, entre elas as imperfeições micro-estruturais e as tensões residuais que podem alterar o comportamento linear da tensão-deformação, antes de ser atingida a tensão que caracteriza o escoamento.

As tensões residuais, também denominadas de auto-tensões, estão presentes em todos os perfis de aço e são auto-equilibradas na seção transversal.

Estas tensões dependem do processo de fabricação utilizado (laminação a quente, laminação a frio, perfis soldados, etc).

O aparecimento das tensões residuais nos perfis laminados a quente ou soldados são decorrentes do resfriamento diferenciado das partes que compõem o perfil.

Nos perfis laminados a frio, estas tensões são decorrentes do rearranjo mecânico deste tipo de laminação.

A distribuição das tensões residuais varia para cada ponto do perfil, portanto, para cada tipo de solitação pode-se ter um comportamento diferente tensão-deformação.

As imperfeições micro-estruturais são devidas principalmente aos defeitos no arranjo cristalino do aço gerados no processo siderúrgico.

Portanto, na análise dos resultados das deformações de uma prova de carga é necessário verificar a linearidade dos resultados antes de ser estimada a tensão ( $\sigma = E\varepsilon$ ).

É recomendável efetuar várias medidas de deformação para o ponto analisado com ações externas diferentes.

A título de exemplo, a Figura VI.5, reproduz as tensões residuais medidas<sup>3</sup> para perfis tipo HE 200 laminado.

3

Ballio, G. Mazzolani, F. *Strutture in Acciaio*, Hoepli, 1988, 779p.

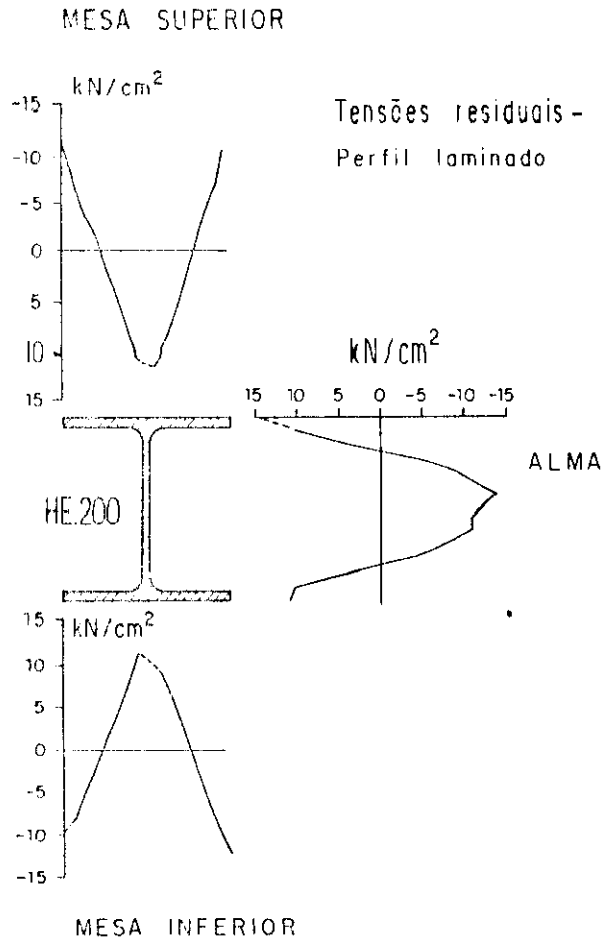


Figura VI.5- Distribuição das tensões residuais num perfil HE 200

A título de exemplo, a NBR-8800 adota  $11,5 \text{ kN/cm}^2$  para a tensão residual de perfis laminados a quente para o dimensionamento de elementos.

A sensibilidade necessária dos equipamentos destinados a medições de deformação faz com que os cuidados em sua operação, bem como a eliminação de efeitos parasitas, sejam extremamente importantes.

O controle dos efeitos da temperatura, para o caso das estruturas metálicas, constitui o fator principal a ser observado durante a execução das medidas de deformações. Nas provas de carga este efeito sobre os aparelhos de medição pode afetar consideravelmente os resultados obtidos.

As medidas de deformações efetuadas numa prova de carga irão fornecer resultados localizados, ou seja, deformações no ponto analisado. Os resultados obtidos estarão sujeitos aos aspectos particulares da localização do

ponto instrumentado em relação a toda estrutura. A concentração de deformações pode ocorrer devido ao posicionamento do carregamento ou por qualquer outro aspecto. A deterioração como uma corrosão local, afrouxamento de ligações, etc., podem alterar as deformações medidas. A presença de parafusos, rebites ou soldas próximos da seção instrumentada deve ser avaliada para evitar possíveis concentrações de deformação.

A seguir, descreve-se os principais equipamentos destinados às medidas de deformações.

#### VI.3.3.1- Extensômetros Mecânicos

Este equipamento consiste em um amplificador mecânico de deslocamentos entre dois pontos previamente marcados na estrutura (base de leitura). São efetuadas leituras antes e após o carregamento sendo a deformação do elemento naquele ponto, a subtração destas leituras dividido pela base de leitura. Existem dois tipos geralmente utilizados:

-fixo: permanece fixo durante a realização da prova de carga indicando continuamente a deformação da barra analisada.

Os equipamentos mais comuns têm como base de leitura 10 e 20mm. A menor leitura 0,0008mm resulta na sensibilidade do aparelho de 0,00008 e 0,00004 respectivamente para as bases acima indicadas, o que corresponde a tensões, para o caso do aço, de 1,64 kN/cm<sup>2</sup> e de 0,82 kN/cm<sup>2</sup> (E=20.500kN/cm<sup>2</sup>).

-removível: como o próprio nome indica, trata-se de um equipamento que só é utilizado durante a execução da leitura. Pode ser utilizado em vários pontos de medição.

As bases de leitura são previamente marcadas na estrutura (existem dois tipos: punção ou fixação de esferas de aço), onde o aparelho deverá ser posicionado. A Figura VI.6 exemplifica o detalhe da base de leitura e um esquema do equipamento.

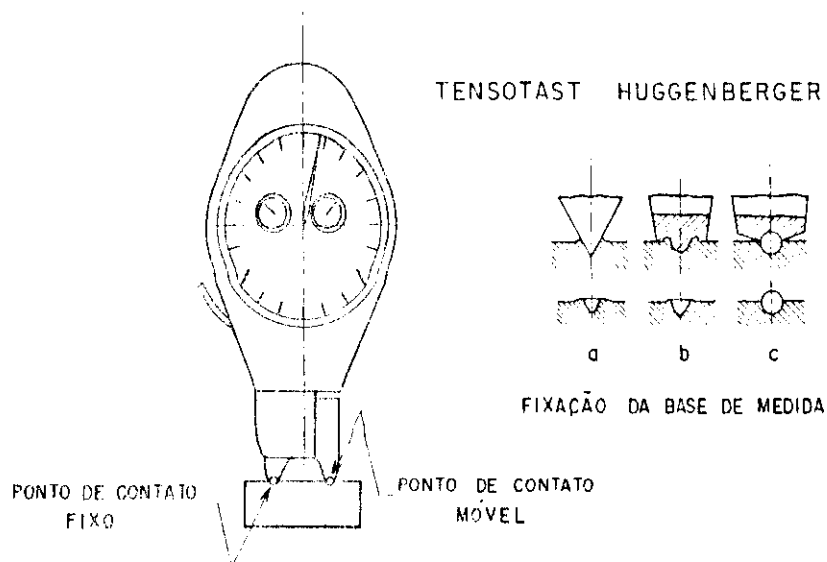


Figura VI.6- Esquema de um extensômetro mecânico removível e os tipos de marcação da base de leitura.

Etapas de operação do extensômetro mecânico removível:

-fixação ou marcação da base de leitura;

-leitura no relógio comparador posicionado na base de leitura com a estrutura descarregada. Esta leitura passa a ser a referência inicial;

-leitura do relógio comparador após a estrutura carregada;

-a deformação do elemento medido é a diferença entre a leitura final e a de referência, respeitadas as transformações de deslocamento em deformações (dimensões da base de leitura).

Existem vários modelos de extensômetros mecânicos, e a sensibilidade dependerá de cada aparelho. O modelo disponível no Laboratório de Estruturas da EESC é do tipo TENSOSTAT com sensibilidade do relógio comparador de 0,001mm e base de leitura de 20,50 ou 100mm. A tabela, a seguir, apresenta os valores das deformações passíveis de serem medidas (sensibilidade) e as correspondentes tensões.

TABELA VI-1

| EXTENSÔMETRO MECÂNICO<br>TENSOTAST |             |  |
|------------------------------------|-------------|--|
| SENSIBILIDADE = 0,001mm            |             |  |
| Base de<br>leitura<br>(mm)         | Deformações | Unidade<br>de tensão (*)<br>kN/cm <sup>2</sup> |
| 20                                 | 0,00005     | 1,01   |
| 50                                 | 0,00002     | 0,41   |
| 100                                | 0,00001     | 0,21   |

(\*) Nota: Estimativa a partir de  $E = 20.500 \text{ kN/cm}^2$  e comportamento linear tensão x deformação

A observação da Tabela VI.1 permite concluir que a operação do extensômetro mecânico removível exige muitos cuidados, treinamento e principalmente atenção do operador.

A confiabilidade dos resultados obtidos envolverá a operação do equipamento de maneira adequada. Para provas de carga em estruturas existentes, as leituras são extremamente dificultadas pelas condições em que o operador as efetua e, muitas vezes, pela dificuldade de acesso ao ponto medido.

Outro aspecto a ser observado quanto à confiabilidade de resultados é a ordem de grandeza das deformações a serem medidas. Quando estas são próximas da sensibilidade do aparelho (poucas divisões no relógio) a influência do erro de operação é acentuado.

O efeito da variação da temperatura sobre o aparelho é minimizado com leituras de uma base especial de invar antes de cada operação. Este procedimento permite corrigir os efeitos de possíveis variações de temperatura nos elementos que compõem o aparelho. A influência destas variações sobre o invar é desprezível.

#### VI.3.3.2- Extensômetros Elétricos de Resistência

O extensômetro elétrico de resistência é um instrumento extremamente eficiente para medição de deformações em



estruturas. As principais vantagens são a versatilidade traduzida pelo seu pequeno tamanho, elevada sensibilidade e possibilidade de monitoramento a distância. Permite medidas de deformação para carregamentos estáticos e dinâmicos.

O extensômetro elétrico de resistência tem seu funcionamento baseado na variação da resistência elétrica provocada pela deformação em um condutor. Em outras palavras, a variação de tamanho um condutor possibilita avaliar sua deformação a partir de medidas de resistência elétrica, antes e durante a ação que provoca sua deformação, comparando-as.

A medição a ser efetuada está baseada na proporcionalidade entre a resistência elétrica do condutor e seu comprimento, e a expressão apresentada a seguir, traduz algebricamente o exposto acima:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \epsilon \quad \text{onde:}$$

$\Delta R$  - variação da resistência provocada pela deformação do condutor

$R$  - resistência medida na posição indeformada

$K$  - constante do extensômetro

$\epsilon$  - deformação

É necessário um equipamento especialmente projetado para medir a variação da resistência elétrica e associá-la a deformação do extensômetro. O extensômetro elétrico deve estar fixado na superfície da peça onde deseja-se efetuar a medida de deformação.

Em geral, o extensômetro elétrico é constituído de um fio de liga metálica em forma de espiral ou um semi condutor, fixado em uma base de plástico ou papel para facilitar sua manipulação. Na Figura VI.7 estão apresentados alguns tipos de extensômetros elétricos de resistência.

## EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA - EXEMPLOS

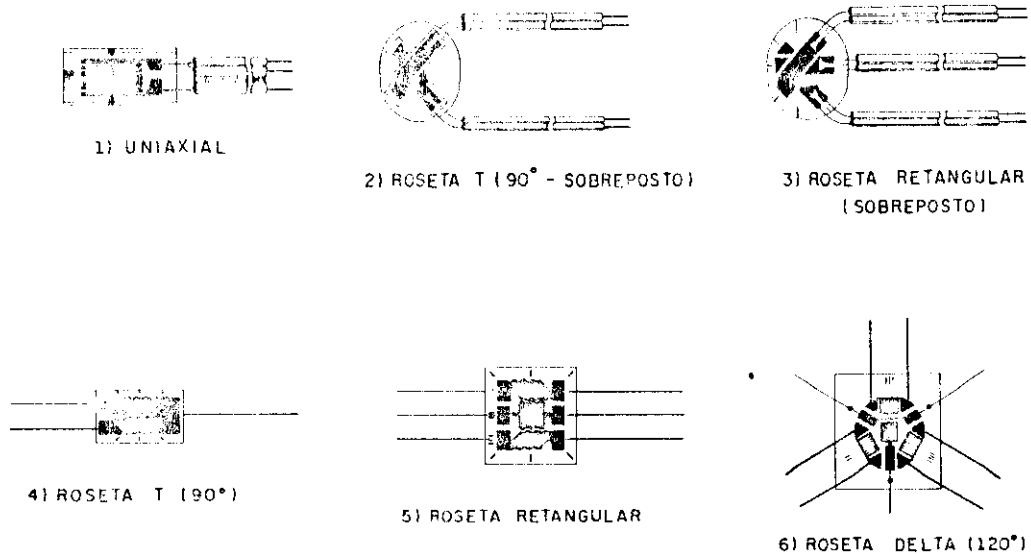


Figura VI.7- Exemplos de extensômetros elétricos de resistência

A sensibilidade obtida, utilizando-se extensômetro elétrico de resistência, irá depender do equipamento de leitura. Para os aparelhos comercializados, a sensibilidade corresponde a uma deformação ( $\varepsilon$ ) de  $1 \times 10^{-6}$ .

A fixação do extensômetro ao elemento estrutural deve ser realizada de maneira cuidadosa. O desempenho e precisão da medida estarão relacionados a esta fixação. Deve-se também protegê-lo adequadamente contra a umidade. A variação de temperatura e o efeito da umidade são fatores que podem resultar em alterações nas medições.

Para o caso específico do aço, os passos recomendáveis para a fixação do extensômetro elétrico de resistência são os seguintes:

-Limpeza da superfície: deve-se retirar toda a pintura e impurezas até ser atingido o metal base. Utilizam-se lixas manuais, escovas mecânicas ou jateamento. A seguir, efetua-se a limpeza da superfície com um solvente (normalmente tricloretileno) para retirada da gordura e outras impurezas;

-Fixação do extensômetro: utilizam-se adesivos específicos para fixação. Cuidados especiais devem ser tomados na manipulação, evitando-se o contato direto com a superfície já limpa ou com o extensômetro. Os principais adesivos utilizados são:

a) a base de nitrocelulose: indicado para extensômetros com base de papel;

b) a base de epoxi: os que apresentam melhores resultados quanto à fixação, porém sua utilização é difícil e requer um período de tempo para a cura do adesivo;

c) a base de cianoacrilato: apresentam bons resultados e com uma cura rápida (alguns minutos). É recomendável para ensaios no campo. Apresenta, porém, rápida deterioração com o tempo;

d) a base de cerâmicas: indicados para altas temperaturas exigindo uma cura com temperaturas também elevadas e controladas. Utilizado somente em Laboratórios.

- Proteção dos extensômetros: a proteção dos extensômetros contra a umidade e choques mecânicos é necessária. Utiliza-se uma camada de cera, sobre esta uma camada de borracha sintética (ou massa de calafetar), uma chapa fina de alumínio e por último uma outra camada de borracha sintética. A Figura VI.8 reproduz esquematicamente esta proteção.

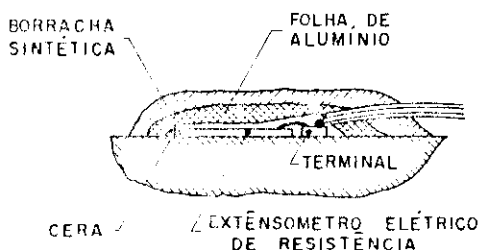


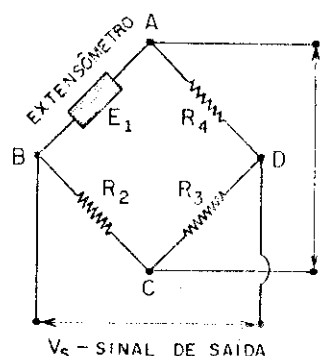
Figura VI.8- Esquema da proteção de extensômetros elétricos de resistência

A proteção acima descrita deve ser utilizada para as provas de carga de longa duração ou se os extensômetros elétricos estiverem em contato com água. Para as provas de

carga de curta duração ou ensaios em laboratório pode-se utilizar somente a cêra e uma camada de borracha sintética.

- Ligação do extensômetro: após a fixação do extensômetro elétrico de resistência, os terminais são ligados a cabos com proteção blindada (evita possíveis interferências). Estes cabos são ligados aos equipamentos de medição (caixas comutadoras ou diretamente a indicadores de deformação).

A maioria dos equipamentos indicadores de deformação para extensômetros elétricos de resistência utiliza a ponte de Wheatstone. A Figura VI.9 ilustra esquematicamente a montagem da ponte Wheatstone (1/4 da ponte).



V - TENSÃO DE EXCITAÇÃO (AC ou DC)

V<sub>s</sub> - SINAL DE SAÍDA

1/4 DE PONTE DE WHEATSTONE

$$\Delta V_s = \frac{V}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = k \epsilon$$

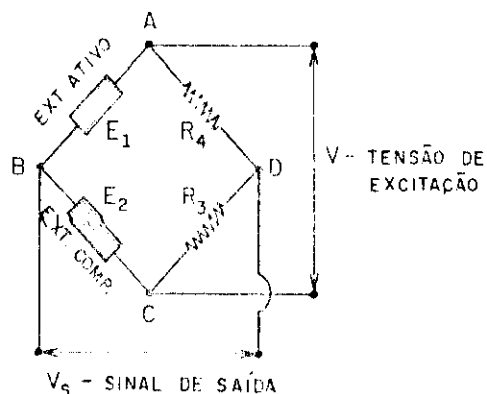
$$\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$$

$$\Delta V_s = \frac{V}{4} k \epsilon$$

Figura VI.9- Esquema da ponte de Wheatstone - 1/4 da ponte

Descrição de 1/4 de ponte: o extensômetro associa-se a três resistores internos ao aparelho. Uma diagonal da ponte é excitada com uma tensão (V), contínua ou alternada e na outra diagonal é feita a leitura da tensão (V<sub>s</sub>). A variação ΔV<sub>s</sub> é proporcional à deformação ocorrida no extensômetro.

Nesta montagem, a variação de temperatura no extensômetro elétrico não é compensada ou eliminada, portanto, não é recomendável sua utilização no campo.



$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = k \epsilon_1$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = k \epsilon_2$$

$$\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$$

$$\Delta V_s = \frac{V}{4} k (\epsilon_1 - \epsilon_2)$$

1/2 PONTE DE WHEATSTONE

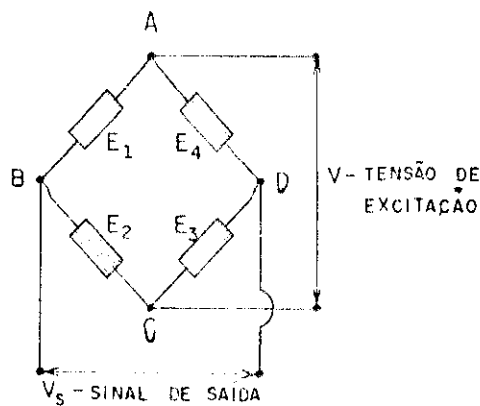
Figura VI.10- Esquema da ponte de Wheatstone - 1/2 ponte

Descrição da 1/2 ponte: são utilizados dois extensômetros elétricos dispostos de forma adjacente na ponte de Wheatstone. Um é fixado no elemento estrutural chamado de ativo e o outro fixado numa peça do mesmo material do elemento ensaiado (aço, concreto, etc.) sem nenhuma solicitação (um pedaço de perfil, por exemplo). Este extensômetro é chamado de compensador (passivo).

A maneira de excitação da ponte e sua leitura no indicador é similar a anterior. O efeito da temperatura será compensado pois ela afetará os dois extensômetros, ativo e passivo, o que irá eliminar este efeito parasita na leitura  $\Delta V_s$ .

É recomendável, portanto, que o elemento não estrutural que contém o compensador de temperatura (extensômetro passivo) esteja posicionado próximo do extensômetro ativo para que ocorra a mesma variação de temperatura.

Esta montagem é normalmente utilizada em ensaios de campo. É também utilizada em laboratório.



$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = k\epsilon_1 \quad \frac{\Delta R_2}{R_2} = k\epsilon_2$$

$$\frac{\Delta R_3}{R_3} = k\epsilon_3 \quad \frac{\Delta R_4}{R_4} = k\epsilon_4$$

$$\Delta V = \frac{V}{4} k (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)$$

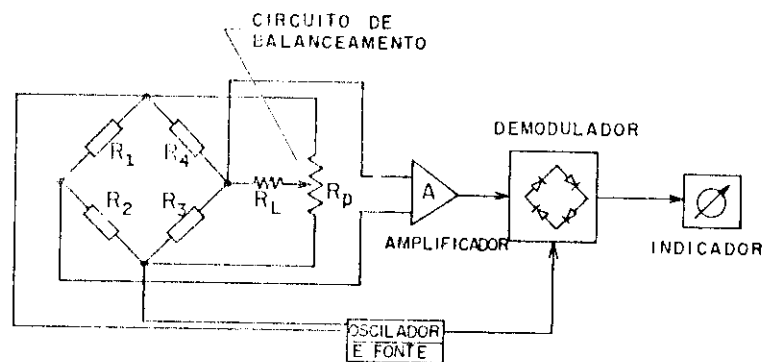
PONTE COMPLETA DE WHEATSTONE

Figura VI.11- Esquema da ponte completa de Wheatstone

Descrição da ponte completa: são utilizados quatro extensômetros, um em cada "braço" da ponte, conforme o indicado na Figura VI.11. As medidas de deformação são obtidas pela soma algébrica de todas as deformações. Esta montagem é recomendável na execução de células de carga não sendo utilizada normalmente em ensaios.

Os indicadores de deformação são basicamente de dois tipos: leitura direta e leitura indireta.

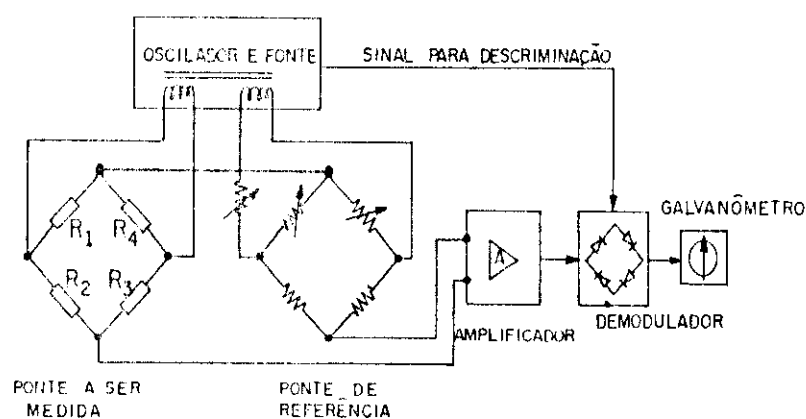
O indicador de leitura direta que possui uma fonte alimentadora da ponte de Wheatstone, um circuito de balanceamento para zerar a tensão de saída, um amplificador, um demodulador (para fonte de corrente alternada) e um indicador analógico ou digital que irá fornecer a leitura do extensômetro. (Figura VI.12)



APARELHO DE LEITURA DIRETA

Figura VI.12- Esquema do indicador de deformações - leitura direta.

O indicador de leitura indireta possui basicamente uma fonte alimentadora, uma ponte de Wheatstone interna ao aparelho a qual está associado um circuito de balanceamento para zerar a tensão de saída, um amplificador e um demodulador de saída da tensão e um galvanômetro para indicar a diferença de tensão. (Figura VI.13)



APARELHO DE LEITURA INDIRETA

Figura VI.13- Esquema do indicador de deformações  
Leitura indireta.

A principal diferença entre os dois tipos consiste que neste último, há a presença da ponte interna de Wheatstone. A principal vantagem decorre do fato que o sistema está baseado na comparação de uma ponte interna e outra externa aumentando a confiabilidade e estabilidade nas leituras, independente da fonte de alimentação.

#### VI.3.3.3- Outros Dispositivos de Medição de Deformações

Existem outros métodos ou aparelhos para medir ou avaliar as deformações. São menos utilizados quer no campo, quer em laboratórios. Pode-se destacar extensômetros óticos, extensômetros elétricos capacitivos, etc., cujo funcionamento e aplicações podem ser obtidos na bibliografia especializada.

Existem também equipamentos para medidas de deformação mais modernos que utilizam câmaras de vídeo especiais e raio laser.

Há também sistemas de aquisição de dados bastante

complexos que permitem o monitoramento de deformações e deslocamentos de estruturas. A transmissão das medidas coletadas é então enviada para computadores no local da estrutura ensaiada ou mesmo para outros locais, com a ligação feita via sinal telefônico ou de micro-ondas.

#### VI.4- Análise dos Resultados

Normalmente, a análise dos resultados obtidos em provas de carga é realizada comparando-os aos modelos teóricos utilizados para o cálculo.

Alguns cuidados devem ser tomados na interpretação dos resultados obtidos e estão comentados a seguir.

Geralmente os resultados de deslocamentos e deformações são inferiores aos valores calculados. Isto ocorre devido a uma série de aspectos relacionados ao comportamento da ponte e ao esquema de cálculo utilizado, que muitas vezes não reproduz o "comportamento real" da estrutura ou o "caminhamento das cargas".

Entre estes aspectos podemos destacar:

- a redundância estrutural advinda de ligações semi-rígidas, redistribuição das cargas através do sistema de contraventamento, etc.;
- ligações cujo comportamento não é uma simples articulação, embora assim considerada no cálculo;
- impedimento de deslocamentos e rotações nos aparelhos de apoio que altera o esquema estático. A redistribuição das deformações pode ser de maneira diferente da idealizada;
- a contribuição das lajes de concreto na redistribuição das cargas;
- o comportamento conjunto de longarinas e transversinas distribui os "carregamentos" de maneira diferente da normalmente idealizada;
- a presença da deterioração (corrosão de elementos, não linearidade de barras, afrouxamento de ligações) pode redistribuir as deformações de maneira muito diferente do modelo teórico;



- o modelo de cálculo utilizado nem sempre é representativo da estrutura da ponte. As considerações na vinculação dos elementos, o tipo de carregamento utilizado e sua distribuição nos elementos estruturais não são devidamente "reproduzidos" no modelo de cálculo;

A confiabilidade das medições efetuadas está diretamente relacionada aos equipamentos utilizados e a experiência da equipe responsável pelas medições. Podemos destacar alguns aspectos sobre as medições efetuadas:

- os resultados dos deslocamentos são bastante confiáveis permitindo uma boa avaliação do comportamento global da estrutura. É possível estabelecer comparações com os resultados teóricos;

- as medições de deformações, que fornecem uma avaliação localizada do comportamento de cada elemento instrumentado, devem ser realizadas em vários pontos da seção analisada, de forma a gerar uma série de resultados.

O tipo de equipamento utilizado (extensômetros mecânicos, elétricos de resistência) associado a sua sensibilidade e à amplitude da leitura é fator determinante no grau de confiabilidade dos resultados;

- a análise do comportamento do elemento em que as deformações são medidas deve ser cuidadosa. A existência de deformações parasitas (efeito da temperatura sobre os equipamentos, deformação por flexão em barras idealizadas para solicitações axiais, corrosão localizada alterando a distribuição de deformações do elemento, etc.) podem conduzir a resultados algumas vezes inexplicáveis;

- a avaliação correta do trem tipo de ensaio, seu peso, dimensão e posicionamento é também responsável pela qualidade dos resultados obtidos.

A análise teórica da ponte ensaiada deve reproduzir as condições reais em que esta se apresenta observando que:

- o modelo estático deve reproduzir as condições de vinculação, ligações semi-rígidas, continuidade, de longarinas, etc.

- a distribuição dos carregamentos pelos elementos estruturais seja de forma a reproduzir o fenômeno real;

- a redução de seção de elementos corroídos seja considerada;

d) a reprodução das deformações iniciais de elementos ou de deslocamentos já existentes na estrutura.

Ressalta-se que a maioria das considerações aqui citadas são relativas a pontes que encontram-se em utilização. Nestas provas de carga é utilizado o "trem tipo de ensaio" que não deve provocar deformações plásticas.

Para as provas de carga onde o objetivo é determinar o estado limite último da ponte o carregamento será tal que a ruína desta é atingida, portanto não sendo possível seu reaproveitamento. A maioria destes ensaios são realizados em pontes que serão desativadas. Um ensaio para verificação do estado limite último, exigirá cuidados especiais quanto aos instrumentos de medição a serem utilizados (por exemplo, extensômetros elétricos de resistência que permitam grandes deformações, etc.). O planejamento da prova de carga deve garantir a segurança da equipe responsável pelo ensaio.

A análise teórica deve considerar a plastificação de seções como também sua redistribuição, de forma a permitir o monitoramento dos resultados e também sua comparação com o modelo teórico.

É muito difícil estabelecer parâmetros gerais que considerem valores relativos limites entre os obtidos nos ensaios - deformações ou deslocamentos - e os teóricos. A tipologia estrutural da ponte, condições de utilização, vida da estrutura, grau de deterioração são alguns dos principais fatores que influenciam os resultados.

É conveniente que cada análise considere as particularidades de cada ponte bem como as condições e equipamentos utilizados nas provas de carga. É de responsabilidade do engenheiro calculista a depuração dos resultados correlacionando-os ao método teórico utilizado.

Outro aspecto a destacar, refere-se ao grau de importância do elemento analisado que definirá parâmetros para a análise dos resultados.

## VI.5- Exemplos de Provas de Carga

A importância da realização de provas de carga em pontes já foi discutida nos itens anteriores deste capítulo. Sua realização envolve despesas consideráveis e justifica-se, após um estudo adequado da relação custo-benefício ou quando inserida num plano de estudos, cujos resultados servirão para nortear especificações de normas técnicas.

Os resultados auferidos em provas de carga, desde que devidamente planejadas, extrapolam o objetivo inicial de "responder" aos engenheiros calculistas, as dúvidas relativas ao comportamento estrutural de uma ponte. Constitui-se, no entanto numa fonte de informações preciosas para o desenvolvimento da técnica do cálculo estrutural.

A norma americana para o cálculo de pontes rodoviárias - Standard Specification for Highway Bridges - AASHTO<sup>4</sup> - referência obrigatória para qualquer estudo ou dimensionamento de pontes rodoviárias, possui dois Comitês específicos para as recomendações técnicas de execução e avaliação de resultados de prova de carga que são o Subcomitê no. 4 - Static Field Tests e o Comitê A2C05 - Dynamics and Field Testing of Bridges.

As preocupações dos membros que compõem estes Comitês estão manifestadas em vários artigos onde enfatizam a necessidade de programas de ensaio de pontes, que envolvam as várias tipologias estruturais. Recomendam também que não se limite a provas de carga no regime de utilização, mas também no estado limite último.

É interessante ressaltar o trabalho do Prof. Conrad P. Heins Jr.<sup>5</sup> (University of Maryland) e do Eng. Charles G.

<sup>4</sup> \_\_\_\_\_  
AASHTO Standard Specification for Highway Bridges, 1981, Interim Specification, New York, Association of State Highway and Transportation Officials.

<sup>5</sup> HEINS JR., C.P., GALAMBOS, C.F. Highway bridge field tests in the United States, 1948-1970. Public Roads, v. 36, n.12, p.271-291, Feb. 1972

Galambos (Federal Highway Administration) que no artigo intitulado "Highway Bridge Field Test in The United States, 1948-70" relacionaram todas as principais provas de carga e ensaios realizados em pontes rodoviárias nos EUA entre 1948 a 1970. Neste artigo encontram-se também informações das principais características de cada ponte, tipo de prova de carga realizada, ano e a referência bibliográfica específica de cada caso citado.

Vários pesquisadores também sugerem a realização de provas de carga devido a importância dos resultados na estimativa da vida útil das pontes existentes.

Estas informações são muito valiosas principalmente devido ao alto custo envolvido direta e indiretamente na recuperação ou substituição de pontes.

O número aproximado de 482.000 pontes rodoviárias nos EUA, com vários materiais e tipologias estruturais, demonstra a importância destes estudos e reflete as preocupações dos pesquisadores sobre a vida útil das pontes.

Pode-se ressaltar também, o trabalho desenvolvido pelo Ministério de Transportes e Comunicações de Ontário, onde dez pontes são testadas por ano. Este programa de ensaios, abrange várias tipologias e materiais com o objetivo principal de determinar a capacidade resistente de algumas das 13.000 pontes existentes naquela província do Canadá.

#### VI.5.1- Provas de Carga - Estado Limite Último

As provas de carga em pontes no estado limite último, (carregamentos que conduzem a estrutura à ruína) são extremamente raras pois, evidentemente, a ponte não poderá ser mais utilizada.

Na bibliografia pesquisada, destacam-se dois trabalhos sobre este tipo de ensaio no qual as pontes ensaiadas estavam localizadas em áreas que seriam inundadas com a construção de barragens.

Apresenta-se, uma rápida descrição destes ensaios.

Ponte em treliça - Estado de Iowa - EUA

Prof. Wallace W. Sanders<sup>6</sup>

- Características das Pontes:

- 4 vãos de 50,28m;
- ponte em treliça, ligações com pinos;
- material: ferro fundido e aço;
- ano de construção (1909);
- tabuleiro de madeira;
- ano de ensaio (1975);

Ensaio do estado limite último de quatro tabuleiros de pontes - Estado do Tennessee - EUA

Prof. Edwin G. Burdette<sup>7</sup> e David W. Goodpasture

Características das Pontes:

-Ponte 1:

-Quatro vãos de 21,35m - 27,45m - 27,45m - 21,35m, contínua;

- Viga mista, aço ASTM A-36;
- Ano de construção: 1963;

-Ponte 2:

- Viga simplesmente apoiada, vão de 20,13m;
- Vigas de concreto protendido pré-moldados;
- Tabuleiro moldado "in loco";
- Ano de construção: 1963;

-Ponte 3:

- Vigas simplesmente apoiadas, vão de 15,25m;
- Concreto armado, vigas T e tabuleiro moldados "in loco";
- Ano de construção: 1938;

-Ponte 4:

- Três vãos de 13,725m - 18,30m - 13,725m em viga de aço contínua;

<sup>6</sup> SANDERS JR., W.W. et alii - *Ultimate load test of truss bridge floor system. Journal of the Structural Division ASCE, v.102, n.7, p.1383-1398, July, 1976*

<sup>7</sup> BURDETTE, E.G. ; GOODPASTURE, D.W., *Comparision of mesured and computed ultimate strenghts of four Highway Bridges. Highway Research Record, n.382, p.38-49, 1972*

-Tabuleiro de concreto armado simplesmente apoiado nas vigas;

-Ano de construção: 1956;

Programa dos Ensaios:

-Ensaio do tabuleiro e longarinas;

-Determinação dos estados limites últimos;

-Comparação entre os resultados obtidos, modelos teóricos e normalização.

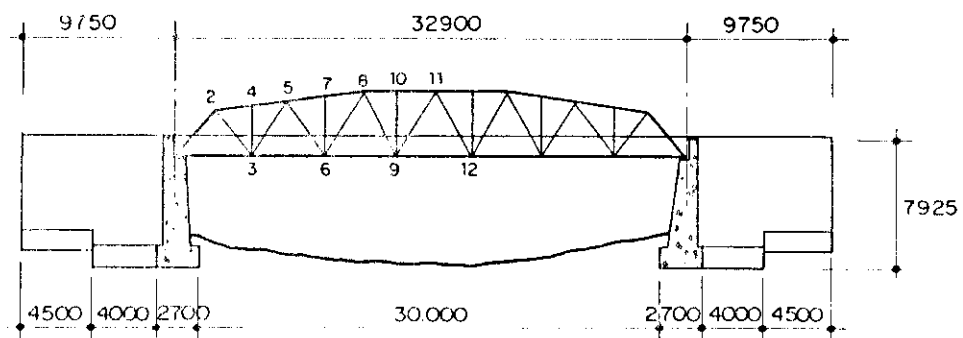
A descrição mais aprofundada e análise dos resultados obtidos podem ser obtidos na bibliografia citada.

#### VI.5.2- Prova de Carga - Ponte sobre o Rio Mattawa

Relata-se, a seguir, um exemplo de prova de carga de uma ponte rodoviária sobre o rio Mattawa, Canadá, realizada pelo Prof. A.S. Nowak<sup>8</sup> e pelo Eng. T. Tharmabala (Ministério dos Transportes e Comunicações, Ontário).

##### VI.5.2.1- Características da Ponte

A Figura VI.14 apresenta as principais características geométricas da ponte em treliça. Ressalta-se que esta ponte foi fabricada em 1948.



VISTA LONGITUDINAL

Figura VI.14- Características da ponte sobre o Rio Mattawa

<sup>8</sup> NOWAK, A. S., THARMABALA, T. *Bridge reliability evaluation using load tests. Journal of Structural Engineering, ASCE v. 114, n. 10, p. 2268-2279, Oct. 1988.*



### VI.5.2.3 - Instrumentos de Medição

Foram utilizados extensômetros elétricos de resistência uniaxiais para a avaliação das deformações e transdutores de deslocamentos, para as medidas de deslocamento.

### VI.5.2.4- Resultados e Comentários

A Tabela VI.2 transcreve os resultados obtidos nesta prova de carga. A relação entre os valores obtidos e os avaliados teoricamente também são apresentados.

TABELA VI.2

| RESULTADOS DA PROVA DE CARGA (FORÇA kN)<br>Ponte sobre o Rio Mattawa |                |        |                    |                |         |                    |
|--|----------------|--------|--------------------|----------------|---------|--------------------|
| Bar-<br>ras  | Carregamento 1 |        |                    | Carregamento 2 |         |                    |
|  | Calcula-<br>do | Medido | Medido/<br>Calcul. | Calcula-<br>do | Medido  | Medido/<br>Calcul. |
| 1-2  | 746,9          | 563,4  | 0,794              | 447,9          | 403,2   | 0,900              |
| 2-5  | 896,9          | 759,9  | 0,847              | 537,5          | 559,0   | 1,04               |
| 5-8  | 1.109,4        | 851,2  | 0,767              | 868,4          | 846,5   | 0,964              |
| 8-11   | 1.028,3        | 819,6  | 0,797              | 1.198,8        | 1.102,7 | 0,919              |
| 1-3  | 501,9          | -20,5  | (*)                | 301,0          | -171,3  | (*)                |
| 3-6  | 1.001,7        | 365,2  | 0,365              | 711,4          | 202,9   | 0,265              |
| 6-9  | 1.014,3        | 414,2  | 0,408              | 990,9          | 439,9   | 0,443              |
| 9-12   | 909,1          | 345,1  | 0,379              | 1.228,1        | 558,4   | 0,454              |
| 2-3  | 573,6          | 503,6  | 0,877              | 344,0          | 364,5   | 1,059              |
| 3-5  | 192,2          | 147,7  | 0,768              | 307,5          | 325,7   |                    |
| 5-6  | 164,0          | 95,6   | 0,582              | 253,0          | 233,7   | 0,923              |
| 6-8  | 162,6          | 134,0  | 0,824              | 258,7          | 203,8   | 0,787              |
| 8-9  | 27,4           | 6,5    | 0,237              | 407,5          | 251,0   | 0,615              |

(\*) NOTA: A inversão do sinal de 1-3 caracteriza o impedimento do deslocamento horizontal do apoio móvel.

A apresentação dos dados relativos a esta prova de carga tem duas finalidades:

-ser uma referência para os dados que serão apresentados no item seguinte deste capítulo, relativo a uma prova de carga realizada pelo LE-EESC, cuja ponte apresenta



um esquema estrutural semelhante.

-exemplificar numericamente os resultados teóricos e os obtidos em provas de carga realizada em outro país.

#### VI.5.3. - Prova de Carga - Ponte Ferroviária FEPASA

Apresentam-se, neste item, os principais resultados e alguns comentários sobre uma prova de carga realizada em ponte ferroviária da FEPASA - Ferrovia Paulista S.A., situada entre Aguaí e Casa Branca sobre o rio Jaguari-Mirim.

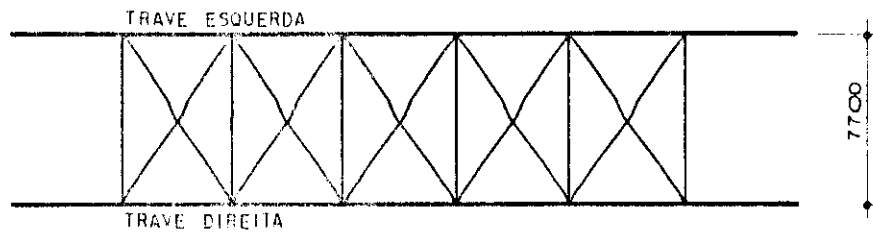
Esta ponte em treliça foi ensaiada devido às alterações decorrentes do aumento de gabarito vertical (eletrificação da via), propostas pelo Prof. Hermann Schulte, consultor e calculista dos reforços. O problema do gabarito vertical foi excepcionalmente solucionado pelo Prof. Schulte. Esta solução consistiu na retirada das longarinas existentes, inicialmente sobrepostas às transversinas, e seu reposicionamento de tal forma que os dormentes, praticamente facessem as transversinas. Após realizada esta fase, toda a ponte foi içada com a adição de novos apoios de tal forma a permitir a eletrificação da via (aumento do gabarito vertical).

Durante a recuperação e pintura foi constatado pelos funcionários responsáveis pelos serviços, que duas diagonais e um banzo inferior (elementos constituídos de chapas com olhais nas extremidades) não eram solicitados. O Prof. Schulte optou pelo reforço destes elementos.

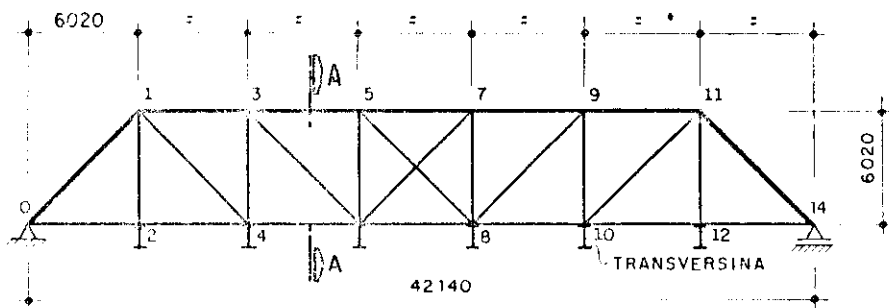
##### VI.5.3.1- Características da Ponte

A Figura VI.17 ilustra as principais características geométricas e as seções transversais. Destaca-se o fato que esta ponte foi fabricada nos Estados Unidos pela Keystone Bridge Co. em 1893. Projetada inicialmente para duas vias, encontra-se somente com uma via em operação. Este fato esclarece que, mesmo com o aumento do trem tipo ocorrido nestes quase cem anos, nenhum elemento estrutural atingiu o estado limite último.

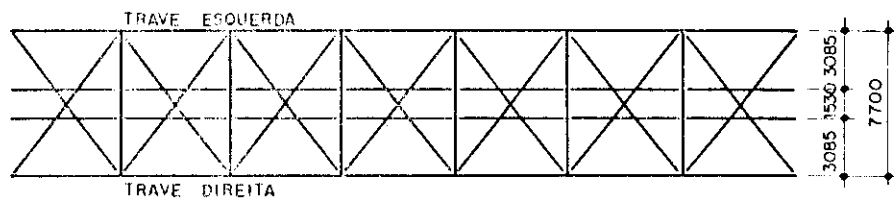
CONTRAVENTAMENTO SUPERIOR



TRAVE PRINCIPAL

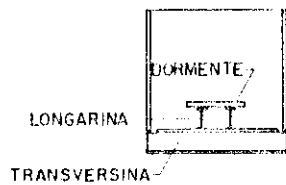


CONTRAVENTAMENTO INFERIOR E LONGARINAS DO ESTRADO



CORTE A-A

SEÇÃO TRANSVERSAL  
ANTES DA REFORMA



CORTE A-A

SEÇÃO TRANSVERSAL  
APÓS A REFORMA

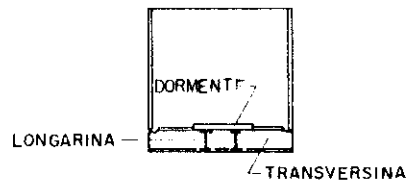


Figura VI.17- Esquema geral e dimensões principais  
Ponte ferroviária Rio Jaguari-Mirim

A Figura VI.18 apresenta um esquema do reforço proposto pelo Prof. Hermann Schulte nos elementos não solicitados.

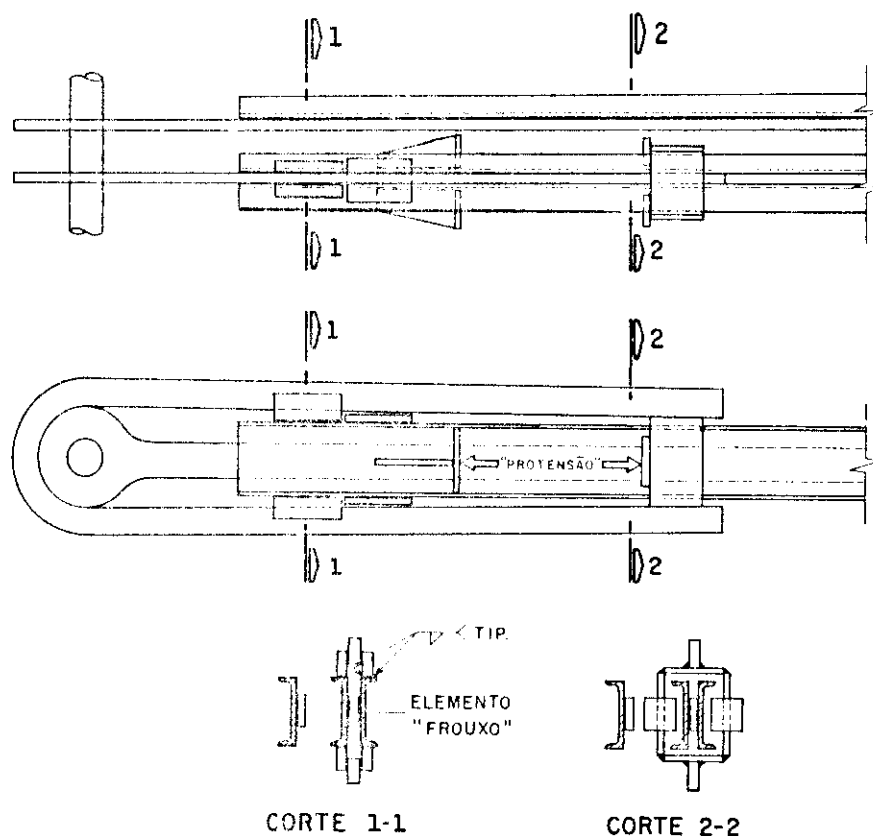


Figura VI.18- Esquema do reforço de uma barra (chapas) projetado pelo Prof. Schulte

O reforço foi constituído de perfis e chapas dispostos externamente aos elementos não atuantes e vinculados aos olhais. Foi aplicada uma força externa, através de macacos hidráulicos, para compatibilizar o comportamento dos novos elementos com os existentes. Os novos elementos deveriam ser solicitados com tensões próximas das correspondentes à carga permanente já atuante sobre os demais elementos (banzo e diagonais).

Outra modificação importante foi o reforço do portal com a adição de perfis soldados sob forma de um novo pórtico, externamente ao existente, e a eliminação de parte da treliça interna as diagonais de apoio.

### VI.5.3.2 Equipamentos Utilizados na Prova de Carga e Pontos Instrumentados

O programa de ensaio foi desenvolvido pelo L.E.-EESC de acordo com as recomendações e exigências do Prof. Hermann Schulte. Este programa previa duas provas de cargas, uma antes dos reforços dos elementos e outra com a estrutura da ponte já recuperada, isto é, reforço dos elementos e reposicionamento das longarinas.

A aplicação da força externa nos elementos reforçados e as respectivas medidas de deformações (nos elementos novos e nos existentes) também foi de responsabilidade do L.E.-EESC.

As seguintes medições foram efetuadas;

- deformações em todos os elementos das treliças;
- deformações em uma transversina;
- deformações em uma longarina;
- deformações dos elementos de reforço durante a aplicação da força externa<sup>9</sup> ;
- deslocamentos horizontais dos apoios móveis;
- deslocamentos verticais dos nós da treliça;
- deslocamentos verticais de uma transversina;
- deslocamentos verticais de uma longarina;

Os equipamentos de medição estão abaixo relacionados:

-extensômetro mecânico Tensotast de marca Huggenberger com sensibilidade de 0,001mm e base de leitura de 100mm (admitindo-se módulo de elasticidade  $20.500\text{kN/cm}^2$  e a tensão proporcional às deformações, a sensibilidade em termos de tensão do aparelho corresponde a aproximadamente  $0,20\text{kN/cm}^2$ );

-relógios comparadores mecânicos da marca Mitutoyo, com sensibilidade de 0,01mm para as medidas de deslocamento horizontal;

9

*Esta força externa convencionou-se chamar de "protensão", termo que será utilizado para designar tal força no corrente texto.*

-réguas milimetradas para a avaliação dos deslocamentos verticais dos nós da treliça. Foram fixadas nos nós das treliças e tendo como referência um fio de aço de 0,9mm tensionado, fixado nas cabeceiras da ponte;

-células de carga fabricadas no L.E.-EESC, com extensômetros elétricos de resistência e capacidade nominal de 200kN;

-indicador de deformações Transdutec, modelo T832, associado a caixa comutadora, para a leitura das forças aplicadas durante a aplicação da força nos elementos reforçados.

#### VI.5.3.3- Descrição dos Ensaio

Duas locomotivas diesel U-20-C de seis eixos com 180kN de carga nominal por eixo foram utilizadas para o carregamento da ponte . A Figura VI.19 ilustra o trem tipo utilizado.

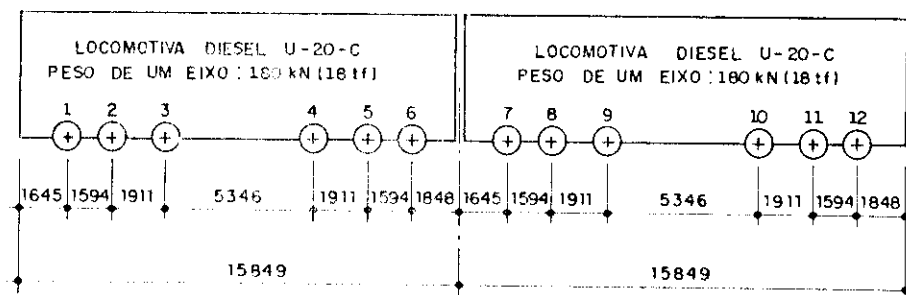


Figura VI.19 - Trem tipo de ensaio

O trem tipo foi posicionado de acordo com as solicitações do Prof. Schulte, isto é, para as medições de deformações em cada barra era posicionado para gerar solicitação máxima. A Figura VI.20 ilustra todos os carregamentos utilizados e será referência na apresentação dos resultados obtidos.

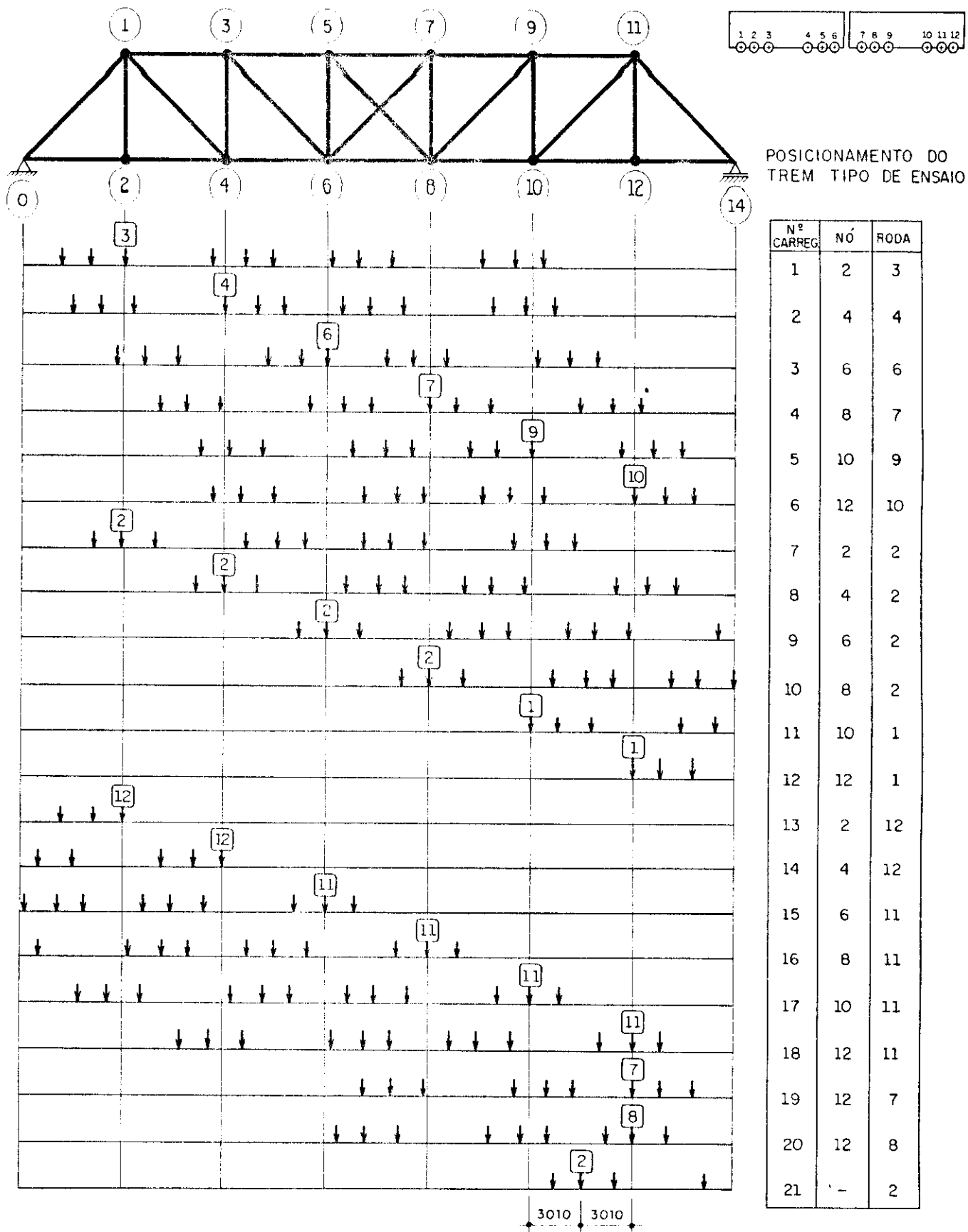


Figura VI.20- Posicionamento do trem tipo de ensaio

Foram efetuadas medições de deslocamentos para todas os carregamentos e medidas de deformações (extensômetro mecânico) para cada barra da estrutura (Figura VI.21). Os procedimentos de leitura foram os convencionalmente utilizados em provas de carga com os equipamentos de medição já descritos anteriormente.

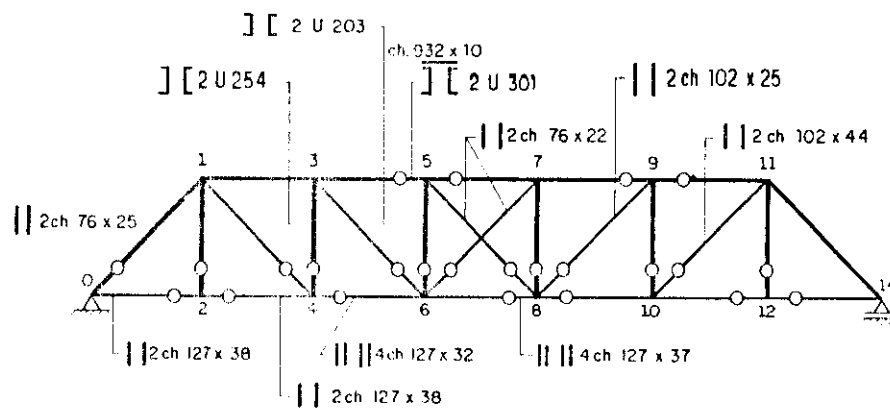


Figura VI.21 - Seções transversais e indicação dos pontos de medição.

As fotos VI.1 e VI.2 apresentam alguns aspectos desta ponte.

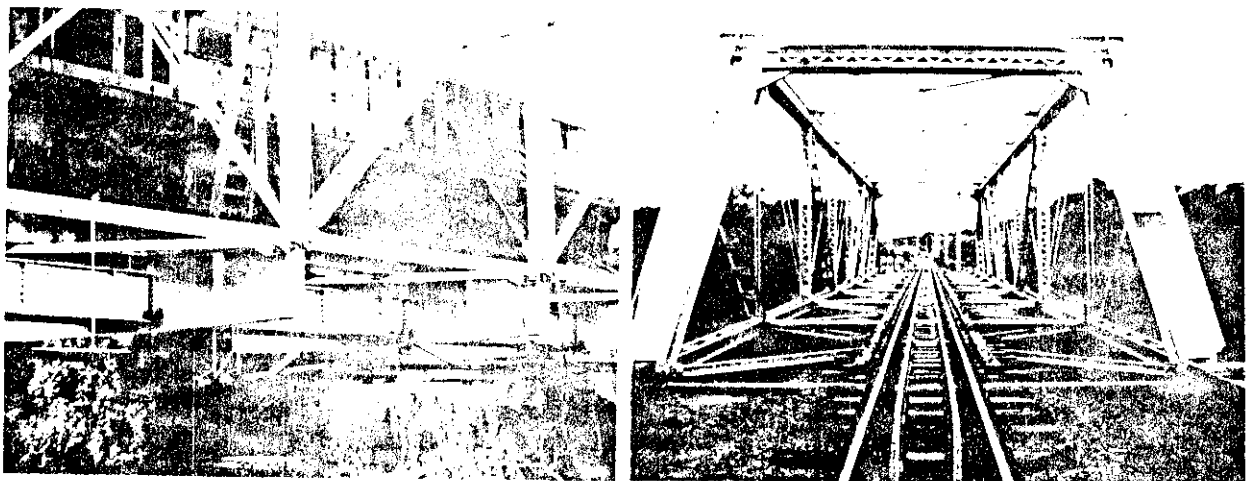


Foto VI.1-Locomotiva posicionada sobre a ponte - prova de carga. Foto VI.2-Ponte já recuperada para observar nível dos dormentes.

#### VI.5.3.4- Principais Resultados Obtidos

Apresentam-se, a seguir, os principais resultados das duas provas de carga realizadas sobre a ponte. Para comparação dos resultados, apresenta-se também os valores teóricos calculados para as treliças.

Para o cálculo teórico utilizou-se como hipótese a treliça isolada simplesmente apoiada e com as cargas aplicadas nos nós.

#### VI.5.3.5- Análise dos Resultados

Como já enfatizado, a análise dos resultados de uma prova de carga em pontes deve considerar as particulares não só do modelo teórico adotado, como também os equipamentos e condições da realização das medidas efetuadas.

No caso particular desta ponte, o objetivo principal a ser alcançado na prova de carga era verificar o comportamento global da estrutura após as alterações realizadas e também avaliar o comportamento dos elementos que foram reforçados.

O comportamento global da ponte pode ser verificado a partir dos deslocamentos medidos. Estes resultados, apresentados na Tabela VI.3 e VI.4, permitem concluir que o comportamento da ponte está coerente com o modelo teórico adotado - treliça isostática.

Nenhum dos deslocamentos medidos indicaram anomalias quanto ao comportamento global, ressaltando-se que é comum obter resultados de deslocamentos inferiores ao calculado. Como já explicado anteriormente, isto ocorre devido às redundâncias internas da estrutura e devido às imperfeições do modelo teórico na consideração da distribuição do carregamento.



TABELA VI.3- Resultados dos Deslocamentos

| DESLOCAMENTOS VERTICAIS (mm) |       |      |             |       |      |             |       |      |             |
|------------------------------|-------|------|-------------|-------|------|-------------|-------|------|-------------|
| Nro<br>Carr                  | Nó 2  |      |             | Nó 4  |      |             | Nó 6  |      |             |
|                              | Calc. | Med. | MED/<br>Cal | Calc. | Med. | MED/<br>Cal | Calc. | Med. | MED/<br>Cal |
| 1                            | 12,7  | 7,5  | 0,59        | 20,3  | 17,5 | 0,86        | 26,7  | 22,0 | 0,83        |
| 2                            | 12,8  | -    | -           | 20,5  | -    | -           | 27,0  | -    | -           |
| 3                            | 12,7  | 7,0  | 0,55        | 20,4  | 17,5 | 0,85        | 28,0  | 22,0 | 0,78        |
| 4                            | 11,3  | 7,5  | 0,66        | 20,2  | 18,0 | 0,89        | 27,7  | 23,0 | 0,83        |
| 5                            | 9,8   | 7,0  | 0,71        | 19,1  | 17,5 | 0,91        | 26,1  | 22,5 | 0,86        |
| 6                            | 9,4   | 7,0  | 0,74        | 18,6  | 17,5 | 0,94        | 25,7  | 22,5 | 0,87        |
| 9                            | 7,0   | -    | -           | 13,9  | -    | -           | 21,8  | -    | -           |
| 10                           | 4,4   | 3,5  | 0,79        | 8,9   | 10,5 | 1,18        | 14,8  | 15,0 | 1,01        |
| 11                           | 2,0   | 2,0  | 1,00        | 3,5   | 6,0  | 1,71        | 5,6   | 8,0  | 1,42        |
| 12                           | 0,6   | 1,0  | 1,66        | 1,3   | 2,5  | 1,92        | 2,1   | 3,0  | 1,42        |
| 13                           | 3,8   | -    | -           | 2,7   | -    | -           | 2,5   | -    | -           |
| 14                           | 5,5   | -    | -           | 7,5   | -    | -           | 6,7   | 5,0  | 0,75        |
| 15                           | 9,8   | 5,5  | 0,56        | 13,8  | 11,0 | 0,79        | 16,7  | 12,5 | 0,75        |
| 16                           | 11,5  | 7,5  | 0,65        | 18,2  | 16,0 | 0,88        | 22,7  | 19,5 | 0,85        |
| Nro<br>Carr                  | Nó 8  |      |             | Nó 10 |      |             | Nó 12 |      |             |
|                              | Calc. | Med. | MED/<br>Cal | Calc. | Med. | MED/<br>Cal | Calc. | Med. | MED/<br>Cal |
| 1                            | 25,7  | 21,5 | 0,83        | 18,6  | 16,0 | 0,86        | 9,4   | 7,5  | 0,79        |
| 2                            | 26,1  | -    | -           | 19,1  | -    | -           | 9,8   | -    | -           |
| 3                            | 27,7  | 21,5 | 0,78        | 20,2  | 16,0 | 0,79        | 11,3  | 8,0  | 0,71        |
| 4                            | 28,0  | 22,5 | 0,80        | 20,4  | 17,0 | 0,83        | 12,7  | 9,0  | 0,71        |
| 5                            | 27,0  | 22,5 | 0,83        | 20,5  | 17,0 | 0,83        | 12,8  | 9,0  | 0,70        |
| 6                            | 26,7  | 22,5 | 0,84        | 20,3  | 17,0 | 0,83        | 12,7  | 9,0  | 0,70        |
| 9                            | 22,7  | -    | -           | 18,2  | -    | -           | 11,5  | -    | -           |
| 10                           | 16,7  | 16,5 | 0,98        | 13,8  | 13,0 | 0,94        | 9,8   | 7,5  | 0,76        |
| 11                           | 6,7   | 9,5  | 1,42        | 7,5   | 8,5  | 1,13        | 5,5   | 5,0  | 0,91        |
| 12                           | 2,5   | 4,5  | 1,80        | 2,7   | 4,0  | 1,48        | 3,8   | -    | -           |
| 13                           | 2,1   | -    | -           | 1,3   | 2,5  | 1,92        | 0,6   | 1,0  | 1,66        |
| 14                           | 5,6   | -    | -           | 3,5   | -    | -           | 1,8   | 1,0  | 0,55        |
| 15                           | 14,2  | 10,0 | 0,70        | 8,9   | 6,5  | 0,73        | 4,4   | 2,5  | 0,57        |
| 16                           | 21,8  | 18,0 | 0,83        | 13,9  | 12,5 | 0,89        | 7,0   | 5,0  | 0,71        |

TABELA VI.4- Resultados de Deslocamentos

| DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS (mm)<br>Nó 14 |               |      |      |      |      |      |      |      |
|---|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Deslo<br>camen<br>to                    | CARREGAMENTOS |      |      |      |      |      |      |      |
|   | 1             | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
| Calc.                                   | 11,3          | 11,5 | 12,0 | 12,0 | 11,5 | 11,3 | 9,3  | 6,9  |
| Med.                                    | 5,7           | -    | 5,44 | 5,41 | 5,30 | 5,23 | 4,55 | 3,46 |
| Med/<br>Cal                             | 0,50          | -    | 0,45 | 0,45 | 0,46 | 0,46 | 0,49 | 0,50 |
| Deslo<br>camen<br>to                    | CARREGAMENTOS |      |      |      |      |      |      |      |
|   | 9             | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   |
| Calc.                                   | 9,3           | 6,9  | 3,5  | 1,7  | 1,7  | 3,5  | 6,9  | 9,3  |
| Med.                                    | 4,55          | 3,46 | 2,87 | -    | 0,61 | 1,34 | 2,75 | 3,88 |
| Med/<br>Cal                             | 0,49          | 0,50 | 0,82 | -    | 0,35 | 0,38 | 0,40 | 0,41 |

As medidas de deformações também foram coerentes, isto é, a maioria das medidas efetuadas apresentaram uma relação adequada com o modelo teórico adotado.

É interessante ressaltar que em algumas barras estas medidas apresentaram discrepância com os valores calculados. Isto ocorreu principalmente quando a leitura aproximou-se da sensibilidade do aparelho. As Tabelas VI.5 a VI.8 apresentam um resumo das tensões obtidas a partir da leitura de deformações nas várias barras da ponte.

Concluindo, salienta-se que os resultados obtidos na prova de carga permitiram verificar a eficiência das alterações realizadas e nenhuma anomalia foi constatada.

TABELA VI.5- Resultado da Prova de Carga -Banzo Inferior

|             |     |              | BANZO INFERIOR (Tensão em $\text{kn/cm}^2$ ) |              |             |              |               |              |             |              |
|-------------|-----|--------------|--|--------------|-------------|--------------|---------------|--------------|-------------|--------------|
| Bar-<br>ras | Car | Val.<br>Calc | TRAVE ESQUERDA                               |              |             |              | TRAVE DIREITA |              |             |              |
|             |     |              | 1°<br>Ensa.                                  | Ens/<br>Calc | 2°<br>Ensa. | Ens/<br>Calc | 1°<br>Ensa.   | Ens/<br>Calc | 2°<br>Ensa. | Ens/<br>Calc |
| 0-2         | 1   | 5,91         | 2,30   | ,39          | 3,30        | ,56          | 1,70          | ,29          | 2,10        | ,36          |
| 2-4         | 1   | 5,91         | 2,70   | ,46          | 4,70        | ,80          | 3,56          | ,60          | 2,60        | ,44          |
| 4-6         | 2   | 5,92         | 5,90   | 1,0          | 3,88        | ,66          | 4,48          | ,76          | 6,88        | 1,16         |
| 6-8         | 4   | 6,18         | 5,70   | ,92          | 3,00        | ,49          | 4,72          | ,76          | 4,73        | ,77          |
| 8-10        | 5   | 5,92         | 5,84   | ,99          | 3,60        | ,61          | (*)           | (*)          | 5,36        | ,91          |
| 10-12       | 6   | 5,91         | 4,16   | ,70          | 6,86        | 1,16         | (*)           | (*)          | 4,80        | ,81          |
| 12-14       | 6   | 5,91         | 5,06   | ,86          | 6,06        | 1,03         | 4,20          | ,71          | 4,66        | ,79          |

TABELA VI.6- Resultado da Prova de Carga - Banzo Superior

|             |     |                     | BANZO SUPERIOR (TENSÃO EM $\text{kn/cm}^2$ ) |              |             |              |               |              |             |              |
|-------------|-----|---------------------|--|--------------|-------------|--------------|---------------|--------------|-------------|--------------|
| Bar-<br>ras | Car | Val.<br>Calc<br>(-) | TRAVE ESQUERDA                               |              |             |              | TRAVE DIREITA |              |             |              |
|             |     |                     | 1°<br>Ensa.                                  | Ens/<br>Calc | 2°<br>Ensa. | Ens/<br>Calc | 1°<br>Ensa.   | Ens/<br>Calc | 2°<br>Ensa. | Ens/<br>Calc |
| 3-5         | 3   | 4,51                | (*)  | (*)          | -3,36       | ,75          | (*)           | (*)          | -2,00       | ,44          |
| 5-7         | 4   | 4,51                | (*)  | (*)          | -5,40       | 1,20         | (*)           | (*)          | -3,16       | ,70          |
| 7-9         | 4   | 4,51                | (*)  | (*)          | -3,96       | ,88          | (*)           | (*)          | -3,90       | ,86          |
| 9-11        | 5   | 3,69                | (*)  | (*)          | -4,10       | 1,11         | (*)           | (*)          | -4,06       | 1,10         |

TABELA VI.7- Resultado da Prova de Carga - Diagonais

|             |     |              | DIAGONAIS (Tensão em $\text{kN/cm}^2$ ) |              |             |              |               |              |             |              |
|-------------|-----|--------------|---|--------------|-------------|--------------|---------------|--------------|-------------|--------------|
| Bar-<br>ras | Car | Val.<br>Calc | TRAVE ESQUERDA                          |              |             |              | TRAVE DIREITA |              |             |              |
|             |     |              | 1°<br>Ensa.                             | Ens/<br>Calc | 2°<br>Ensa. | Ens/<br>Calc | 1°<br>Ensa.   | Ens/<br>Calc | 2°<br>Ensa. | Ens/<br>Calc |
| 1-4         | 8   | 6,64         | 5,54                                    | ,83          | 9,90        | 1,49         | 5,80          | ,87          | 7,66        | 1,15         |
| 3-6         | 9   | 7,62         | (*)                                     | (*)          | 5,60        | ,73          | (*)           | (*)          | 4,10        | ,54          |
| 5-8         | 10  | 3,56         | (*)                                     | (*)          | 4,20        | 1,18         | (*)           | (*)          | 3,20        | ,90          |
| 6-7         |     | (*)          | (*)                                     | (*)          | (*)         | (*)          | (*)           | (*)          | (*)         | (*)          |
| 8-9         | 16  | 5,74         | 4,60                                    | ,80          | 3,06        | ,53          | 7,66          | 1,33         | 4,30        | ,75          |
| 10-11       | 17  | 6,64         | (*)                                     | (*)          | 8,40        | 1,27         | 7,46          | 1,12         | 7,50        | 1,13         |

TABELA VI.8- Resultado da Prova de Carga - Montantes

|             |     |              | MONTANTES (Tensão em $\text{kN/cm}^2$ ) |              |             |              |               |              |             |              |
|-------------|-----|--------------|---|--------------|-------------|--------------|---------------|--------------|-------------|--------------|
| Bar-<br>ras | Car | Val.<br>Calc | TRAVE ESQUERDA                          |              |             |              | TRAVE DIREITA |              |             |              |
|             |     |              | 1°<br>Ensa.                             | Ens/<br>Calc | 2°<br>Ensa. | Ens/<br>Calc | 1°<br>Ensa.   | Ens/<br>Calc | 2°<br>Ensa. | Ens/<br>Calc |
| 1-2         | 7   | 5,59         | 4,60                                    | ,82          | 8,36        | 1,50         | 4,60          | ,82          | 6,00        | 1,07         |
| 3-4         | 8   | -2,7         | -0,860                                  | ,31          | ,66         | -,24         | -2,36         | ,86          | -2,30       | ,84          |
| 5-6         | 9   | -,73         | -5,60                                   | ,77          | (*)         | (*)          | 1,80          | (*)          | -1,50       | 2,05         |
| 7-8         | 16  | -,73         | 1,760                                   | (*)          | -1,66       | 2,27         | -,60          | ,82          | -2,16       | 2,96         |
| 9-10        | 17  | -2,7         | -2,16                                   | ,79          | -1,40       | ,51          | -1,00         | ,36          | -2,73       | ,99          |
| 11-12       | 18  | 5,59         | 6,290                                   | 1,13         | 5,60        | 1,00         | 5,56          | ,99          | 5,40        | ,97          |

Observações: - Os resultados em (\*) não foram medidos;  
 - Os valores das tensões foram obtidos admitindo comportamento elástico e  $E = 20.500\text{kN/cm}^2$   
 - Convencionou-se 1° ensaio como sendo a primeira prova de carga e 2° ensaio a segunda, após a recuperação da ponte.

## VI.5.4 - Prova de Carga - Ponte Ferroviária RFFSA

### VI.5.4.1- Descrição da Ponte

A ponte da RFFSA está situada no Km 62+200 da Linha Curitiba-Paranaguá. É constituída de duas vigas principais em alma cheia rebitada, com variação na seção transversal.

As transversinas são engastadas nas vigas principais, constituindo um tabuleiro intermediário. Há variação da altura da transversina na ligação com as vigas principais caracterizando assim um engaste.

As longarinas são vigas em perfil laminado, simplesmente apoiadas, com a ligação com as transversinas sendo feita através de rebites com cantoneira de alma.

As Figuras VI.22 a VI.24 apresentam o esquema geral desta ponte e os principais detalhes construtivos.

Esta ponte foi reforçada pelo Eng. Machado da Costa na década de quarenta, devido ao aumento do trem tipo (de  $\approx 8t$  para 16t/eixo).

O reforço executado consistiu na transformação das vigas principais em vigas armadas com a utilização de quatro tirantes de 50mm de diâmetro. A seção da viga principal foi reforçada pela adição de chapas e cantoneiras.

As longarinas foram reforçadas pela duplicação dos perfis e as transversinas tiveram sua seção transversal aumentada por chapas nas mesas superior e inferior.

A realização da prova de carga foi proposta à RFFSA com o objetivo de verificar as condições reais da referida ponte. A corrosão, dos cabos e de alguns elementos principais da ponte, foi o principal problema observado nas inspeções realizadas.

O comprometimento da seção transversal dos tirantes atingiu, em alguns pontos, cinquenta por cento da seção transversal.

Paralelamente ao trabalho de substituição dos cabos foi desenvolvido este programa de ensaio na ponte em questão.



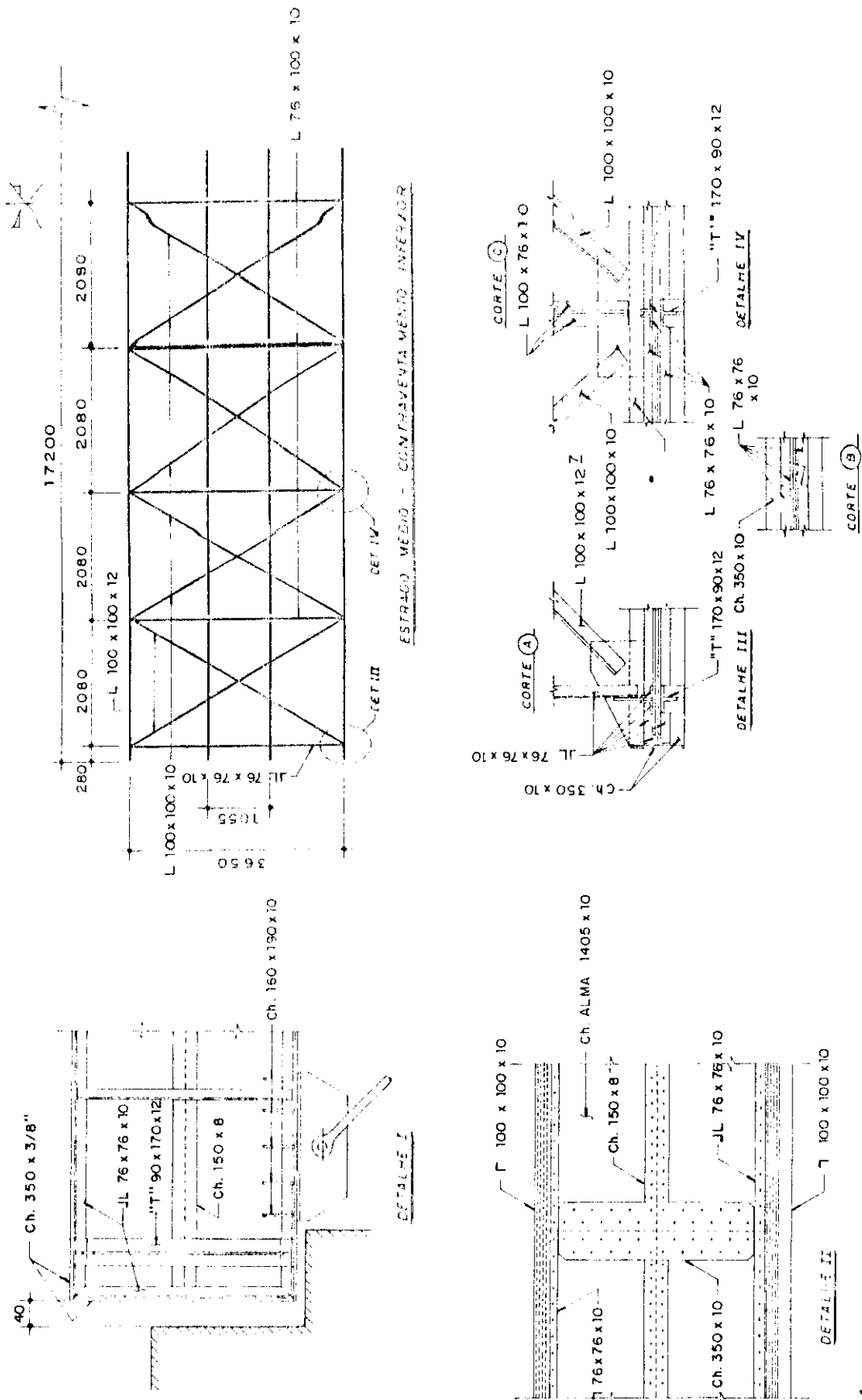


Figura VI.23 - Esquema do Contraventamento

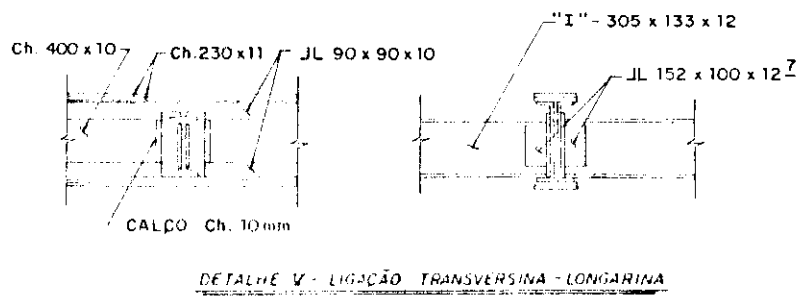
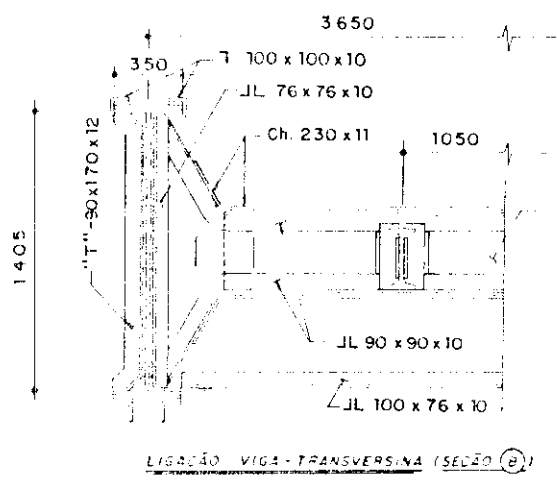
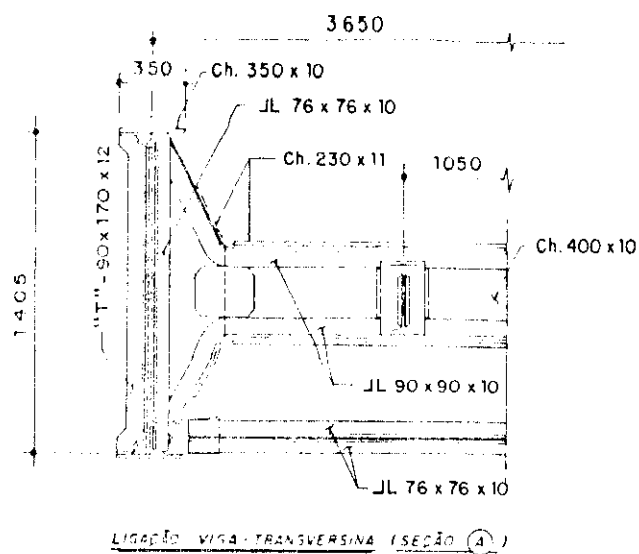


Figura VI.24- Detalhes e Características Principais da Transversina e Longarina



#### VI.5.4.2- Instrumentação da Prova de Carga

Foram utilizados extensômetros elétricos de resistência KYOWA KFC - 5 C1-11, uniaxiais, e rosetas KFC - 5 D17 - 11 nos vários pontos instrumentados da ponte objetivando avaliar as deformações dos elementos principais.

A Figura VI.25 ilustra o posicionamento dos extensômetros na seção transversal da viga principal.

As Figuras VI.26 a VI.28 indicam o posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência nos vários pontos instrumentados. É interessante ressaltar que estes extensômetros foram colados utilizando-se um adesivo à base de cianoacrilato sobre a superfície previamente jateada com areia e lixada para melhor uniformização.

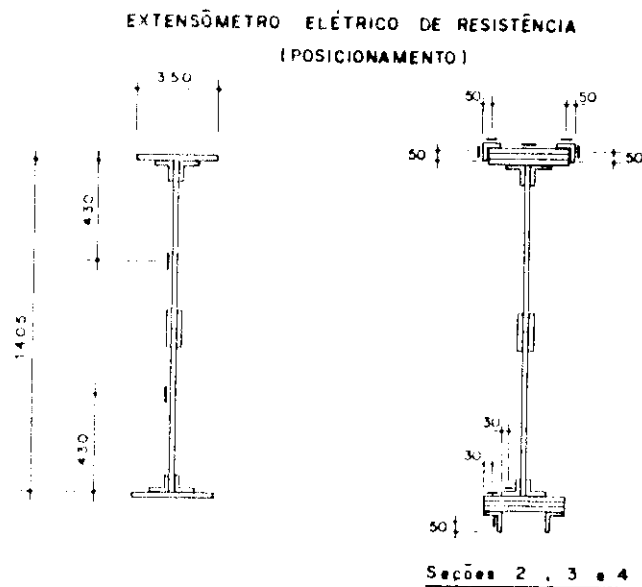
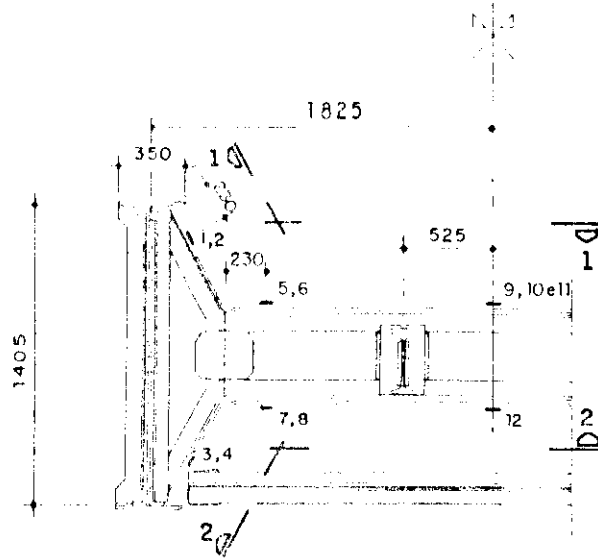
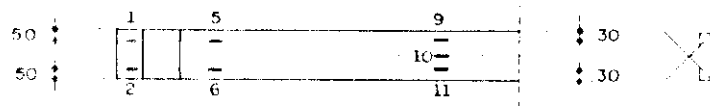


Figura VI.25- Posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência na seção transversal da viga

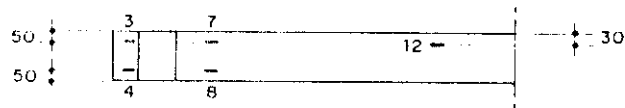




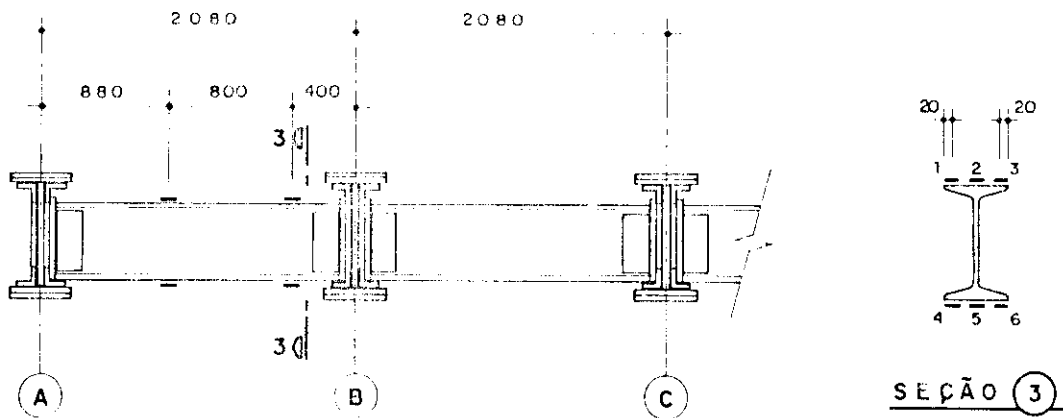
**EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA  
(TRANSVERSINA)**



**VISTA 1**



**VISTA 2**



**(LONGARINA)**

Figura VI.27- Posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência na longarina e transversina

As leituras foram efetuadas utilizando um indicador portátil de deformações TRANSDUTEC - T832, associado a caixas comutadoras.

As fotos VI.3 e VI.4 ilustram uma vista geral da ponte e o técnico trabalhando na instrumentação de uma seção com os extensômetros elétricos já colados.

É interessante ressaltar que na instrumentação de uma ponte rebitada é necessário adequar o posicionamento dos pontos em função da disposição dos rebites e chapas de emenda.

É razoavelmente comum o deslocamento de pontos previamente definidos em função destas interferências.

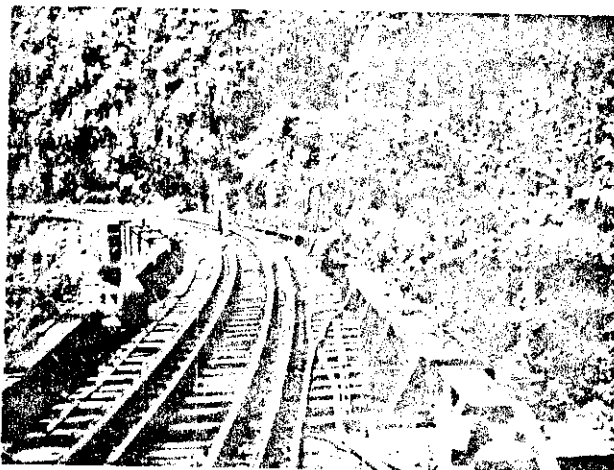


Foto VI.3- Vista Geral da ponte

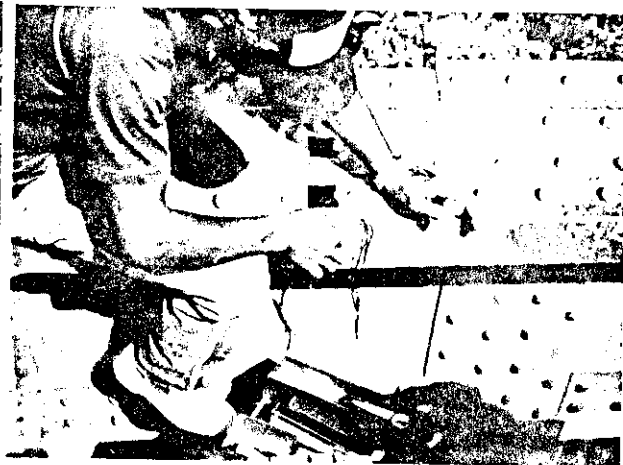


Foto VI.4- Seção transversal com os extensômetros elétricos de resistência já colados e protegidos.

Foram medidos deslocamentos horizontais do apoio móvel e do montante da viga armada na ligação com o tirante, utilizando relógios comparadores MITUTOYO com 50mm de curso e sensibilidade de 0,01mm. Os resultados indicaram que não houve deslocamento para os vários carregamentos.

Ressalta-se que, devido às condições de acesso a ponte, não foi possível medir os deslocamentos verticais. A transferência destes deslocamentos para o solo era inviável (a altura da ponte em relação ao solo é de aproximadamente 40m em região montanhosa e de difícil acesso) e o

dispositivo baseado em cabos projetado para tal finalidade apresentou resultados não confiáveis.

#### VI.5.4.3- Carregamentos

Uma locomotiva diesel G22-U de quatro eixos com 182,5 kN/eixo de peso nominal foi utilizada para efetuar o carregamento da ponte.(Figura VI.28)

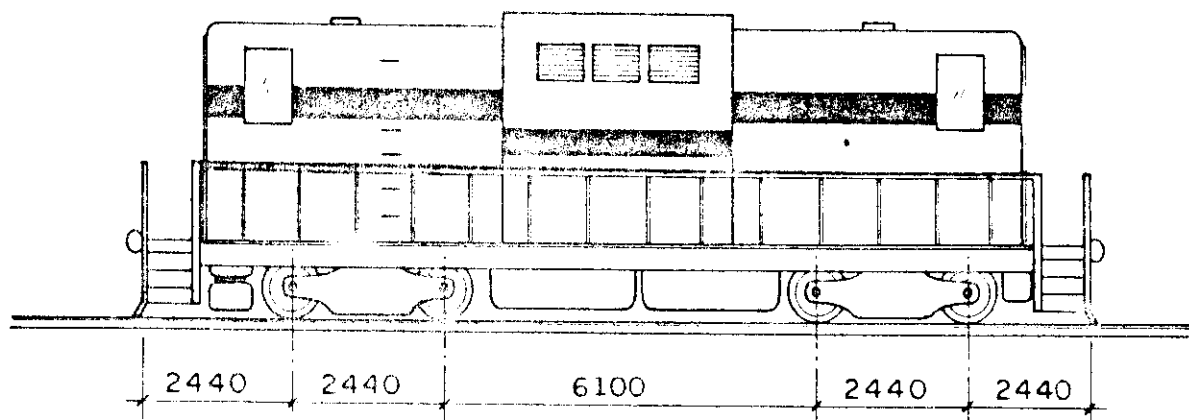


Figura VI.28- Esquema da locomotiva G22-U

Normalmente, para provas de carga de pontes que estão em operação, é comum a utilização de locomotivas para efetuar o carregamento. Trata-se portanto de uma prova de carga em que o principal objetivo é avaliar o comportamento da estrutura em regime de serviço.

Foram realizadas medições de deformações em dois dias diferentes, tendo em vista a quantidade significativa de pontos instrumentados e o período de tempo limitado de interrupção do tráfego. Mediram-se as deformações da viga principal na primeira prova de carga com os carregamentos apresentados na Figura VI.29. Na Figura VI.30 estão esquematizados os seis carregamentos utilizados para as medidas de deformações da transversina e longarina.



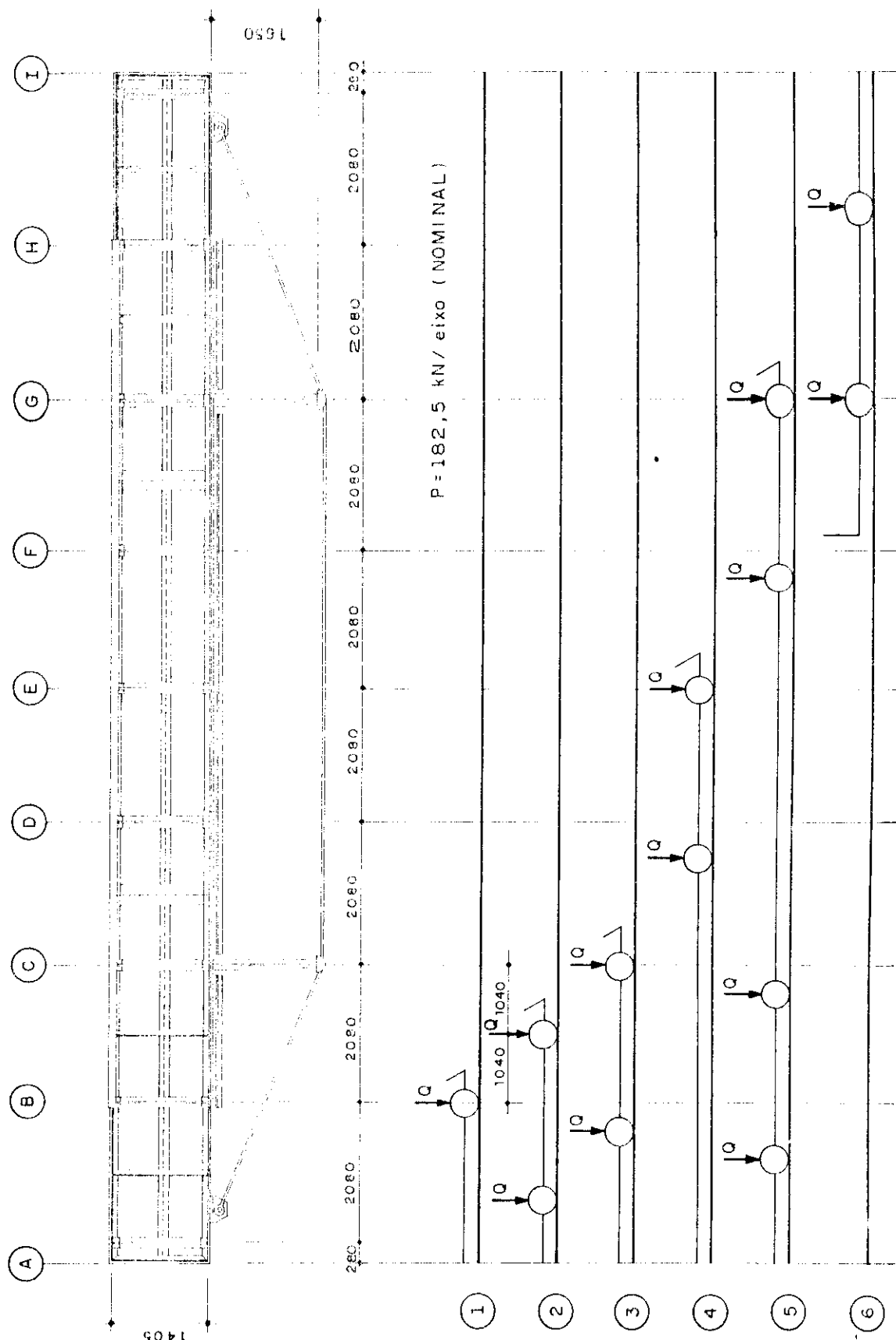


Figura VI.30 - Posição da locomotiva - Deformações Longarina e Transversina

As fotos VI.5 e VI.6 apresentam uma vista geral da ponte (dois tramos) e o posicionamento da locomotiva durante a prova de carga. As fotos VI.7 e VI.8 apresentam-se detalhes da instrumentação e dos equipamentos de medição.

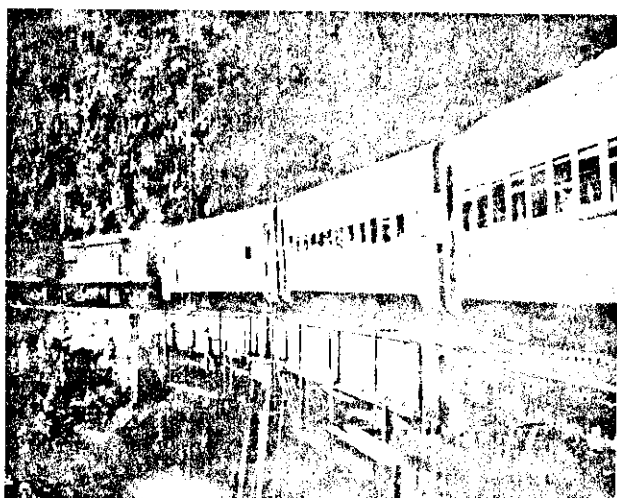


Foto VI.5- Vista geral da ponte. Trem de passageiros.

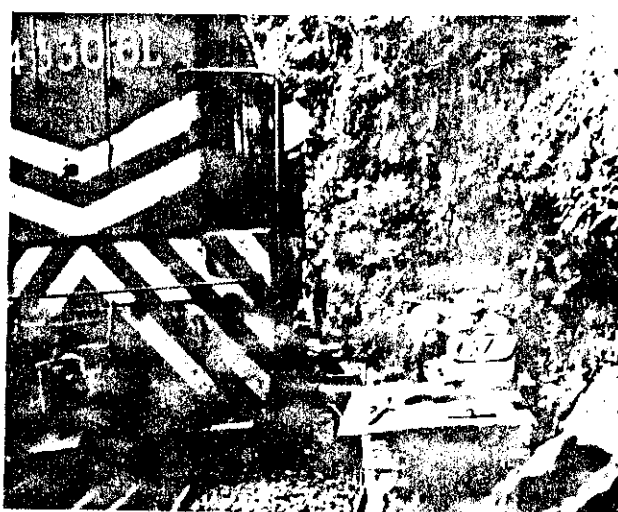


Foto VI.6- Locomotiva posicionada sobre a ponte durante a prova de carga.



Foto VI.7- Detalhe da operação do indicador de deformações.



Foto VI.8- Detalhe da instrumentação dos tirantes.





estrutura ou seja:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad \text{e} \quad \varepsilon_{\text{calc}} = \frac{\sigma}{E}$$

$$\sigma = \frac{N}{A_g} \quad \text{e} \quad \varepsilon_{\text{calc}} = \frac{\sigma}{E}$$

Adotou-se  $E = 20.500 \text{ kN/cm}^2$ .

É interessante ressaltar que no cálculo teórico a transferência do momento fletor gerado pela excentricidade do consolo em relação ao eixo da viga foi gerado por um elemento rígido (rigidez próxima da viga principal).

As tabelas VI.8 a VI.12, apresentam os principais resultados das deformações obtidas na prova de carga, bem como os valores teóricos obtidos a partir da modelagem acima descrita.

TABELA VI.9 - DEFORMAÇÕES NOS TIRANTES ( $\varepsilon \times 10^6$ )

| VIGA DIREITA  |                 |                    |      |      |      |                 |                     |      |      |      |
|---------------|-----------------|--------------------|------|------|------|-----------------|---------------------|------|------|------|
| CAR           | DEFOR.<br>CALC. | TIRANTES POSIÇÃO I |      |      |      | DEFOR.<br>CALC. | TIRANTES POSIÇÃO II |      |      |      |
|               |                 | No.1               | No.2 | No.3 | No.4 |                 | No.1                | No.2 | No.3 | No.4 |
| 1             | 51              | 31                 | 43   | 47   | 47   | 46              | 48                  | 43   | 53   | 28   |
| 2             | 81              | 61                 | 79   | 80   | 78   | 75              | 69                  | 66   | 75   | 38   |
| 3             | 125             | 87                 | 108  | 107  | 104  | 115             | 102                 | 95   | 173  | 57   |
| VIGA ESQUERDA |                 |                    |      |      |      |                 |                     |      |      |      |
| CAR           | DEFOR.<br>CALC. | TIRANTES POSIÇÃO I |      |      |      | DEFOR.<br>CALC. | TIRANTES POSIÇÃO II |      |      |      |
|               |                 | No.1               | No.2 | No.3 | No.4 |                 | No.1                | No.2 | No.3 | No.4 |
| 1             | 51              | 40                 | 49   | 42   | 49   | 46              | 40                  | 57   | 44   | 45   |
| 2             | 81              | 71                 | 76   | 74   | 73   | 75              | 63                  | 81   | 62   | 57   |
| 3             | 125             | 94                 | 100  | 95   | 99   | 115             | 96                  | 105  | 99   | 81   |

Nota: Os resultados da viga direita são valores médios de dois extensômetros e da viga da esquerda, um extensômetro por seção.

TABELA VI.10- DEFORMAÇÕES VIGA PRINCIPAL - PONTO 2( $\epsilon \times 10^6$ )

|   | DEFOR.<br>CALC. | CANT.SUP.<br>- POS.1 |     | DEFOR.<br>CALC. | CANT.SUP.<br>- POS.2 |     | DEFOR.<br>CALC. | CHAPA<br>SUP.<br>3 |
|---|-----------------|----------------------|-----|-----------------|----------------------|-----|-----------------|--------------------|
|   |                 | 2                    | 4   |                 | 1                    | 5   |                 |                    |
| 1 | -44             | -43                  | -56 | -41             | -43                  | -53 | -43             | -53                |
| 2 | -34             | -49                  | -42 | -32             | -48                  | -46 | -33             | -43                |
| 3 | -43             | -42                  | -58 | -40             | -42                  | -56 | -42             | -54                |
|   | DEFOR.<br>CALC. | CANT.INF.<br>- POS.1 |     | DEFOR.<br>CALC. | CANT.INF.<br>- POS.2 |     | DEFOR.<br>CALC. | CHAPA<br>INF.<br>6 |
|   |                 | 7                    |     |                 | 8                    |     |                 |                    |
| 1 | 51              | 31                   |     | 57              | 39                   |     | 51              | -                  |
| 2 | 38              | 6                    |     | 30              | 16                   |     | 37              | -                  |
| 3 | 50              | 22                   |     | 55              | 42                   |     | 49              | -                  |

TABELA VI.11- DEFORMAÇÕES VIGA PRINCIPAL - PONTO 3( $\epsilon \times 10^6$ )

|   | DEFOR.<br>CALC. | CANT.SUP.<br>- POS.1 |     | DEFOR.<br>CALC. | CANT.SUP.<br>- POS.2 |     | DEFOR.<br>CALC. | CHAPA<br>SUP.<br>3 |
|---|-----------------|----------------------|-----|-----------------|----------------------|-----|-----------------|--------------------|
|   |                 | 2                    | 4   |                 | 1                    | 5   |                 |                    |
| 1 | -38             | -42                  | -39 | -35             | -52                  | -40 | -37             | -43                |
| 2 | -58             | -53                  | -76 | -54             | -52                  | -93 | -57             | -75                |
| 3 | -55             | -62                  | -46 | -51             | -58                  | -55 | -54             | -67                |
|   | DEFOR.<br>CALC. | CANT.INF.<br>- POS.1 |     | DEFOR.<br>CALC. | CANT.INF.<br>- POS.2 |     | DEFOR.<br>CALC. | CHAPA<br>INF.<br>6 |
|   |                 | 7                    |     |                 | 8                    |     |                 |                    |
| 1 | 44              | 25                   |     | 48              | 39                   |     | 43              | 28                 |
| 2 | 68              | 27                   |     | 75              | 45                   |     | 67              | 39                 |
| 3 | 64              | 30                   |     | 71              | 42                   |     | 63              | 35                 |

TABELA VI.12- DEFORMAÇÕES VIGA PRINCIPAL - PONTO 4( $\epsilon \times 10^6$ )

|   | DEFOR.<br>CALC. | CANT.SUP.<br>- POS.1 |      | DEFOR.<br>CALC. | CANT.SUP.<br>- POS.2 |      | DEFOR.<br>CALC. | CHAPA<br>SUP.<br>3 |
|---|-----------------|----------------------|------|-----------------|----------------------|------|-----------------|--------------------|
|   |                 | 2                    | 4    |                 | 1                    | 5    |                 |                    |
| 1 | -27             | -47                  | -31  | -25             | -50                  | -39  | -27             | -41                |
| 2 | -63             | -91                  | -112 | -58             | -66                  | -118 | -61             | -77                |
| 3 | -64             | -91                  | -88  | -59             | -97                  | -75  | -62             | -75                |
|   | DEFOR.<br>CALC. | CANT.INF.<br>- POS.1 |      | DEFOR.<br>CALC. | CANT.INF.<br>- POS.2 |      | DEFOR.<br>CALC. | CHAPA<br>INF.<br>6 |
|   |                 | 7                    |      |                 | 8                    |      |                 |                    |
| 1 | 32              | 37                   |      | 35              | 29                   |      | 27              | 36                 |
| 2 | 73              | 66                   |      | 80              | 61                   |      | 63              | 59                 |
| 3 | 74              | 58                   |      | 81              | 52                   |      | 64              | 61                 |

#### VI.6- Conclusões

As provas de carga constituem um importante método de avaliação estrutural de pontes, permitindo aos calculistas obter desde informações gerais sobre o "caminhamento das cargas" até informações localizadas sobre o comportamento de um nó ou de um elemento isolado.

O êxito de uma prova de carga está diretamente relacionado com a escolha dos equipamentos de medição compatíveis com as esperadas, ou seja com a sensibilidade adequada, na capacidade técnica e treinamento da equipe responsável pela sua realização.

Recomenda-se a utilização de relógios comparadores para as medições de deslocamentos, cujos resultados permitem obter informações sobre o comportamento de toda a estrutura, e extensômetros elétricos de resistência, para as medições de deformações nos elementos estruturais; com estes resultados é possível estimar as tensões atuantes e analisá-las pontualmente.

O número de extensômetros elétricos a serem utilizados numa seção transversal de um elemento está diretamente relacionado com o tipo de solicitação a que este esta

submetido e também com suas dimensões.

Em geral, medidas em elementos tracionados podem ser efetuadas com três extensômetros sendo possível estabelecer o valor médio como representativo das deformações na seção instrumentada; em elementos comprimidos, o número de pontos instrumentados será função direta das dimensões da seção transversal, não sendo recomendado um número inferior a três e a média das leituras também pode ser considerada representativa das deformações no ponto analisado.

Para as vigas fletidas recomenda-se utilizar três extensômetros elétricos em cada uma das mesas, possibilitando assim avaliar as tensões provenientes dos momentos fletores e rosetas para avaliar as tensões de cisalhamento. Saliencia-se que estes números de pontos são para as vigas normalmente encontradas em pontes. Para os casos de seções com grandes dimensões, estas recomendações devem ser devidamente avaliadas.

Um outro aspecto importante a destacar é que uma prova de carga exige um bom planejamento e uma interação entre a equipe responsável pelo ensaio, os engenheiros calculistas e os responsáveis pela operação da ponte. Esta consideração é particularmente relevante pois não são desprezíveis os custos envolvidos na realização de uma prova de carga, que se executada sem esta interação e planejamento estará fadada ao insucesso.

Os exemplos de prova de carga apresentados mais detalhadamente neste capítulo — uma ponte rodoviária do Canadá e duas pontes ferroviárias do Brasil — possibilitam ao leitor obter informações gerais dos procedimentos de execução, dos resultados obtidos e a comparação destes com os calculados teoricamente. Estes exemplos permitem também avaliar os resultados das medições obtidos através de extensômetros mecânicos e elétricos de resistência, exemplificando assim a questão da sensibilidade de cada equipamento de medição.

Cabe também reforçar, o aspecto já descrito anteriormente, que o trem tipo de ensaio para pontes em operação, deve ser tal que em nenhum dos elementos

estruturais sejam atingidos os estados limites.

Concluindo, a realização de provas de carga é um importante método de avaliação estrutural e os resultados obtidos não se restringem somente na análise da ponte ensaiada, mas é também uma importante fonte de conhecimentos para o desenvolvimento do cálculo estrutural e para a normalização.

## CAPITULO VII

### ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIGAS REBITADAS

#### VII.1- Preliminares

A utilização de rebites como meio de ligação ocorreu até fins da década de 50 e a sua eficiência pode ser avaliada pelas grandes obras construídas com este elemento de ligação de chapas e perfis, tais como: ponte Golden Gate, Empire State Building, a ponte Ercílio Luz entre tantas outras.

A proposta deste estudo experimental tem como objetivos fornecer subsídios e esclarecer dúvidas aparentemente simples, porém, de grande interesse para o estudo global da recuperação de pontes, resumidamente:

- a) comportamento de vigas rebitadas considerando o enfraquecimento devido aos furos da seção na região tracionada;
- b) eficiência no reforço de vigas fletidas utilizando aumento da seção transversal e tirantes;
- c) grau de variação das deformações (tensões) nas seções com e sem rebites, medidas com extensômetros elétricos de resistência.

Trabalhos experimentais utilizando elementos rebitados foram largamente realizados desde o início do século, porém,

após a década de cinquenta muito pouco foi feitoa devido a substituição deste meio de ligação por parafusos comuns, de alta resistência e a solda elétrica, não despertando mais o interesse da comunidade científica, exceto os especialistas em recuperações.

É conveniente ressaltar que existem poucos trabalhos experimentais cujos resultados das deformações foram obtidos utilizando extensômetros elétricos de resistência.

A instrumentação com extensômetros elétricos de resistência possibilita medições praticamente pontuais que estão sujeitas a concentrações de deformações e possíveis interferências dos elementos de ligação e, em particular dos rebites.

A obtenção de resultados com este método de medição de deformações reveste-se de grande importância tendo em vista as vantagens da utilização de extensômetros elétricos já relatadas anteriormente. Esta avaliação dos dados obtidos é particularmente importante para uma melhor análise dos resultados a serem obtidos em provas de carga de pontes existentes com este método de medição.

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho podem ser classificados como um retorno às "origens" dos ensaios em vigas de aço com novos métodos de avaliação de deformações. Espera-se contribuir para uma melhor análise das provas de carga em pontes a partir dos dados obtidos nos ensaios de modelos de vigas fletidas.

Quanto aos estudos referentes aos rebites é importante salientar uma proposta de revisão dos conceitos da fadiga em estruturas rebitadas apresentada pelo prof. Fischer<sup>1</sup>. No artigo intitulado "Fatigue strength of riveted bridge members" estão relacionadas e discutidas as propostas de alteração das normas americanas de pontes no tocante a verificação da fadiga em estruturas rebitadas.

<sup>1</sup> FISHER, J.W., YEN, B.T. WANG, D. Fatigue strenght of riveted bridge members. Journal of Strutural Engineering, ASCE, v.116, n.11, p.2968-2981, Nov. 1990.



## VII.2- Modelos Propostos

Os modelos de vigas fletidas foram projetados procurando adequar as diferentes variáveis envolvidas no dimensionamento de uma viga rebitada (altura, espessura de chapa da mesa e alma, afastamento entre rebites, etc.) às recomendações de projeto para vigas de pontes. Consideraram-se também as limitações de dimensão e capacidade de carregamento impostas pelas instalações do Laboratório de Estruturas da EESC-USP.

Na Tabela VII.1, abaixo, estão apresentadas as características geométricas dos perfis considerando o eixo principal de inércia (x) no centro de gravidade da seção.

TABELA VII.1 - Características dos modelos - Vigas Rebitadas

| MODELO | ÁREA<br>(cm <sup>2</sup> ) |                | INÉRCIA (X)<br>(cm <sup>4</sup> ) |                | MOD.RESI.<br>(cm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup> |                | ÁREA<br>TIRANTES<br>(cm <sup>2</sup> ) | OBSERV.             |
|--------|----------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|--|----------------|--|---------------------|
|        | A <sub>g</sub>             | A <sub>n</sub> | I <sub>g</sub>                    | I <sub>n</sub> | W <sub>b</sub>                                 | W <sub>n</sub> |  |                     |
| VIGA 1 | 44,8                       | 38,1           | 9720                              | 7965           | 540  | 443            | -                                      |                     |
| VIGA 2 | 56,8                       | 46,0           | 13600                             | 10990          | 737  | 595            | -                                      | Reforço da mesa     |
| VIGA 3 | 44,6                       | 38,1           | 9720                              | 7965           | 540  | 443            | 4,02                                   | Tirante reto 2φ16mm |
| VIGA 4 | 56,8                       | 46,0           | 13600                             | 10990          | 737  | 595            | 6,28                                   | Viga Armada 2φ20mm  |

NOTA: (1) Fibra extrema

Foram fabricadas três vigas sendo a Viga 1 constituída de uma única chapa de mesa. A Viga 2 foi reforçada com uma chapa por mesa com comprimento inferior ao total da viga.

A Viga 3 tem as mesmas características geométricas da Viga 1 e foi reforçada com dois tirantes retos com diâmetro nominal de 16mm.

A Viga 4 foi fabricada com a mesma viga utilizada no

ensaio da Viga 2, que após o ensaio desta foi reforçada por tirantes (viga armada).

Nas figuras VII.1 a VII.4, encontram-se esquematizadas as vigas que foram ensaiadas.

Em geral, o cálculo de vigas rebitadas é desenvolvido considerando as características geométricas dos perfis enfraquecidas pelos furos.

O enfraquecimento da seção transversal, devido a presença dos furos para o posicionamento dos rebites, acarreta uma diminuição considerável no cálculo do momento resistente.

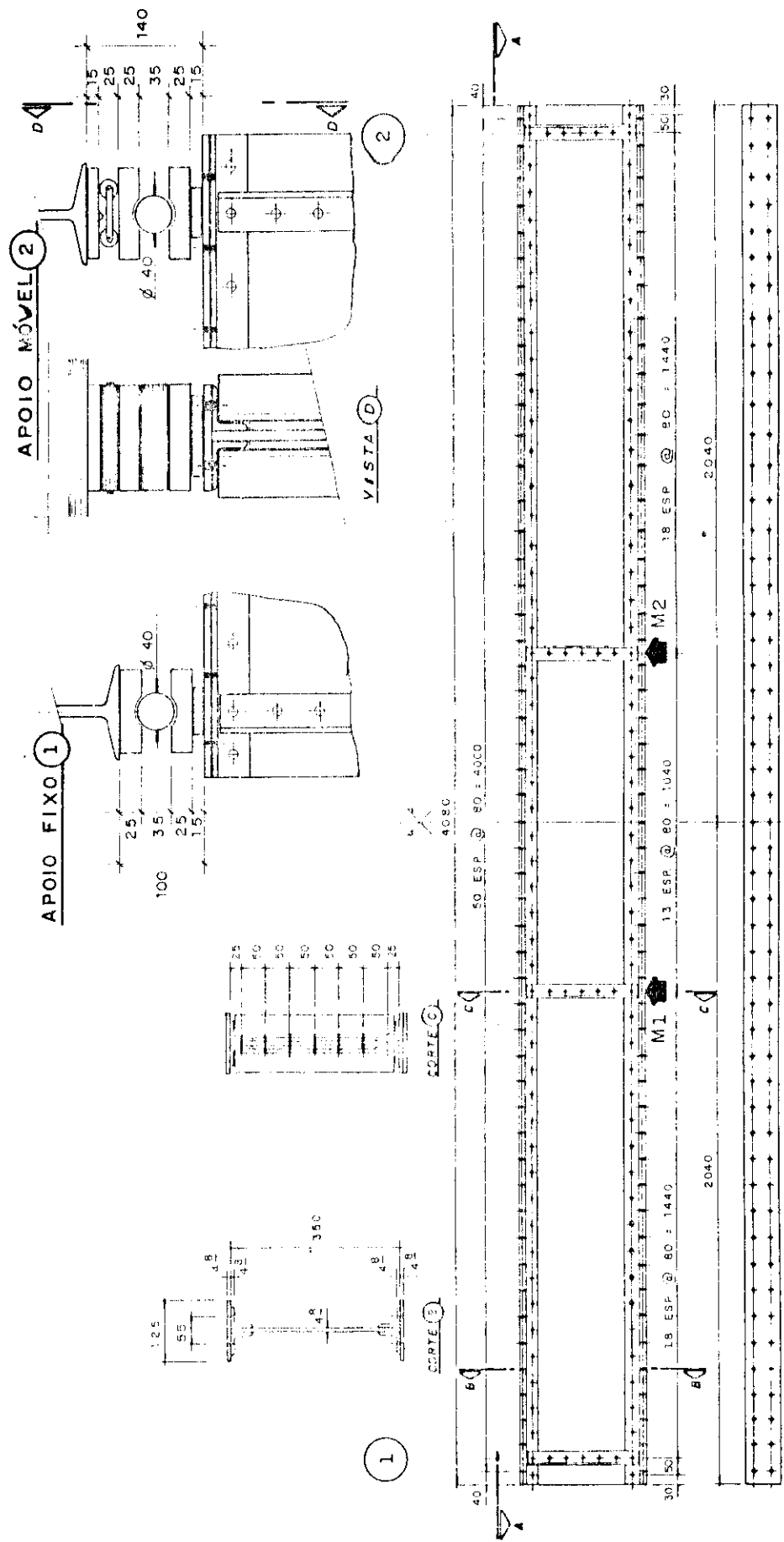
Na Tabela VII.2 estão apresentadas as características geométricas dos perfis considerando a diminuição destas devido aos furos na região tracionada.

TABELA VII.2 -Características dos Modelos - Viga Rebitada  
Seção Assimétrica - Mesa Inferior Enfraquecida

| MODELO | $Y_{cg}^{(1)}$<br>(cm) | ÁREA<br>( $cm^2$ ) |       | INÉRCIA<br>( $cm^4$ ) |       | MÓDULO DE RESIST.<br>( $cm^3$ ) <sup>(2)</sup> |      |       |      |
|--------|------------------------|--------------------|-------|-----------------------|-------|--|------|-------|------|
|        |                        | $A_g$              | $A_n$ | $I_g$                 | $I_n$ | $W_g$  |      | $W_n$ |      |
|        |                        |                    |       |                       |       | sup  | inf. | sup   | inf. |
| VIGA 1 | 1,40                   | 44,8               | 40,1  | 9898                  | 8270  | 617  | 496  | 515   | 415  |
| VIGA 2 | 3,38                   | 56,8               | 50,7  | 13450                 | 10930 | 891  | 615  | 724   | 500  |
| VIGA 3 | 1,40                   | 44,8               | 40,1  | 9898                  | 8270  | 617  | 496  | 515   | 415  |
| VIGA 4 | 3,38                   | 56,8               | 50,7  | 13450                 | 10930 | 891  | 615  | 724   | 500  |

(1)  $y_{cg}$  é a distância entre o eixo de simetria e o centro de gravidade da seção com enfraquecimento na aba inferior.

(2) Módulo de resistência nas fibras extremas.



- NOTAS: -
- M1 E M2 : POSICIONAMENTO DOS MACACOS
  - EIXOS 1 E 2 APOIOS

Figura VII.1 - Esquema Geral - Viga 1

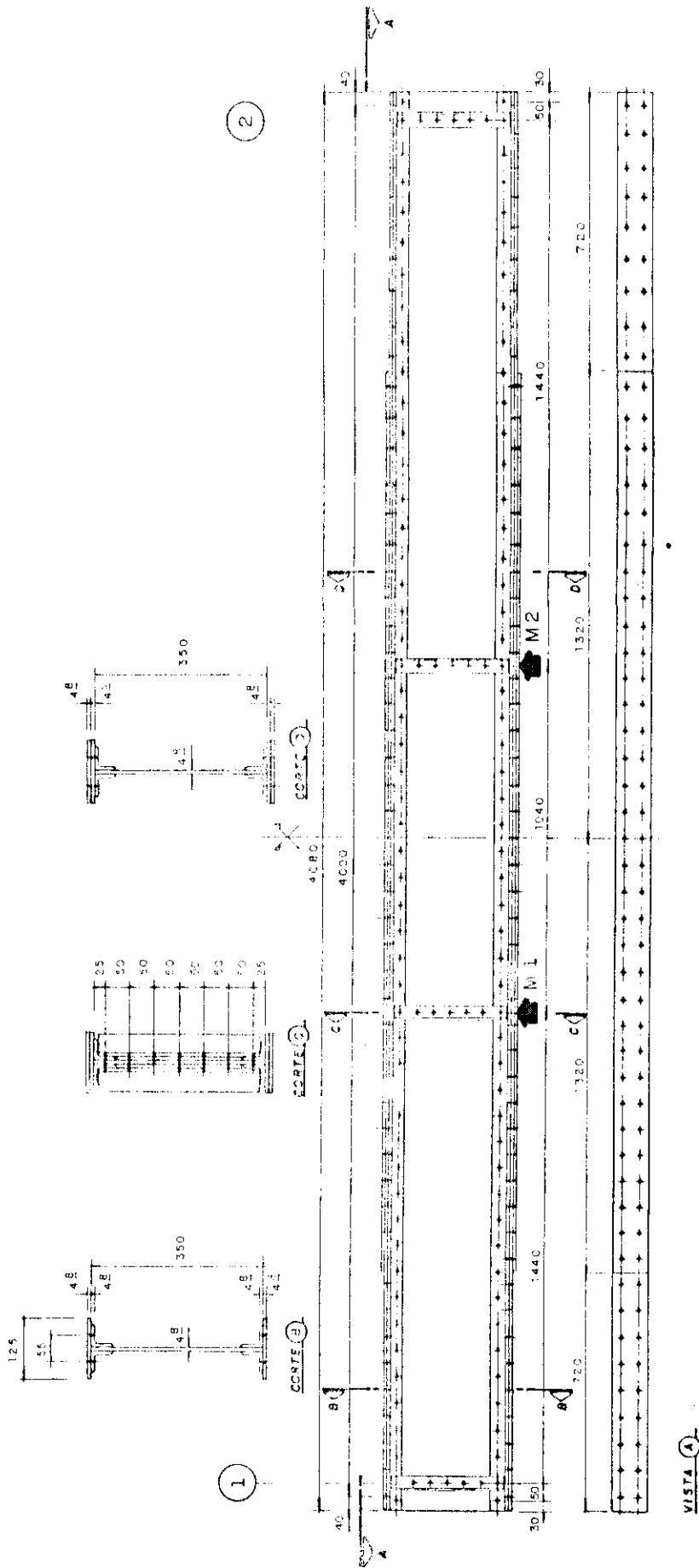


Figura VII.2 - Esquema Geral — Viga 2

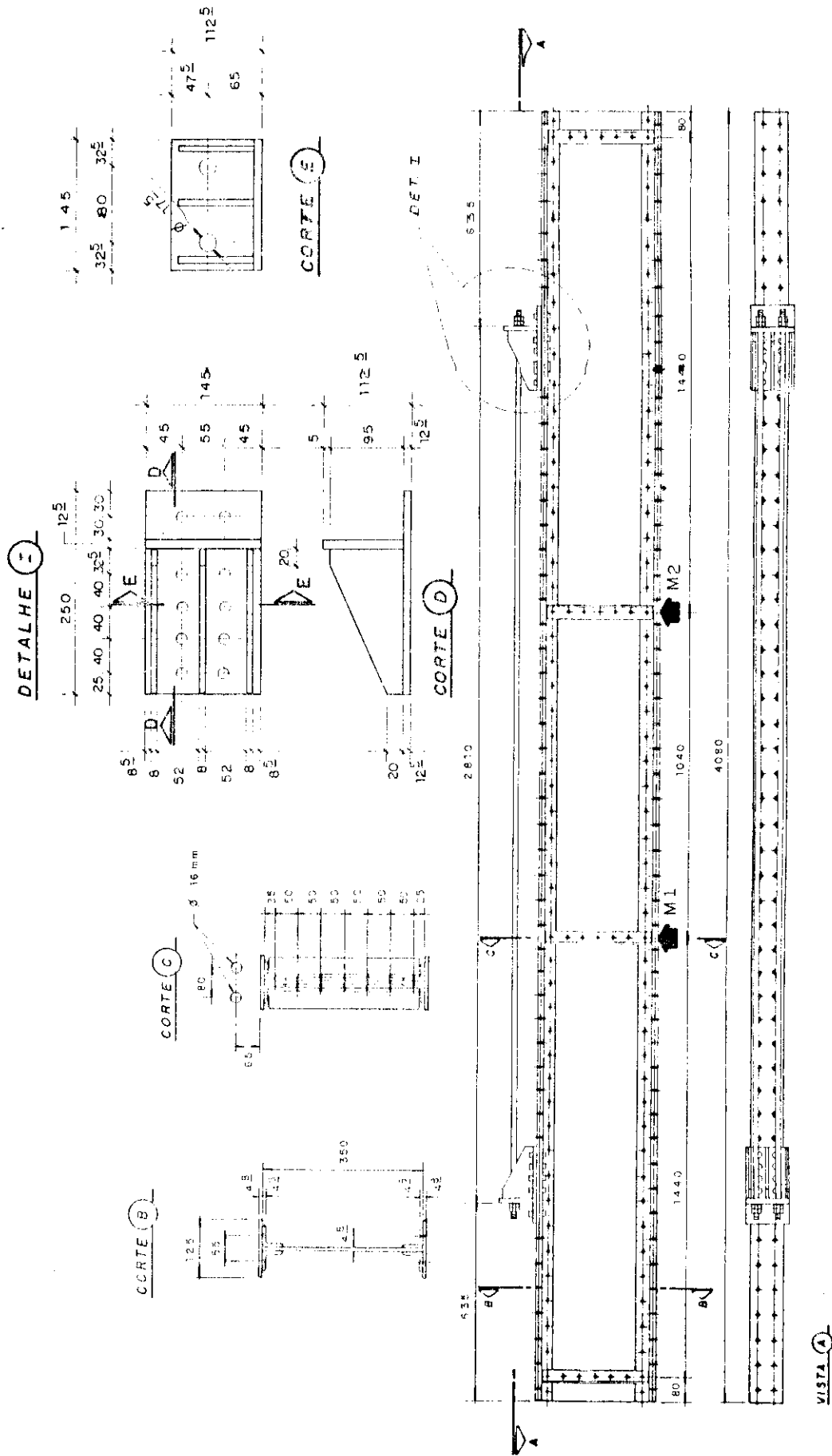


Figura VII.3 - Esquema Geral - Viga 3

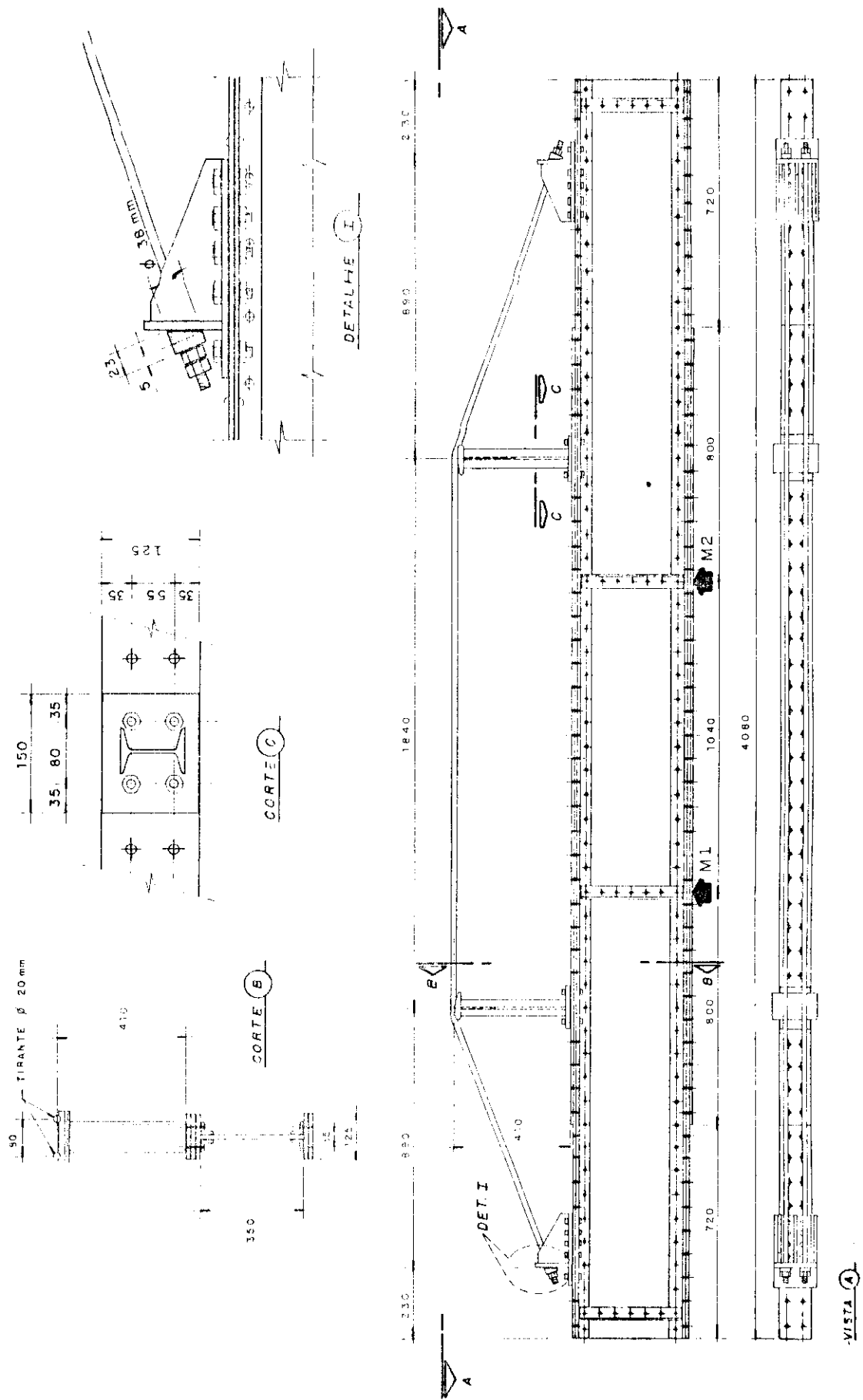


Figura VII.4 - Esquema Geral — Viga 4

Na Tabela VII.3 estão relacionados os tipos de aço utilizados nos modelos e as respectivas tensões de escoamento.

TABELA VII.3 - Características dos Aços

| ELEMENTO  | TIPO DE AÇO | TENSÃO DE ESCOAMENTO (kN/cm <sup>2</sup> ) |
|---|-------------|--|
| Rebite  | SAE-1008    | 17,2                                       |
| Tirantes<br>φ 16mm  | SAE-1060    | 45,0                                       |
| Tirantes<br>φ 20mm  | SAE-1040    | 29,0                                       |
| Chapas dos perfis   | ASTM-A36    | 25,0                                       |
| Nota: O módulo de elasticidade adotado<br>E = 20.500 kN/cm <sup>2</sup> |             |  |

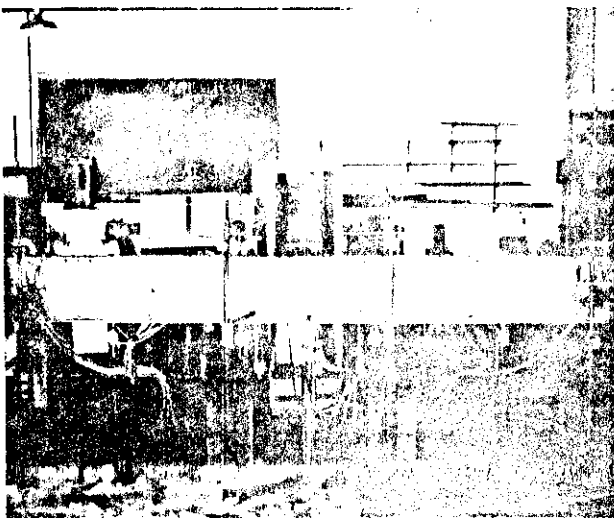
### VII.3- Metodologia dos Ensaios

A Figura VII.5 apresenta o esquema do pórtico de reação, posicionamento dos modelos, posicionamento dos relógios comparadores e demais elementos que foram utilizados para a realização dos ensaios.

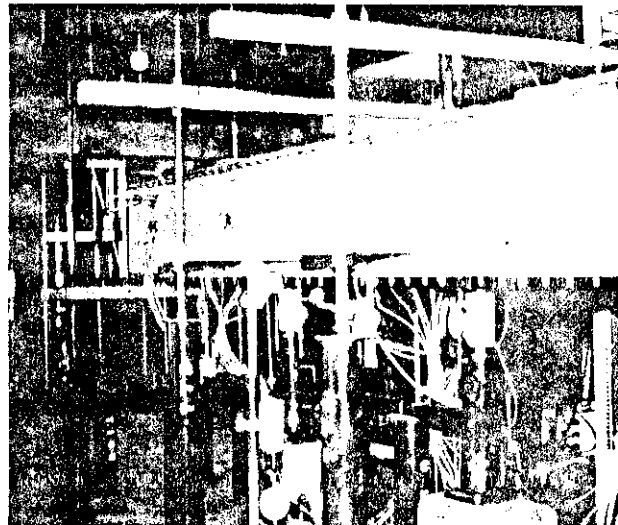
A Foto VII.1 ilustra o posicionamento para ensaio da Viga 3 e a Foto VII.2 apresenta, parcialmente, o pórtico de reação utilizado em todos os ensaios das vigas.

Foram efetuadas medidas de deformações em vários pontos dos modelos, utilizando extensômetros elétricos de resistência (uniaxiais nas mesas e rosetas na alma). As medidas de deslocamentos foram efetuadas com relógios comparadores em vários pontos dos modelos.

Foram utilizados dois macacos hidráulicos com capacidade nominal de 200kN acionados através de bomba hidráulica manual para aplicação do carregamento e acoplados a estes, células de cargas responsáveis pelas medidas da força aplicada.



*Foto VII.1: Vista geral do posicionamento da Viga 1 para o ensaio.*



*Foto VII.2: Vista parcial do pórtico de reação.*

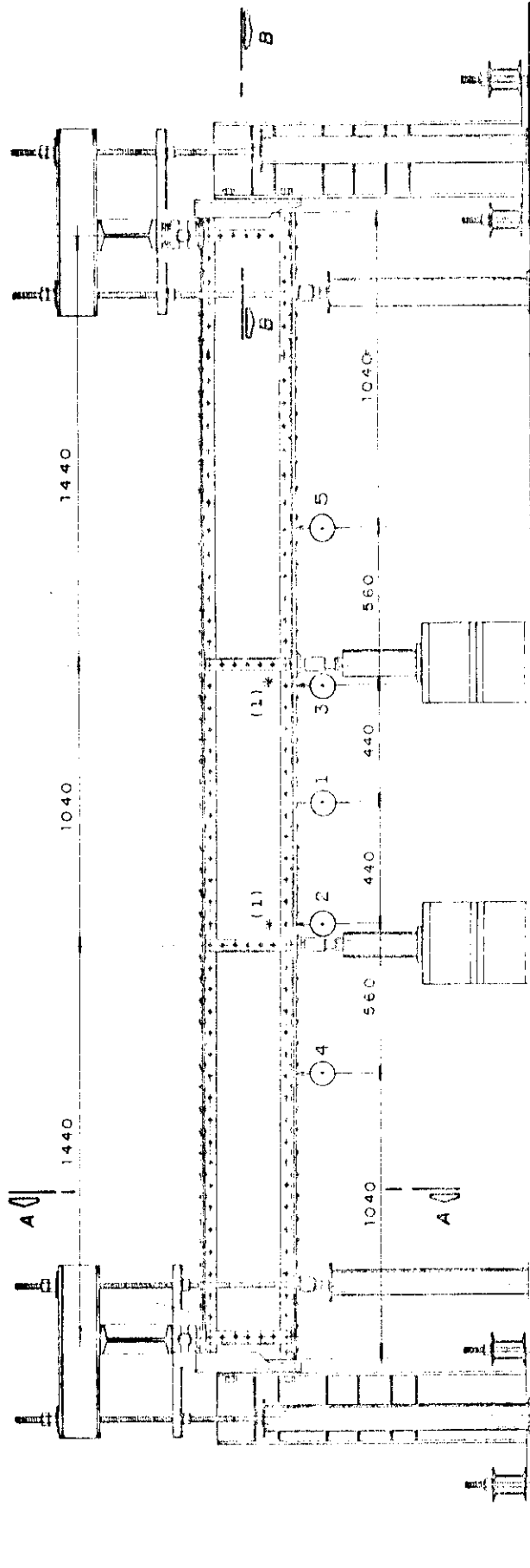
As leituras das deformações nos vários pontos instrumentados e a força aplicada foram efetuadas pelo sistema de aquisição de dados SYSTEM 4000-MEASUREMENTS GROUP.

Os modelos foram carregados em duas fases, sendo a primeira destinada ao escorvamento da estrutura com uma força aplicada de 30kN (em cada macaco hidráulico), em etapas de 10kN e o correspondente descarregamento.

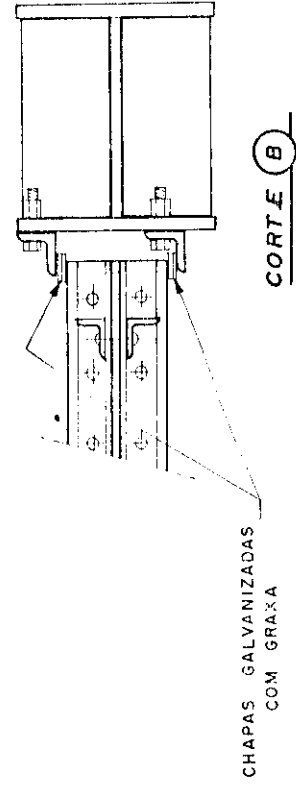
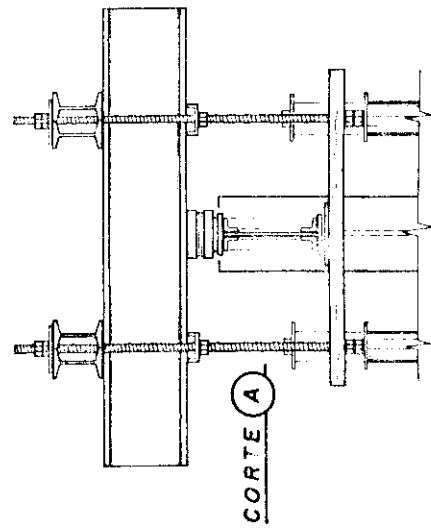
Após a fase de escorvamento o carregamento foi aplicado também em etapas de 10kN com as cargas máximas indicados nas tabelas apresentadas a seguir.

Após o carregamento de cada etapa e com a estabilização da força aplicada foram efetuadas as medições de deformação e deslocamento.





NOTA (1) :- PONTO CONTRAVENTADO LATERALMENTE



CHAPAS GALVANIZADAS  
COM GRAXA

Figura VII.5 - Esquema Geral do Pórtico de Reação

A Foto VII.3 ilustra parte do sistema de aquisição de dados e sua operação durante a realização de um ensaio, a Foto VII.4 ilustra a instrumentação com extensômetros elétricos de resistência nos tirantes da Viga 4.

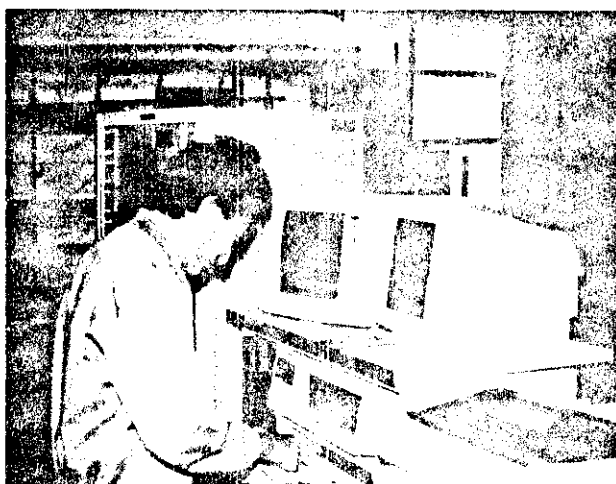


Foto VII.3: Sistema de aquisição de dados.

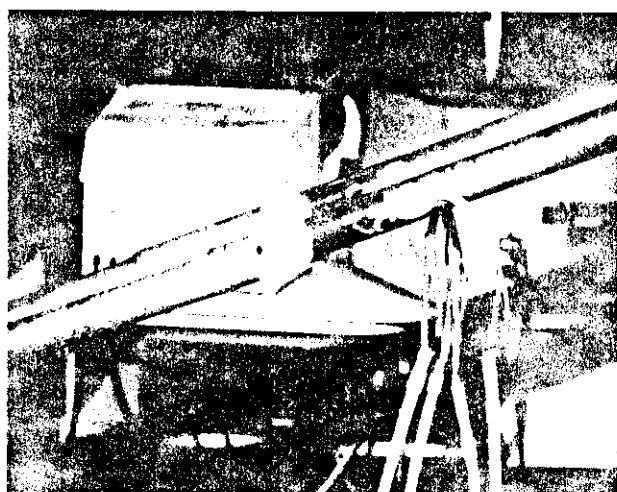


Foto VII.4: Detalhe da instrumentação dos tirantes.

O controle dos resultados obtidos durante o ensaio foi realizado pela comparação entre os deslocamentos teóricos e os medidos. Nos casos em que estes resultados apresentavam discrepâncias consideráveis, o ensaio era interrompido até ser possível determinar a anomalia responsável pela alteração dos resultados esperados.

Todas as vigas foram contraventadas lateralmente em dois pontos posicionados na seção transversal onde estavam colocados os macacos hidráulicos responsáveis pelo carregamento dos modelos.

Foram realizados mais de um ensaio para cada modelo a fim de identificar possíveis falhas quer no sistema de aplicação de carga, quer no sistema de medidas.

Para o modelo Viga 1 foram realizados três ensaios, com as cargas máximas por macaco hidráulico de 60kN, 70kN e 106kN. Esta viga foi a primeira a ser ensaiada e também a

única em que se caracterizou um estado limite último.

Para a Viga 2 foram realizados dois ensaios com as cargas máximas aplicadas de 100kN em cada ponto de aplicação.

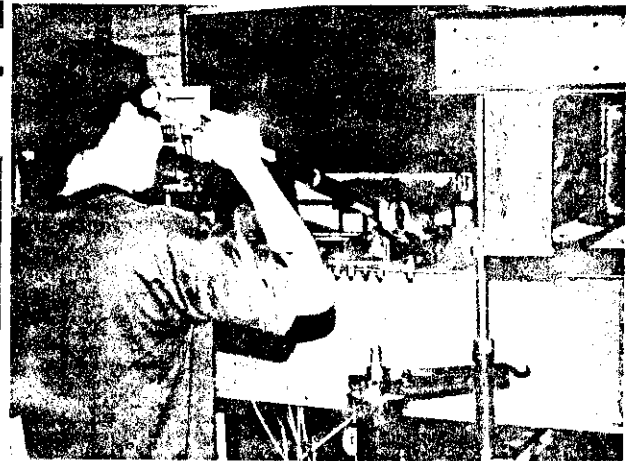
A Viga 3, reforçada com tirantes, foi ensaiada duas vezes. Neste modelo, uma das preocupações consistia na avaliação correta da "força de protensão" aplicada através das porcas na extremidade dos tirantes.

Foram realizadas várias "protensões" utilizando torquímetro e chaves fixas normais para obter uma "força de protensão" de aproximadamente 50kN, com o acompanhamento destes valores sendo feito pelos extensômetros elétricos dos tirantes. As Fotos VII.5 e VII.6 ilustram a operação de protensão.

As cargas máximas aplicadas no ensaio desta viga foram 50kN e 100 kN .



*Foto VII.5: Aplicação da "força de protensão" com chave fixa.*



*Foto VII.6: Aplicação da "força de protensão" utilizando um torquímetro.*

Para a Viga 4 foram realizados dois ensaios com cargas máximas de 100kN e 150kN em cada macaco hidráulico.

É interessante ressaltar os principais cuidados na realização de ensaios de vigas de aço fletidas:

-é necessária a contenção lateral da viga, limitando o

a distância entre pontos contidos lateralmente na região comprimida aos valores calculados teoricamente;

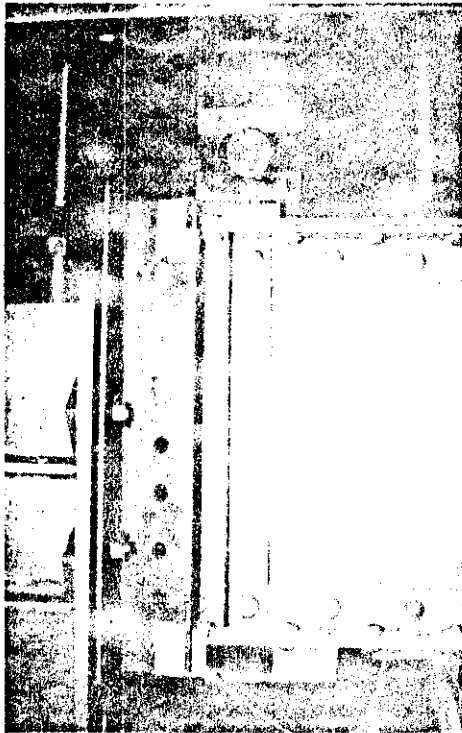
-na aplicação da força externa exige-se uma perfeita centralização da carga. As deformações e deslocamentos laterais provocados pela torção são consideráveis, devido à pequena rigidez à torção da viga de aço tipo I. Estes efeitos secundários podem ser significativos e alteram os resultados;

-os apoios devem realmente reproduzir as condições idealizadas. Apoios fixos devem ser livres a giros e apoios móveis devem ser livres a deslocamentos horizontais e giros. A experiência adquirida nos ensaios permite afirmar que os resultados são significativamente alterados quando o sistema de apoios não trabalha adequadamente;

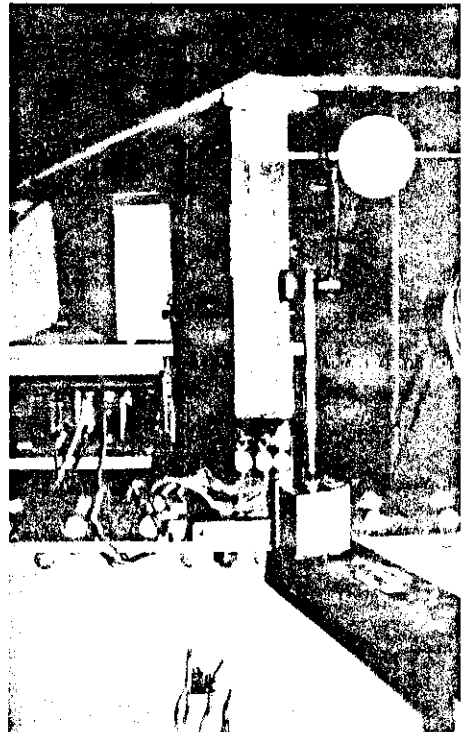
-a verticalidade das vigas ensaiadas, bem como dos macacos hidráulicos é também um fator importante a observar. As deformações parasitas geradas pela falta de verticalidade podem ser significativas. A título de exemplo, em um dos ensaios houve um pequeno descuido quanto à verticalidade do macaco e observaram-se deformações com até 30% de diferença em relação a outros ensaios.

A Foto VII.7 ilustra um detalhe do apoio fixo utilizado e da contenção lateral da viga. Esta contenção dada por duas cantoneiras é necessária para que seja efetivado no apoio o "vínculo de garfo". Ressalta-se que o contato cantoneira com as mesas da viga foi realizado através de chapas galvanizadas, engraxadas, para minimizar o atrito.

A Foto VII.8 ilustra o detalhe do montante utilizado na Viga 4.



*Foto VII.7: Detalhe do apoio utilizado nos ensaios.*



*Foto VII.8: Detalhe do montante da Viga 4.*

Os extensômetros elétricos de resistência foram posicionados com os seguintes parâmetros:

-medidas de deformação nas mesas: foram instrumentados basicamente a seção transversal central da viga (Seção 1 - Figura VII.6) onde o momento fletor teórico é constante e uma outra seção onde o momento fletor varia linearmente (seção 2 - Figura VII.6), ambas com três extensômetros elétricos em cada mesa e dois extensômetros posicionados na cantoneira.

Para confronto dos resultados foi também instrumentada uma outra seção transversal da viga (seção 3 - Figura VII.6), disposta simetricamente em relação à seção 2, com dois extensômetros elétricos de resistência por mesa.

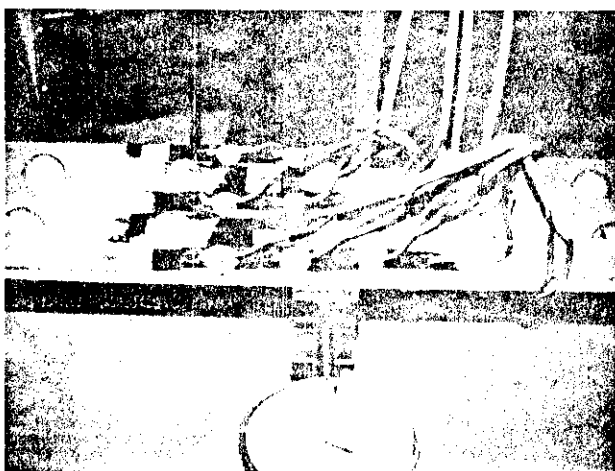
Nos modelos com variação de seção transversal (Viga 2 e 4) foram instrumentadas mais duas seções próximas à variação da espessura das mesas.

-As rosetas, em número de cinco, foram posicionadas em seções próximas ao apoio (avaliação das direções principais nessa região) e sobre a seção de número 2;

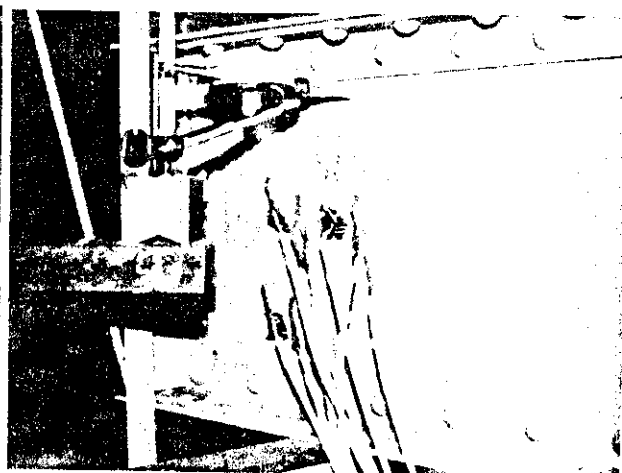
-Para avaliar a variação das deformações entre seções próximas foram instrumentadas mais três seções vizinhas a de número 1, somente na mesa tracionada no modelo da Viga 4.

A Figura VII.9 ilustra estas seções identificadas pelos números 6, 7 e 8.

A título de ilustração, as Fotos VII.9 e VII.10 apresentam exemplos da instrumentação na mesa da Viga 4 e o posicionamento das rosetas próximas ao apoio.



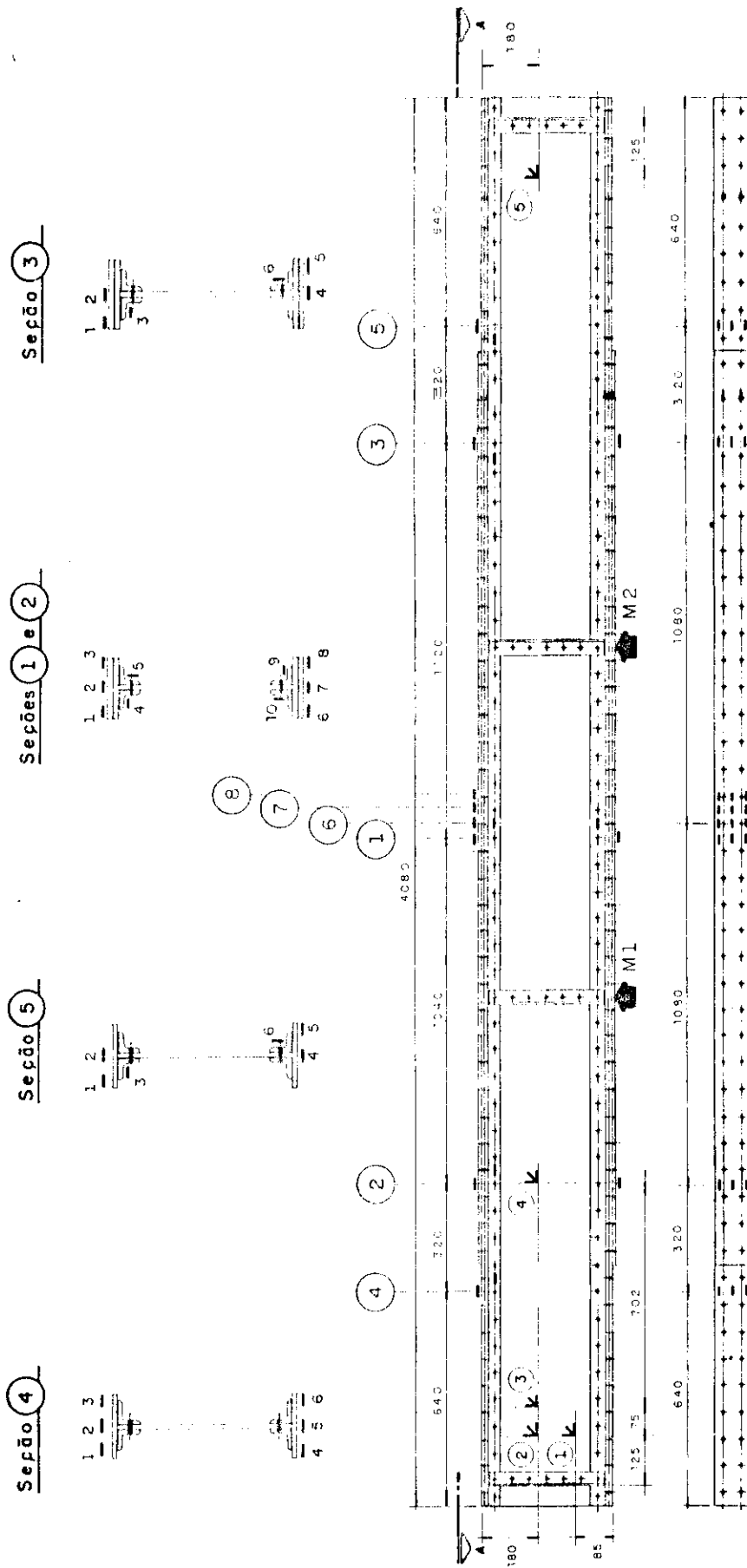
*Foto VII.9: Extensômetros elétricos de resistência uniaxiais posicionados na mesa da seção central da Viga 4.*



*Foto VII.10: Instrumentação com rosetas na região do apoio da Viga 4.*

O posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência encontra-se esquematizado nas Figuras VII.6 a 9.





NOTA: AS SEÇÕES (6), (7) E (8) EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA SOMENTE NA MESA TRACIONADA E NUMERADOS DE MANEIRA IGUAL A SEÇÃO (1)

Figura VII.7 - Extensômetros Elétricos de Resistência — Viga 2



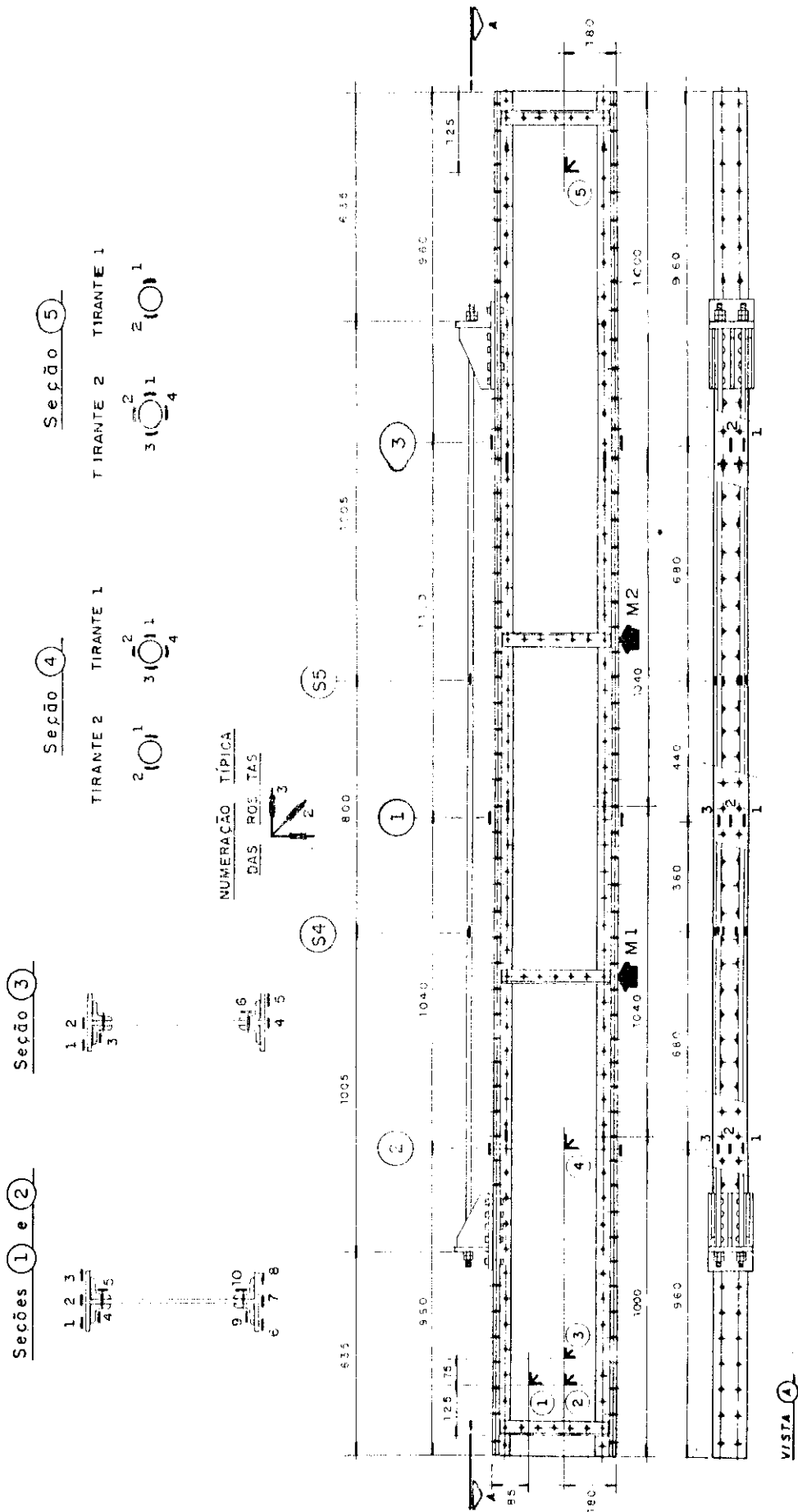


Figura VII.8 - Extensômetros Elétricos de Resistência — Viga 3



#### VII.4- Análise dos Resultados

Os resultados destes ensaios serão analisados comparando-os aos obtidos em modelos teóricos baseados na teoria da elasticidade. Os resultados completos dos ensaios estão apresentados no Anexo I deste trabalho.

Salienta-se que o principal objetivo destes ensaios foi a obtenção de resultados experimentais do comportamento de vigas rebitadas utilizando extensômetros elétricos de resistência para as medidas de deformação e uma análise do desempenho de três tipos de reforços em vigas rebitadas destinadas a aumentar a capacidade resistente.

É interessante ressaltar, neste preâmbulo, que mesmo com todos os cuidados na realização de ensaios de modelos, muitas variáveis influenciam os resultados. Nem sempre é possível uma adequação perfeita entre o modelo ensaiado e o teórico. A análise dos resultados deve ser feita considerando estes aspectos.

Em geral, os resultados de ensaios de estruturas possibilitam obter informações que extrapolam os objetivos iniciais. Informações sobre o comportamento dos rebites que compõem a viga, o desempenho global dos modelos, a variação das deformações entre seções, com ou sem rebites, são exemplos destes dos resultados que complementam e vão além dos objetivos inicialmente propostos.

Os frutos deste trabalho não estão limitados somente aos resultados obtidos nos ensaios. A possibilidade de acompanhar a realização destes e solucionar os percalços próprios à experimentação constituem uma excelente oportunidade de aprendizagem do comportamento estrutural.

A ocorrência e visualização de efeitos secundários, como por exemplo a aplicação de carga com pequena excentricidade ou a falta de verticalidade do macaco hidráulico, não permitem obter resultados quantitativos, porém contribuem muito para o conhecimento destes efeitos nas estruturas.

#### VII.4.1 - Cálculo Teórico dos Modelos - Comentários Gerais

Apresentam-se, a seguir, as principais considerações sobre o cálculo teórico utilizado para a comparação com os resultados de ensaio.

É interessante ressaltar que os modelos teóricos utilizados foram os mais simples possíveis considerando que os resultados obtidos foram bastante satisfatórios como será visto a seguir.

Como pode ser observado nas Figuras VII.1 e VII.4 os modelos utilizados são estruturas simples do ponto de vista de cálculo estático. As hipóteses e considerações utilizadas estão abaixo relacionados:

##### a) VIGA 1:

- Viga simplesmente apoiada;
- Cálculo estático considerando as características geométricas com e sem enfraquecimento devido aos furos;
- Os deslocamentos foram calculados considerando a inércia líquida;
- Foram adotados os valores médios das cargas aplicadas para os cálculos teóricos.

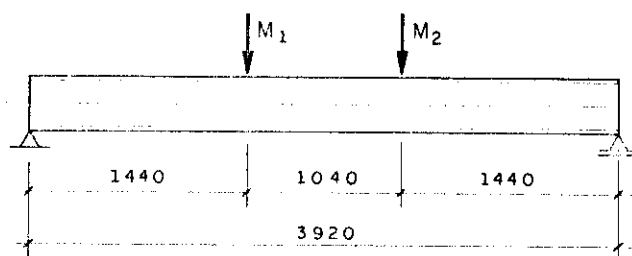


Figura VII.10 - Esquema Estático Viga 1

##### b) VIGA 2:

- Viga simplesmente apoiada;
- Cálculo estático considerando as características geométricas com enfraquecimento devido à furação;
- Consideração da variação da seção para o cálculo das características geométricas devido a chapa de reforço nas mesas;

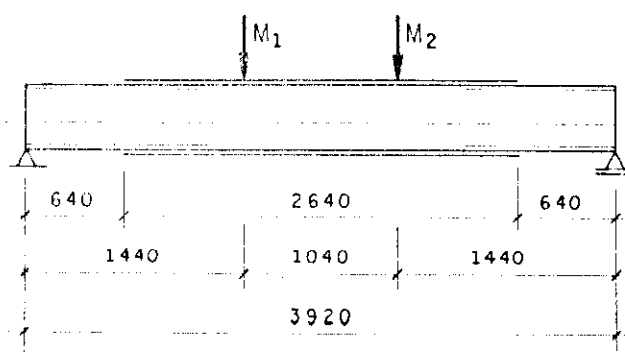


Figura VII.11 - Esquema Estático Viga 2

c) VIGA 3:

- Viga simplesmente apoiada com tirante reto excêntrico;
- Modelo teórico calculado segundo as recomendações apresentadas no Capítulo V considerando o enfraquecimento da seção transversal devido aos furos.

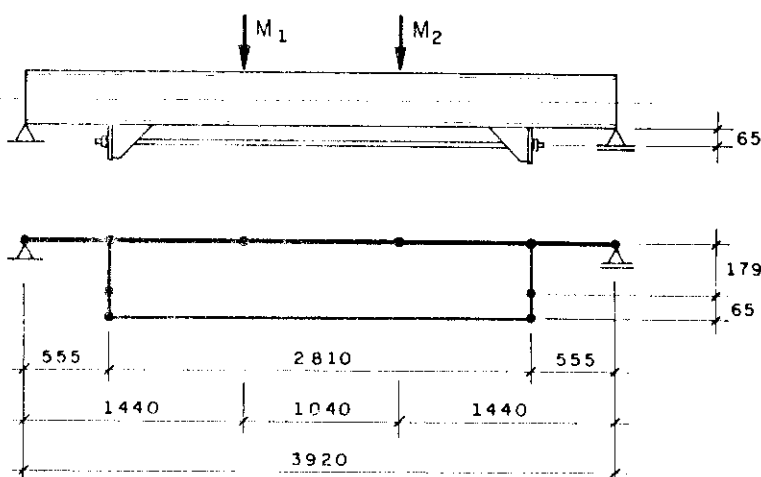


Figura VII.12 - Esquema Estático Viga 3

d) VIGA 4

- Viga simplesmente apoiada, tirante poligonal (viga armada);
- Cálculo estático considerando as características geométricas com enfraquecimento devido à furação;
- Modelo teórico calculado utilizando programa de computador desenvolvido no Departamento de Estruturas.
- Os elementos rígidos, destacados na figura abaixo, reproduzem a meia altura da viga, com rigidez e área

equivalente a viga principal;

-Os tirantes foram rotulados nas extremidades.

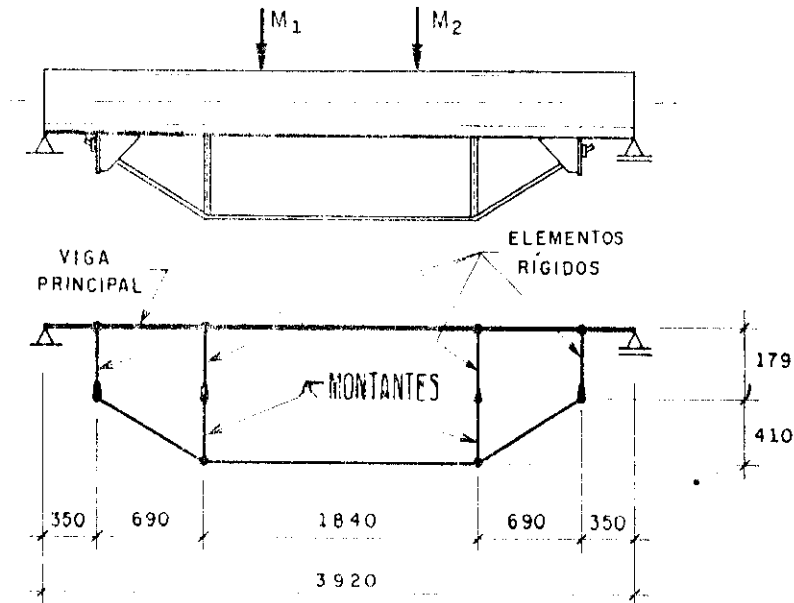


Figura VII.13 - Esquema Estático Viga 4

Os resultados teóricos estão apresentados conjuntamente com os resultados dos ensaios no item seguinte deste capítulo.

A experimentação de estruturas conduz a uma grande quantidade de resultados devido ao número de pontos instrumentados. A análise dos resultados obtidos nos ensaios centra-se nos aspectos particulares para cada uma das vigas.

Para a Viga 1 enfatiza-se os resultados dos ensaios comparando-os aos valores teóricos calculados para a seção líquida, seção bruta e somente considerando o enfraquecimento devido aos furos na mesa tracionada. Apresentam-se também os resultados das tensões medidas e calculadas para todas as rosetas.

Para a Viga 2 apresentam-se os resultados dos deslocamentos nos pontos de 1 a 5, os valores obtidos das tensões nos pontos instrumentados e, em particular, na seção da viga onde há a variação de seção.

Os resultados apresentados da Viga 3 enfatizam principalmente o comportamento dos tirantes como reforço. Salienta-se que os deslocamentos foram medidos inicialmente

na fase de protensão da viga. Após a aplicação da força de protensão pré-determinada os deslocamentos foram medidos utilizando como referência a posição já deslocada.

Para a Viga 4 o resumo dos resultados enfatiza a análise do comportamento dos tirantes da viga armada e a variação das tensões obtidas nas medições efetuadas nas seções com e sem rebites na mesa tracionada.

Os resultados teóricos dos deslocamentos foram calculados utilizando-se as características geométricas líquidas e estão apresentadas sob forma de tabelas e gráficos.

É interessante destacar que um dos aspectos polêmicos no dimensionamento de vigas rebitadas consiste exatamente na escolha das características geométricas a adotar: líquida ou bruta. Apresentam-se resultados comparativos dos deslocamentos teóricos com estas duas considerações para a Viga 1.

Os resultados dos deslocamentos permitem avaliar o comportamento global dos modelos e a correlação destes com os resultados teóricos.

Os resultados da estimativa das tensões foram obtidos a partir das medições de deformações, considerando o comportamento elástico e a proporcionalidade da tensão-deformação e estão apresentados sob forma de tabelas e gráficos. A análise destes resultados permite uma avaliação pontual das tensões e assim deve ser considerada.

As tensões teóricas nas mesas foram calculadas admitindo estado plano de deformações, com base na teoria da resistência de materiais em regime elástico.

As expressões abaixo apresentadas resumem a rotina de cálculo utilizada:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (1)$$

onde M momento fletor teórico da seção analisada

W módulo de resistência na seção analisada de acordo com as considerações já apresentadas.

As tensões de cisalhamento na alma foram calculadas a partir da força cortante teórica, admitindo-se estado plano de tensões. As expressão abaixo indica o cálculo das tensões de cisalhamento :

$$\tau_{\text{teórico}} = \frac{V M_s}{t I} \quad (2)$$

onde

V: força cortante teórica calculada no ponto analisado

$M_s$ : momento estático

t : espessura do elemento no ponto calculado .

I : momento de inércia.

Os valores de ensaio foram obtidos a partir das deformações dos três extensômetros elétricos que compõem a roseta.

Os resultados dos ensaios, obtidos através do sistema de aquisição de dados, já apresentam as tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  e o ângulo ( $\alpha$ ) desta direção com orientação positiva tendo como referência o sentido do extensômetro elétrico posicionado na direção do eixo longitudinal da viga para o segundo extensômetro (  $45^\circ$  ).

É possível obter a tensão de cisalhamento por:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \text{ sen } 2\alpha \quad (3)$$

Foram também calculadas as tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  (tensões horizontal e vertical) a partir das tensões principais por:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha \quad (4)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha \quad (5)$$

Estas tensões foram calculadas como mais uma informação sobre o comportamento do modelo.



#### VII.4.2 - Resultados dos Ensaios - Deslocamentos:

As Tabelas e Gráficos, apresentados a seguir, resumem os principais resultados dos deslocamentos. Estes resultados são referentes a um ensaio por viga.

Os deslocamentos teóricos foram calculados baseados nas hipóteses já relacionadas anteriormente, salientando-se que os resultados teóricos foram obtidos considerando a inércia líquida.

A força média aplicada, constante nas tabelas, refere-se aos valores da força média dos dois macacos hidráulicos em cada etapa de carregamento e os valores medidos dos deslocamentos correspondem ao último ensaio de cada viga.

##### VII.4.2.1-Resultados dos Deslocamentos na Viga 1

Na Tabela VII.4 e no Gráfico VII.1 estão apresentados os resultados dos deslocamentos da Viga 1.

Pode-se observar na tabela e no gráfico que os deslocamentos são lineares até a carga aplicada de 80kN e os valores calculados teoricamente são próximos aos medidos no ensaio.

Nas etapas subsequentes aos 80kN ocorreu o início da perda de estabilidade lateral e também deslocamentos laterais decorrentes da excentricidade na aplicação da força externa. Estes efeitos foram responsáveis pela alteração no comportamento força aplicada-deslocamentos.

A título de comparação foi calculada a carga crítica teórica referente a perda de estabilidade lateral deste modelo e obteve-se o valor de 87 kN. Salienta-se que este valor foi obtido baseado nos preceitos da norma brasileira "NB-14 Cálculo e execução de estruturas de aço" que, embora já substituída, previa este cálculo para vigas rebitadas o que não ocorre com a Normalização vigente.

TABELA VII.4 - Deslocamentos Viga 1 - Ensaio 3

| FORÇA<br>MÉDIA<br>APLICADA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS (mm) |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                    | PONTO 1            |         | PONTO 2 | PONTO 3 |         | PONTO 4 | PONTO 5 |         |
|                                    | MEDIDO             | TEÓRICO | MEDIDO  | MEDIDO  | TEÓRICO | MEDIDO  | MEDIDO  | TEÓRICO |
| 0.000                              | 0.000              | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   |
| 20.060                             | 2.950              | 2.785   | 2.706   | 2.733   | 2.547   | 1.742   | 1.688   | 1.791   |
| 40.030                             | 5.535              | 5.563   | 5.197   | 5.152   | 5.083   | 3.123   | 3.127   | 3.573   |
| 59.925                             | 8.090              | 8.327   | 7.653   | 7.539   | 7.619   | 4.494   | 4.406   | 5.350   |
| 79.995                             | 10.770             | 11.119  | 10.221  | 10.074  | 10.159  | 5.901   | 5.739   | 7.141   |
| 99.890                             | 15.225             | 13.883  | 14.369  | 14.286  | 12.685  | 8.065   | 7.975   | 8.917   |
| 106.450                            | 17.815             | 14.786  | 16.819  | 16.626  | 13.518  | 9.245   | 9.165   | 9.503   |
| 105.400                            | 18.345             | 14.640  | 17.327  | 17.148  | 13.385  | 9.469   | 9.421   | 9.409   |

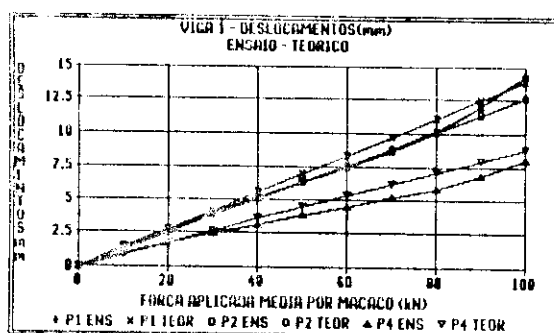


GRÁFICO VII.1 - Deslocamentos Viga 1 - Ensaio 3

#### VII.4.2.2- Resultados dos deslocamentos Viga 2

Na Tabela VII.5 e no Gráfico VII.2 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de número 2 para a Viga 2.

Os resultados dos deslocamentos da Viga 2 indicam um comportamento linear dos deslocamentos, com os resultados experimentais e teóricos próximos.

Um item a ser destacado destes resultados é o fato de que nas etapas iniciais do carregamento deste modelo os resultados experimentais têm valores maiores que os resultados dos deslocamentos calculados teoricamente, fato explicado pela acomodação do pórtico de reação e do modelo, pois constatou-se que o escorvamento da estrutura de reação não foi devidamente realizado.

TABELA VII.5 - Deslocamentos Viga 2 - Ensaio 2

| FORÇA<br>MÉDIA<br>APLICADA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS (mm) |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                    | PONTO 1            |         | PONTO 2 | PONTO 3 |         | PONTO 4 | PONTO 5 |         |
|                                    | MEDIDO             | TEÓRICO | MEDIDO  | MEDIDO  | TEÓRICO | MEDIDO  | MEDIDO  | TEÓRICO |
| 0.000                              | 0.000              | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   |
| 20.015                             | 2.300              | 2.043   | 2.212   | 2.152   | 1.870   | 1.550   | 1.320   | 1.324   |
| 39.970                             | 4.060              | 4.081   | 3.951   | 3.798   | 3.736   | 2.564   | 2.136   | 2.644   |
| 59.985                             | 6.000              | 6.129   | 5.801   | 5.648   | 5.611   | 3.624   | 3.176   | 3.971   |
| 79.995                             | 7.985              | 8.172   | 7.692   | 7.528   | 7.481   | 4.725   | 4.215   | 5.294   |
| 99.905                             | 10.080             | 10.210  | 9.706   | 9.505   | 9.347   | 5.935   | 5.335   | 6.614   |

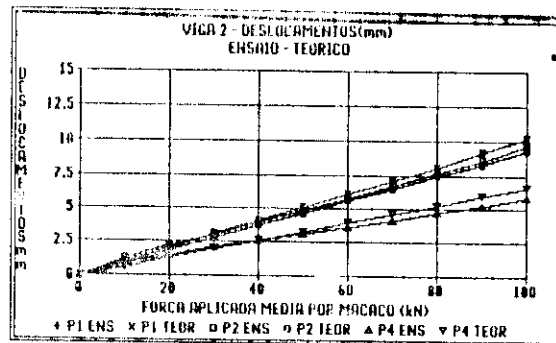


GRÁFICO VII.2 - Deslocamentos Viga 2 - Ensaio 2

#### VII.4.2.3- Resultados dos Deslocamentos da Viga 3

Os resultados dos deslocamentos obtidos no ensaio da Viga 3 caracterizaram-se pelas particularidades decorrentes da necessidade de aplicação da força de protensão. Pode-se dizer que este ensaio foi dividido em duas partes sendo a primeira a aplicação da força externa e a segunda a aplicação do carregamento.

Para a análise dos resultados apresentados na Tabela VII.6 e no Gráfico VII.3 são necessários esclarecimentos sobre os procedimentos da aplicação e medição da protensão.

No primeiro ensaio da Viga 3 foram efetuadas várias aplicações da força de protensão através do aperto das porcas dos tirantes, com medições de deformações nos tirantes e a avaliação da força resultante a partir das deformações medidas.

No ensaio de número 2 aplicou-se a força prevista de aproximadamente 50kN. Na fase de aplicação da protensão a

viga estava vinculada no pórtico de reação e nos macacos hidráulicos. Este esquema de carregamento fez com que os deslocamentos medidos na fase de protensão não fossem passíveis de comparação com os valores obtidos a partir do modelo teórico considerado, pois com o apoio dos macacos hidráulicos, altera-se o esquema estático.

Com as explicações acima apresentadas fica claro que os resultados dos deslocamentos apresentados abaixo referem-se a viga simplesmente apoiada já com força de protensão aplicada.

TABELA VII.6 - Deslocamentos Viga 3.- Ensaio 2

| FORÇA<br>MÉDIA<br>APLICADA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS (mm) |         |         |        |         |         |        |         |        |         |         |
|------------------------------------|--------------------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|
|                                    | PONTO 1            |         | PONTO 2 |        |         | PONTO 3 |        | PONTO 4 |        | PONTO 5 |         |
|                                    | MEDIDO             | TEÓRICO | MEDIDO  | MEDIDO | TEÓRICO | MEDIDO  | MEDIDO | TEÓRICO | MEDIDO | MEDIDO  | TEÓRICO |
| 2.100                              | 0.000              | 0.000   | 0.000   | 0.000  | 0.000   | 0.000   | 0.000  | 0.000   | 0.000  | 0.000   | 0.000   |
| 19.955                             | 2.250              | 2.275   | 2.160   | 2.070  | 2.075   | 1.330   | 1.280  | 1.448   |        |         |         |
| 39.970                             | 4.480              | 4.556   | 4.340   | 4.170  | 4.156   | 2.540   | 2.450  | 2.901   |        |         |         |
| 59.925                             | 6.770              | 6.831   | 6.560   | 6.320  | 6.231   | 3.770   | 3.650  | 4.349   |        |         |         |
| 79.940                             | 9.370              | 9.113   | 9.100   | 8.770  | 8.312   | 5.150   | 4.980  | 5.807   |        |         |         |
| 99.895                             | 12.340             | 11.388  | 11.990  | 11.610 | 10.387  | 6.690   | 6.580  | 7.251   |        |         |         |

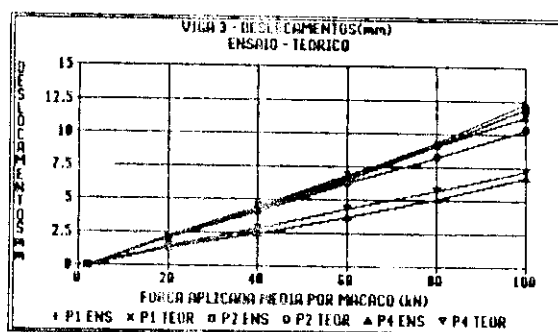


GRÁFICO VII.3 - Deslocamentos Viga 3 - Ensaio 2

A observação dos resultados dos deslocamentos permite concluir que o comportamento do modelo Viga 3 foi linear em todas as etapas de carga.

A adequação do modelo teórico é bastante satisfatória

com os resultados dos ensaios o que pode ser observado pelo gráfico.

Destaca-se, também, a já esperada eficiência da utilização dos tirantes na diminuição dos deslocamentos. A comparação com os resultados do modelo Viga 1 indicam uma redução de aproximadamente 17% no deslocamento no meio da viga para a carga aplicada de 60kN.

#### VII.4.2.4- Resultados dos Deslocamentos Viga 4

Na Tabela VII.7 e no Gráfico VII.4 estão apresentados os resultados dos deslocamentos da Viga 4 ensaio 2.

TABELA VII.7 - Deslocamentos Viga 4 - Ensaio 2

| FORÇA<br>MÉDIA<br>APLICADA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS (mm) |         |         |        |         |         |        |         |         |        |         |        |         |  |
|------------------------------------|--------------------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|--|
|                                    | PONTO 1            |         | PONTO 2 |        |         | PONTO 3 |        |         | PONTO 4 |        | PONTO 5 |        | PONTO 6 |  |
|                                    | MEDIDO             | TEORICO | MEDIDO  | MEDIDO | TEORICO | MEDIDO  | MEDIDO | TEORICO | MEDIDO  | MEDIDO | TEORICO | MEDIDO | TEORICO |  |
| 0.000                              | 0.000              | 0.000   | 0.000   | 0.000  | 0.000   | 0.000   | 0.000  | 0.000   | 0.000   | 0.000  | 0.000   | 0.000  | 0.000   |  |
| 20.015                             | 1.410              | .995    | 1.308   | 1.333  | .902    | .741    | .849   | .617    | .200    | .204   |         |        |         |  |
| 40.030                             | 2.665              | 1.988   | 2.486   | 2.507  | 1.802   | 1.441   | 1.549  | 1.233   | .420    | .408   |         |        |         |  |
| 59.985                             | 3.940              | 2.984   | 3.725   | 3.727  | 2.703   | 2.150   | 2.260  | 1.851   | .660    | .612   |         |        |         |  |
| 79.940                             | 5.160              | 3.982   | 4.870   | 4.873  | 3.608   | 2.763   | 2.867  | 2.470   | .890    | .816   |         |        |         |  |
| 99.890                             | 6.410              | 4.969   | 6.076   | 6.038  | 4.503   | 3.508   | 3.452  | 3.082   | 1.210   | 1.019  |         |        |         |  |
| 119.960                            | 7.890              | 5.967   | 7.432   | 7.491  | 5.407   | 4.190   | 4.310  | 3.701   | 1.540   | 1.224  |         |        |         |  |
| 139.860                            | 9.495              | 6.960   | 8.944   | 9.059  | 6.307   | 4.955   | 5.215  | 4.317   | 1.850   | 1.427  |         |        |         |  |
| 149.785                            | 10.400             | 7.445   | 9.842   | 9.951  | 6.746   | 5.430   | 5.770  | 4.618   | 1.930   | 1.528  |         |        |         |  |

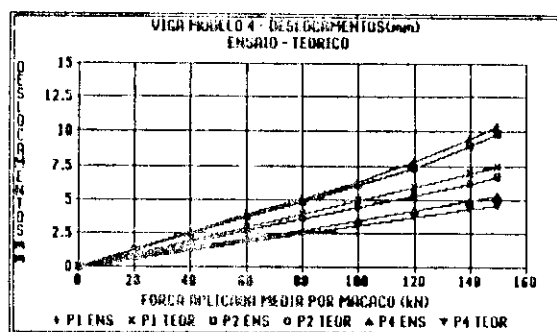


GRÁFICO VII.4 - Deslocamentos Viga 4 - Ensaio 2

Os resultados dos deslocamentos deste modelo permitem

concluir que há linearidade no comportamento carga aplicada-deslocamento.

Os deslocamentos medidos são sistematicamente superiores aos valores calculados teoricamente. Este aspecto dos resultados tem basicamente duas explicações sendo que o primeiro deles refere-se às condições em este modelo foi fabricado.

A viga armada foi fabricada com os tirantes contínuos sobre o montante o que exigiu que a geometria destes fosse obtida com o aquecimento prévio das barras redondas e sua conformação adaptada à chapa de apoio do montante.

Este processo de fabricação não possibilitou um contato perfeito tirante-chapa, gerando folgas e provocando deslocamentos iniciais antes que o tirante fosse solicitado.

Paralelamente a este aspecto é conveniente ressaltar que observou-se o início do escoamento das porcas de fixação dos tirantes, constituindo-se num fator adicional a ser considerado no resultado final da deslocabilidade do modelo.

O outro aspecto refere-se a adequação do modelo estático utilizado para o cálculo dos deslocamentos. Neste modelo a ligação montante tirante é caracterizada como um nó o que não reproduz fielmente o modelo ensaiado.

Salienta-se que a ligação montante tirante foi fabricada de maneira contínua pois pretendia-se obter dados sobre o comportamento deste modelo e compará-los àqueles observados na viga armada da ponte da RFFSA, cujos resultados da prova de carga estão relatados no Capítulo VI deste trabalho.

#### VII.4.3- Resultados dos Ensaios - Tensões

A avaliação dos resultados das tensões foi obtida a partir das medições das deformações em cada extensômetro elétrico de resistência, sendo então estimadas considerando o comportamento elástico linear ( $\sigma = E\epsilon$ ).

As vigas foram instrumentadas com três extensômetros

elétricos uniaxiais em cada mesa e dois , na cantoneira de ligação mesa alma. A análise pontual de cada resultado é a primeira etapa a ser observada.

Os resultados das deformações foram obtidos pelo sistema de aquisição de dados e a Tabela VII.8 reproduz um exemplo destes resultados.

TABELA VII.8- Exemplo dos Resultados das Deformações

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

---

ENSAIO DE VIGAS DE AÇO REBITADAS  
 VIGA 1/1      ENSAIO N.º 3      DATA: 15/02/91  
 DEFORMAÇÕES DOS EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS UNIAXIAIS  
 CEEFD

---

| P<br>(MPa) | 1<br>(µε) | 2<br>(µε) | 3<br>(µε) | 4<br>(µε) | 5<br>(µε) | 6<br>(µε) | 7<br>(µε) | 8<br>(µε) | 9<br>(µε) | 10<br>(µε) | 11<br>(µε) | 12<br>(µε) |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| 0.00       | 0.00      | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0        | 0.0        | 0.0        |
| 10.00      | 5.87      | 1110.     | 1122.     | 1130.     | 1137.     | 117.      | -101.     | -101.     | -142.     | -71.       | -103.      |            |
| 20.00      | 12.51     | 2213.     | 2242.     | 2272.     | 2299.     | 4154.     | 220.      | -241.     | -279.     | -187.      | -240.      |            |
| 30.00      | 19.13     | 3313.     | 3373.     | 3435.     | 3444.     | 6750.     | 771.      | -363.     | -414.     | -277.      | -354.      |            |
| 0.00       | 0.00      | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0        | 0.0        |            |
| 40.00      | 25.76     | 4409.     | 4501.     | 4581.     | 4641.     | 975.      | 130.      | -417.     | -475.     | -303.      | -427.      |            |
| 50.00      | 32.41     | 5509.     | 5620.     | 5711.     | 5770.     | 1495.     | 213.      | -510.     | -579.     | -381.      | -539.      |            |
| 60.00      | 39.03     | 6614.     | 6741.     | 6836.     | 6916.     | 2292.     | 304.      | -607.     | -687.     | -445.      | -637.      |            |
| 70.00      | 45.65     | 7721.     | 7871.     | 7980.     | 8049.     | 3381.     | 389.      | -709.     | -805.     | -544.      | -765.      |            |
| 80.00      | 52.27     | 8830.     | 9000.     | 9078.     | 9124.     | 4477.     | 486.      | -814.     | -924.     | -654.      | -892.      |            |
| 90.00      | 58.89     | 9941.     | 10130.    | 10232.    | 10299.    | 5565.     | 573.      | -927.     | -1055.    | -806.      | -1088.     |            |
| 100.00     | 65.51     | 11070.    | 11280.    | 11395.    | 11475.    | 6655.     | 657.      | -1040.    | -1199.    | -950.      | -1305.     |            |
| 110.00     | 72.13     | 12210.    | 12440.    | 12563.    | 12617.    | 7740.     | 740.      | -1160.    | -1341.    | -1045.     | -1431.     |            |
| 120.00     | 78.75     | 13370.    | 13620.    | 13757.    | 13784.    | 8810.     | 810.      | -1280.    | -1490.    | -1210.     | -1620.     |            |
| 130.00     | 85.37     | 14550.    | 14820.    | 14978.    | 14997.    | 9870.     | 870.      | -1400.    | -1630.    | -1370.     | -1800.     |            |
| 140.00     | 92.00     | 15750.    | 16040.    | 16197.    | 16235.    | 10927.    | 951.      | -1520.    | -1780.    | -1530.     | -1980.     |            |
| 150.00     | 98.62     | 16970.    | 17280.    | 17456.    | 17476.    | 11970.    | 1031.     | -1650.    | -1920.    | -1690.     | -2160.     |            |
| 0.00       | 0.00      | 0.00.     | 0.00.     | 0.00.     | -10.      | 0.00.     | -15.      | -5.       | 16.       | -17.       | -7.        |            |

---

O Gráfico VII.5 ilustra os resultados gerados pelo sistema de aquisição de dados para as mesas tracionadas e comprimidas da Viga 1 , ensaio 3.

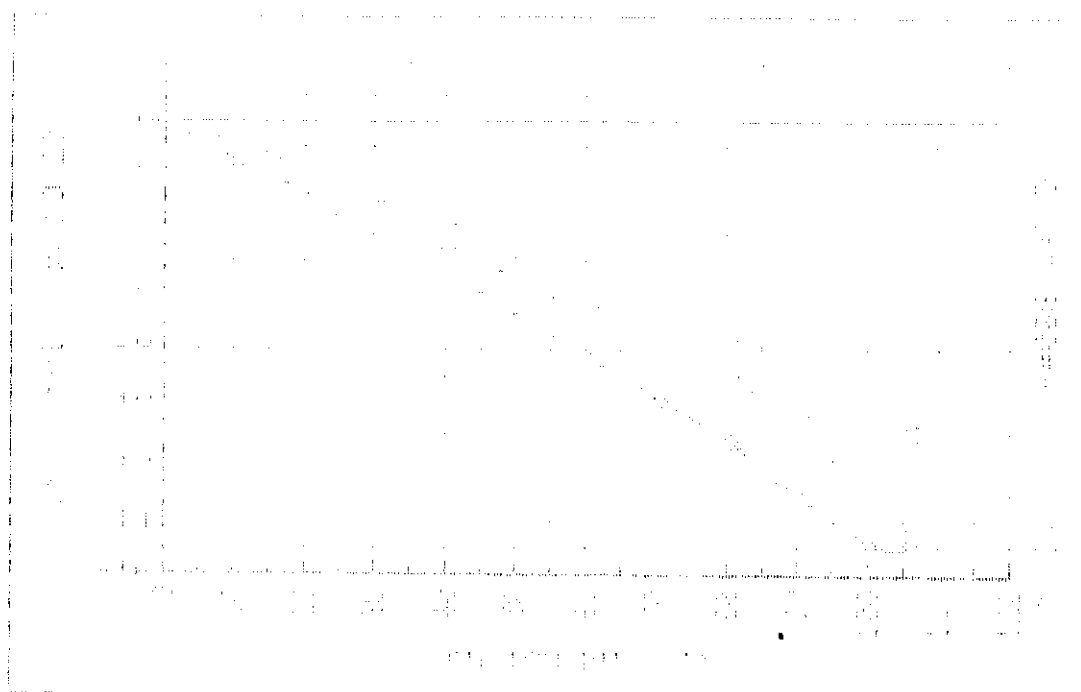


GRÁFICO VII.5- Exemplo do Gráfico das Deformações Obtido como Resultado do Sistema de Aquisição de Dados

As colunas  $F_1$  e  $F_2$  reproduzem os valores medidos da força aplicada através das células de carga. Observa-se que os valores obtidos em cada macaco são próximos, permitindo adotar os valores médios como a força externa utilizada nos cálculos teóricos.

As outras colunas são numeradas sequencialmente e correspondem ao número do extensômetro associado ao ponto medido na seção transversal identificada no cabeçalho.

Os pontos 4, 5 e 9, 10 correspondem à instrumentação da cantoneira tracionada e comprimida, respectivamente.

Os resultados ilustrados na Tabela VII.8 permitem verificar que os valores das deformações apresentam variações para cada um dos pontos instrumentados na chapa da mesa do perfil. Este fato enfatiza mais uma vez o aspecto de que estas medições são pontuais e assim devem ser analisadas.

A depuração dos resultados envolvem uma análise ponto a ponto das leituras e do comportamento força aplicada-deformação, de tal forma a evitar que os resultados médios obtidos a partir da leitura dos extensômetros não



considerem possíveis defeitos decorrentes da instalação ou leitura.

Após esta análise foi realizado o cálculo dos valores médios das deformações em cada mesa para a comparação com os resultados obtidos que estão apresentados logo a seguir.

Um exemplo dos resultados das deformações dos extensômetros que compõem as rosetas, gerados pelo sistema de aquisição de dados, está apresentado na Tabela VII.9 e no Gráfico VII.6.

Tabela VII.9- Exemplo dos Resultados das Deformações-Rosetas

| UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO                        |              |              |              |                |              |              |                    |                    |                  |
|--|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|------------------|
| ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS               |              |              |              |                |              |              |                    |                    |                  |
| DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS                       |              |              |              |                |              |              |                    |                    |                  |
| ENSAIO DE VIGAS DE AÇO REBITADAS                 |              |              |              |                |              |              |                    |                    |                  |
| VIGA N.º 1                                       |              | ENSAIO N.º 3 |              | DATA: 15/02/71 |              |              |                    |                    |                  |
| OCUPAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DAS ROSETAS |              |              |              |                |              |              |                    |                    |                  |
| ROSETA 1   |              |              |              |                |              |              |                    |                    |                  |
| $\epsilon_1$                                     | $\epsilon_2$ | $\epsilon_3$ | $\epsilon_4$ | $\epsilon_5$   | $\epsilon_6$ | $\epsilon_7$ | $\bar{\epsilon}_1$ | $\bar{\epsilon}_2$ | $\bar{\epsilon}$ |
| (%)  | (%)          | (%)          | (%)          | (%)            | (%)          | (%)          | (MPa)              | (MPa)              | (%)              |
| 0,00   | 0,00         | 0,0          | 0,0          | -0,0           | -0,0         | 0,0          | 0,0                | -0,0               | 0,0              |
| 10,00  | 0,00         | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 5,0                | -7,0               | 0,0              |
| 20,00  | 10,00        | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 10,0               | -10,0              | 0,0              |
| 30,00  | 20,00        | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 15,0               | -15,0              | 0,0              |
| 40,00  | 30,00        | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 20,0               | -20,0              | 0,0              |
| 50,00  | 40,00        | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 25,0               | -25,0              | 0,0              |
| 60,00  | 50,00        | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 30,0               | -30,0              | 0,0              |
| 70,00  | 60,00        | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 35,0               | -35,0              | 0,0              |
| 80,00  | 70,00        | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 40,0               | -40,0              | 0,0              |
| 90,00  | 80,00        | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 45,0               | -45,0              | 0,0              |
| 100,00   | 90,00        | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 50,0               | -50,0              | 0,0              |
| 110,00   | 100,00       | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 55,0               | -55,0              | 0,0              |
| 120,00   | 110,00       | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 60,0               | -60,0              | 0,0              |
| 130,00   | 120,00       | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 65,0               | -65,0              | 0,0              |
| 140,00   | 130,00       | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 70,0               | -70,0              | 0,0              |
| 150,00   | 140,00       | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 75,0               | -75,0              | 0,0              |
| 160,00   | 150,00       | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 80,0               | -80,0              | 0,0              |
| 170,00   | 160,00       | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 85,0               | -85,0              | 0,0              |
| 180,00   | 170,00       | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 90,0               | -90,0              | 0,0              |
| 190,00   | 180,00       | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 95,0               | -95,0              | 0,0              |
| 200,00   | 190,00       | -0,0         | 0,0          | -0,0           | 0,0          | -0,0         | 100,0              | -100,0             | 0,0              |

As colunas identificadas por  $F_1$  e  $F_2$  correspondem aos valores medidos da força aplicada. As colunas  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_b$ ,  $\epsilon_c$  correspondem aos valores das deformações para cada um dos extensômetros da roseta e  $\epsilon_1, \epsilon_2$  são as deformações nas direções principais.

Nas colunas posteriores o próprio sistema calcula e apresenta os resultados das tensões principais em MPa e o ângulo do primeiro extensômetro ( $\epsilon_a$ ), posicionado no eixo longitudinal da viga, em relação a direção principal 1. O sentido positivo é o anti-horário decorrente da instalação utilizada e previamente identificada como um dado de entrada para o programa do sistema de aquisição de dados.

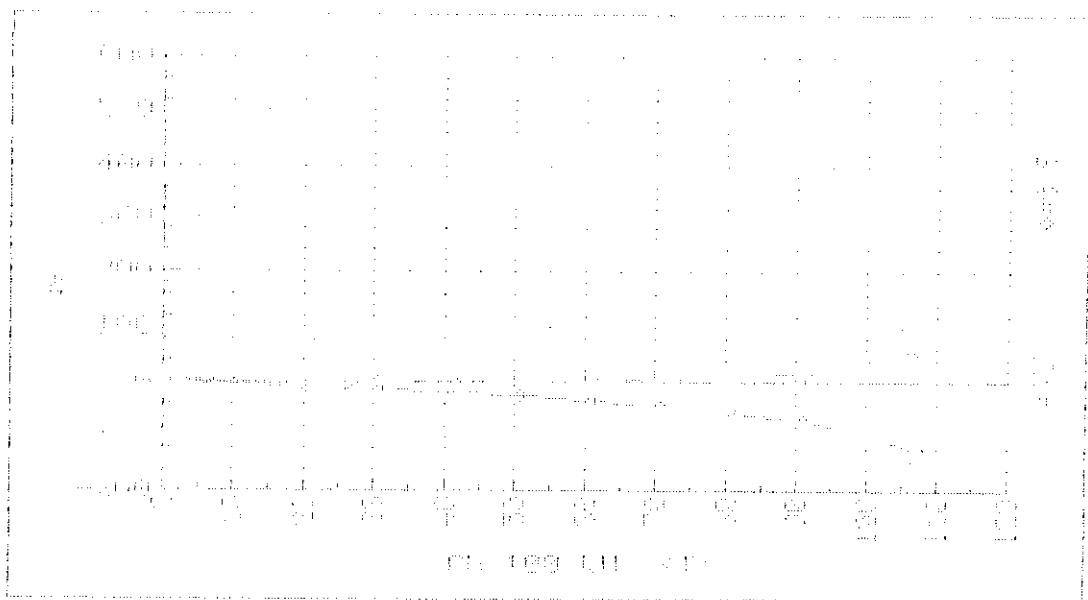


GRÁFICO VII.6- Exemplo do gráfico das deformações nos extensômetros elétricos que compõem a roseta

#### VII.4.3.1- Resultados das Tensões Viga 1.

As Tabelas VII.10 e VII.11 apresentam as tensões nas seções instrumentadas 1 e 2. Os valores das tensões teóricas foram obtidas com o módulo de resistência calculado considerando:

SEC BRUT: módulo de resistência bruto;

SEC LIQ : módulo de resistência líquido, considerando o

enfraquecimento devido aos furos na mesa superior e inferior;

SEC LIQ\* : módulo de resistência líquido, considerando somente o enfraquecimento na mesa tracionada.

A análise dos resultados das tensões estimadas nas seções 1 e 2 permitem observar que os valores medidos são inferiores aos calculados considerando a seção bruta. É importante destacar que os valores das tensões calculadas utilizando as características líquidas da seção transversal conduzem a resultados cerca de 25% superiores aos medidos.

TABELA VII.10 - Tensões Viga 1 - Ensaio 3

| FORÇA<br>MÉDIA<br>APLICADA<br>(kN) | TENSÃO SEÇÃO 1<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |          |         |          |                 |          |         |          |
|------------------------------------|---|----------|---------|----------|-----------------|----------|---------|----------|
|                                    | MESA TRACIONADA                         |          |         |          | MESA COMPRIMIDA |          |         |          |
|                                    | ENSAIO                                  | SEC BRUT | SEC LIQ | SEC LIQ* | ENSAIO          | SEC BRUT | SEC LIQ | SEC LIQ* |
| 0.000                              | 0.000                                   | 0.000    | 0.000   | 0.000    | 0.000           | 0.000    | 0.000   | 0.000    |
| 20.060                             | 5.248                                   | 5.749    | 6.521   | 6.961    | -5.022          | -5.349   | -6.521  | -5.609   |
| 40.030                             | 10.414                                  | 10.675   | 13.012  | 13.890   | -10.189         | -10.675  | -13.012 | -11.193  |
| 59.925                             | 15.642                                  | 15.980   | 19.479  | 20.793   | -15.375         | -15.980  | -19.479 | -16.756  |
| 79.995                             | 20.808                                  | 21.332   | 26.003  | 27.757   | -20.602         | -21.332  | -26.003 | -22.368  |
| 99.890                             | 26.035                                  | 26.637   | 32.470  | 34.661   | -26.445         | -26.637  | -32.470 | -27.930  |

TABELA VII.11 - Tensões Viga 1 - Ensaio 3

| FORÇA<br>MÉDIA<br>APLICADA<br>(kN) | TENSÃO SEÇÃO 2<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |          |         |          |                 |          |         |          |
|------------------------------------|---|----------|---------|----------|-----------------|----------|---------|----------|
|                                    | MESA TRACIONADA                         |          |         |          | MESA COMPRIMIDA |          |         |          |
|                                    | ENSAIO                                  | SEC BRUT | SEC LIQ | SEC LIQ* | ENSAIO          | SEC BRUT | SEC LIQ | SEC LIQ* |
| 0.000                              | 0.000                                   | 0.000    | 0.000   | 0.000    | 0.000           | 0.000    | 0.000   | 0.000    |
| 20.060                             | 3.403                                   | 3.343    | 4.075   | 4.350    | -3.300          | -3.343   | -4.075  | -3.506   |
| 40.030                             | 6.724                                   | 6.672    | 8.133   | 8.681    | -6.683          | -6.672   | -8.133  | -6.996   |
| 59.925                             | 10.107                                  | 9.987    | 12.174  | 12.996   | -10.066         | -9.987   | -12.174 | -10.472  |
| 79.995                             | 13.571                                  | 13.333   | 16.252  | 17.348   | -13.469         | -13.333  | -16.252 | -13.960  |
| 99.890                             | 18.430                                  | 16.648   | 20.294  | 21.663   | -16.995         | -16.648  | -20.294 | -17.457  |

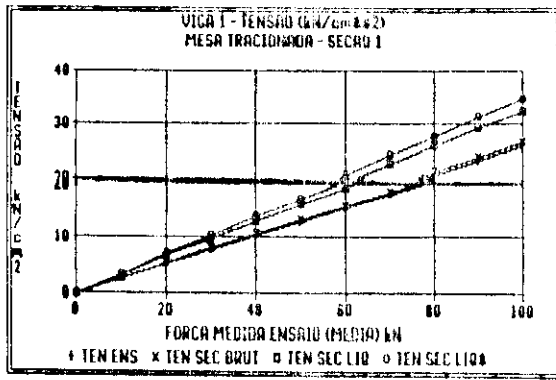


GRÁFICO VII.7 - Viga 1 -  
Ensaio 3

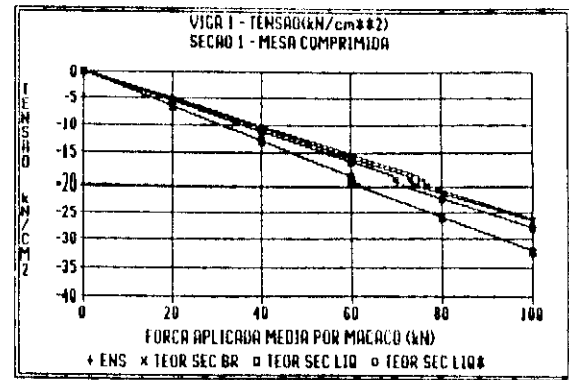


GRÁFICO VII.8 - Viga 1 -  
Ensaio 3

A utilização das características geométricas líquidas para o cálculo das tensões deve ser observada com restrições, pois os extensômetros elétricos estão posicionados numa seção sem enfraquecimento. Por outro lado somente a consideração do enfraquecimento da mesa tracionada conduz a resultados também discrepantes daqueles medidos.

A principal conclusão deste ensaio baseia-se nos dados permitindo estabelecer que as tensões na mesa tracionada são praticamente iguais aos medidos na mesa comprimida (variação de ordem de 1%). Este fato indica que o comportamento da viga não foi alterado pela presença da furação necessária para a composição da viga rebitada nas seções instrumentadas.

O comportamento linear tensão-força aplicada pode ser comprovado através dos Gráficos VII.7 e VII.8.

Para a Viga 1 estão apresentados, a seguir, as tensões de cisalhamento obtidas nos pontos instrumentados com rosetas. A formulação utilizada já foi apresentada anteriormente.

Destacam-se os resultados obtidos na roseta 1 (posicionada fora do eixo da viga e a aproximadamente  $h/2$  do apoio na região tracionada) que indicam a variação de tensão segundo o eixo de viga ( $x$ ) muito diferente do teórico.

As tabelas VII.12 a VII.15 apresentam os resultados das tensões de cisalhamento para as rosetas 1, 2, 3 e 4.

TABELA VII.12 - Viga 1 - Ensaio 3

VIGA 1 ROSETA 1 - RESULTADOS TEORICOS E DE ENSAIO

| FORÇA APLICADA<br>MÉDIA<br>(kN) | VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS         |                                     |               |   |         |         | VALORES TEÓRICOS      |                  |
|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------|---|---------|---------|-----------------------|------------------|
|                                 | DIREÇÕES PRINCIPAIS                 |                                     |               | TENSÕES ENSAIO<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |         |         | (kN/cm <sup>2</sup> ) |                  |
|                                 | $\sigma_1$<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_2$<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | ÂNGULO<br>(°) | DIREC X                                 | DIREC Y | CISALH. | TENSÃO<br>CISALH.     | TENSÃO<br>EIXO X |
| 0.0000                          | .1000                               | .0070                               | 0.0000        | 0.0000                                  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000                | 0.0000           |
| 20.0600                         | 1.1000                              | -1.3200                             | 43.6000       | -.0509                                  | -.1691  | 1.2086  | 1.3320                | -.2447           |
| 40.0300                         | 2.0300                              | -2.6900                             | 43.4000       | -.1983                                  | -.4617  | 2.3563  | 2.6580                | -.4884           |
| 59.9250                         | 3.0700                              | -4.0400                             | 42.9000       | -.2246                                  | -.7454  | 3.5455  | 3.9790                | -.7311           |
| 79.9950                         | 4.1800                              | -5.5600                             | 42.0000       | -.1810                                  | -1.1990 | 4.8433  | 5.3117                | -.9759           |
| 99.8900                         | 5.6400                              | -7.6100                             | 40.7000       | .0057                                   | -1.9757 | 6.5505  | 6.6327                | -1.2187          |

TABELA VII.13 - Viga 1 - Ensaio 3

VIGA 1 ROSETA 2 - RESULTADOS TEORICOS E DE ENSAIO

| FORÇA APLICADA<br>MÉDIA<br>(kN) | VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS         |                                     |               |   |         |         | VALORES TEÓRICOS      |                  |
|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------|---|---------|---------|-----------------------|------------------|
|                                 | DIREÇÕES PRINCIPAIS                 |                                     |               | TENSÕES ENSAIO<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |         |         | (kN/cm <sup>2</sup> ) |                  |
|                                 | $\sigma_1$<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_2$<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | ÂNGULO<br>(°) | DIREC X                                 | DIREC Y | CISALH. | TENSÃO<br>CISALH.     | TENSÃO<br>EIXO X |
| 0.0000                          | .1000                               | .0070                               | 0.0000        | 0.0000                                  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000                | 0.0000           |
| 20.0600                         | 1.2100                              | -1.4300                             | 42.1000       | .0233                                   | -.2433  | 1.3133  | 1.3320                | 0.0000           |
| 40.0300                         | 2.2100                              | -2.8500                             | 41.7000       | -.0293                                  | -.6107  | 2.5132  | 2.6580                | 0.0000           |
| 59.9250                         | 3.2300                              | -4.3100                             | 41.3000       | -.0548                                  | -1.0252 | 3.7386  | 3.9790                | 0.0000           |
| 79.9950                         | 4.2400                              | -5.8500                             | 40.9000       | -.0856                                  | -1.5244 | 4.9934  | 5.3117                | 0.0000           |
| 99.8900                         | 5.2100                              | -7.7600                             | 40.3000       | -.2160                                  | -2.3340 | 6.3979  | 6.6327                | 0.0000           |

TABELA VII.14 - Viga 1 - Ensaio 3

VIGA 1 ROSETA 3 - RESULTADOS TEORICOS E DE ENSAIO

| FORÇA APLICADA<br>MÉDIA<br>(kN) | VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS         |                                     |               |   |         |         | VALORES TEÓRICOS      |                  |
|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------|---|---------|---------|-----------------------|------------------|
|                                 | DIREÇÕES PRINCIPAIS                 |                                     |               | TENSÕES ENSAIO<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |         |         | (kN/cm <sup>2</sup> ) |                  |
|                                 | $\sigma_1$<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_2$<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | ÂNGULO<br>(°) | DIREC X                                 | DIREC Y | CISALH. | TENSÃO<br>CISALH.     | TENSÃO<br>EIXO X |
| 0.0000                          | .1000                               | .0070                               | 0.0000        | 0.0000                                  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000                | 0.0000           |
| 20.0600                         | 1.3900                              | -1.4500                             | 42.9000       | .0740                                   | -.1340  | 1.4162  | 1.3320                | 0.0000           |
| 40.0300                         | 2.4800                              | -2.9800                             | 42.6000       | -.0218                                  | -.4782  | 2.7204  | 2.6580                | 0.0000           |
| 59.9250                         | 3.5800                              | -4.5800                             | 42.3000       | -.1161                                  | -.8839  | 4.0619  | 3.9790                | 0.0000           |
| 79.9950                         | 4.5600                              | -6.3900                             | 41.9000       | -.3242                                  | -1.5058 | 5.4430  | 5.3117                | 0.0000           |
| 99.8900                         | 5.3100                              | -8.8100                             | 41.2000       | -.8167                                  | -2.6833 | 6.9980  | 6.6327                | 0.0000           |

TABELA VII.15 - Viga 1 - Ensaio 3

VIGA 1 ROSETA 4 - RESULTADOS TEORICOS E DE ENSAIO

| FORÇA APLICADA MÉDIA (kN) | VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS         |                                     |               |                                      |         |         | VALORES TEÓRICOS      |                  |
|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------------------|---------|---------|-----------------------|------------------|
|                           | DIREÇÕES PRINCIPAIS                 |                                     |               | TENSÕES ENSAIO (kN/cm <sup>2</sup> ) |         |         | (kN/cm <sup>2</sup> ) |                  |
|                           | $\sigma_1$<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_2$<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | ÂNGULO<br>(°) | DIREC X                              | DIREC Y | CISALH. | TENSÃO<br>CISALM.     | TENSÃO<br>EIXO X |
| 0.0000                    | 0.0000                              | 0.0000                              | 0.0000        | 0.0000                               | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000                | 0.0000           |
| 20.0600                   | 1.0400                              | -1.6500                             | 42.5000       | -0.1878                              | -0.4222 | 1.3399  | 1.3320                | 0.0000           |
| 40.0300                   | 1.9200                              | -3.3600                             | 42.2000       | -0.4626                              | -0.9774 | 2.6274  | 2.6580                | 0.0000           |
| 59.9250                   | 2.7200                              | -5.2100                             | 41.8000       | -0.8033                              | -1.6867 | 3.9403  | 3.9790                | 0.0000           |
| 79.9950                   | 3.4200                              | -7.3000                             | 41.1000       | -1.2126                              | -2.6674 | 5.3104  | 5.3117                | 0.0000           |
| 99.8900                   | 4.0300                              | -10.1200                            | 38.7000       | -1.5019                              | -4.5881 | 6.9047  | 6.6327                | 0.0000           |

Os Gráficos VII.9 a VII.12 ilustram os valores teóricos e de ensaio obtidos para a tensão de cisalhamento.

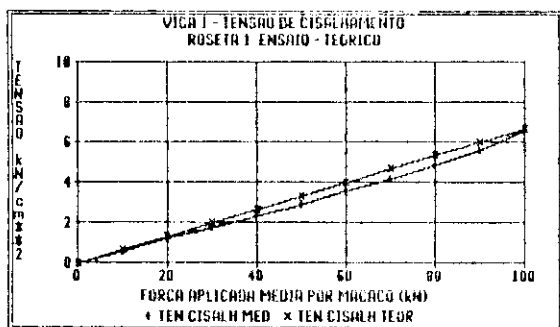


GRÁFICO VII.9 - Viga 1 - Ensaio 3

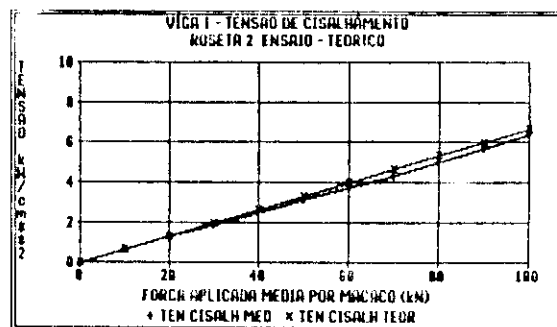


GRÁFICO VII.10 - Viga 1 - Ensaio 3

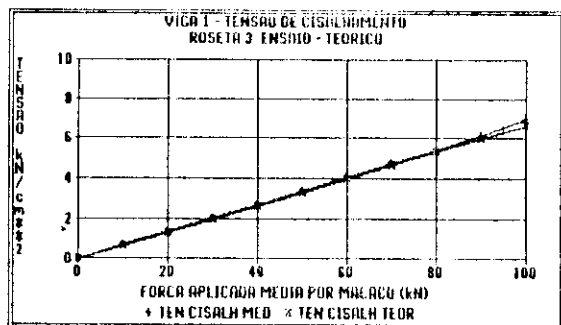


GRÁFICO VII.11 - Viga 1 - Ensaio 3

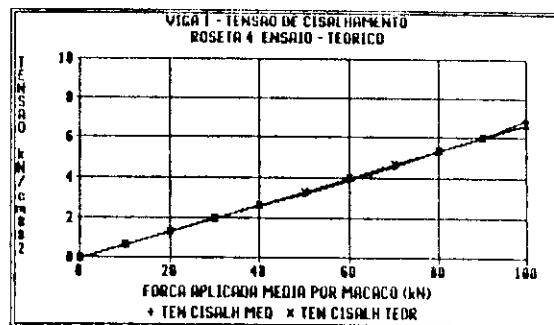


GRÁFICO VII.12 - Viga 1 - Ensaio 3

#### VII.4.3.2- Resultados das Tensões Viga 2.

Os resultados das tensões médias nas mesas da Viga 2, Tabela VII.16 e os Gráficos VII.13 e VII.14, indicam um comportamento linear força aplicada-tensões em todas as seções instrumentadas.

O ponto 4 foi instrumentado na seção imediatamente antes da variação de seção nas mesas e não indicou concentrações de tensão ou qualquer outra alteração digna de nota.

Os valores teóricos comparados com os obtidos em ensaios estão coerentes, indicando que o comportamento deste modelo foi alterado pela presença das chapas de reforços nas mesas.

A Tabela VII.16 apresenta as tensões nas seções instrumentadas 1, 2 e 4. Os valores das tensões teóricas foram obtidas considerando o módulo de resistência bruto.

TABELA VII.16 - Viga 2 - Ensaio 2

| FORÇA<br>MÉDIA<br>APLICADA<br>(kN) | TENSÃO SEÇÃO 1<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |         |                 |         | TENSÃO SEÇÃO 2<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |         |                 |         | TENSÃO SEÇÃO 4<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |         |                 |         |
|------------------------------------|---|---------|-----------------|---------|---|---------|-----------------|---------|---|---------|-----------------|---------|
|                                    | MESA TRACIONADA                         |         | MESA COMPRIMIDA |         | MESA TRACIONADA                         |         | MESA COMPRIMIDA |         | MESA TRACIONADA                         |         | MESA COMPRIMIDA |         |
|                                    | ENSAIO                                  | TEÓRICO | ENSAIO          | TEÓRICO | ENSAIO                                  | TEÓRICO | ENSAIO          | TEÓRICO | ENSAIO                                  | TEÓRICO | ENSAIO          | TEÓRICO |
| 0.00                               | 0.00                                    | 0.00    | 0.00            | 0.00    | 0.00                                    | 0.00    | 0.00            | 0.00    | 0.00                                    | 0.00    | 0.00            | 0.00    |
| 20.02                              | 3.83                                    | 3.91    | -3.79           | -3.91   | 2.44                                    | 2.44    | -2.50           | -2.44   | 2.07                                    | 2.15    | -1.99           | -2.15   |
| 39.97                              | 7.63                                    | 7.81    | -7.61           | -7.81   | 4.88                                    | 4.88    | -5.00           | -4.88   | 4.10                                    | 4.29    | -4.00           | -4.29   |
| 59.98                              | 11.48                                   | 11.72   | -11.42          | -11.72  | 7.38                                    | 7.33    | -7.46           | -7.33   | 6.21                                    | 6.44    | -5.99           | -6.44   |
| 80.00                              | 15.33                                   | 15.63   | -15.25          | -15.63  | 9.88                                    | 9.77    | -9.96           | -9.77   | 8.26                                    | 8.59    | -7.97           | -8.59   |
| 99.91                              | 19.19                                   | 19.52   | -19.11          | -19.52  | 12.40                                   | 12.20   | -12.44          | -12.20  | 10.35                                   | 10.73   | -10.00          | -10.73  |

Os gráficos VII.13 e VII.14 apresentam as tensões obtidas na mesa comprimida e tracionada.

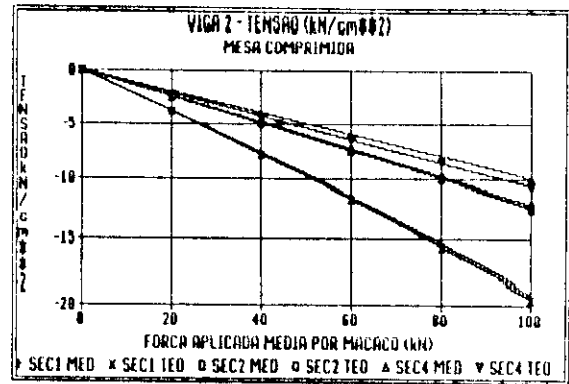
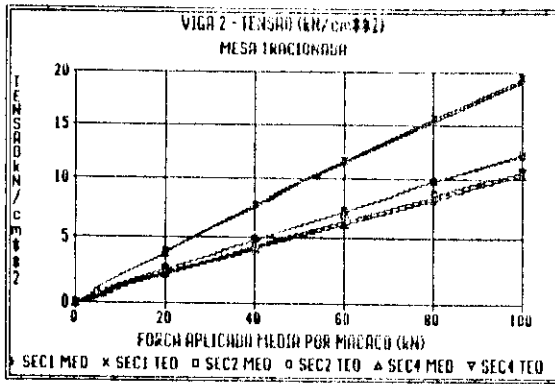


GRÁFICO VII.13 - Viga 2 -  
Ensaio 2

GRÁFICO VII.14 - Viga 2 -  
Ensaio 2

As Tabelas VII.17 a 19 apresentam as tensões de cisalhamento obtidas a partir das medições das rosetas 2, 3 e 4.

TABELA VII.17 - Viga 2 - Ensaio 2

VIGA 2 ROSETA 2 - RESULTADOS TEÓRICOS E DE ENSAIO

| FORÇA APLICADA MÉDIA (kN) | VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS |                     |            |                         |         |         | VALORES TEÓRICOS (kN/cm²) |               |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------|------------|-------------------------|---------|---------|---------------------------|---------------|
|                           | DIREÇÕES PRINCIPAIS         |                     |            | TENSÕES ENSAIO (kN/cm²) |         |         | TENSÃO CISALH.            | TENSÃO EIXO X |
|                           | $\sigma_1$ (kN/cm²)         | $\sigma_2$ (kN/cm²) | ÂNGULO (°) | DIREC X                 | DIREC Y | CISALH. |                           |               |
| 0.0000                    | 0.0000                      | .0070               | 0.0000     | 0.0000                  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000                    | 0.0000        |
| 20.0150                   | 1.2300                      | -.9200              | 38.8000    | .3858                   | -.0758  | 1.0499  | 1.3320                    | 0.0000        |
| 39.9700                   | 2.2900                      | -2.2100             | 39.0000    | .5978                   | -.4278  | 2.2008  | 2.6580                    | 0.0000        |
| 59.9850                   | 3.4100                      | -3.4700             | 39.1000    | .6731                   | -.7331  | 3.3674  | 3.9790                    | 0.0000        |
| 79.9950                   | 4.4700                      | -4.7700             | 39.1000    | .7943                   | -1.0943 | 4.5275  | 5.3117                    | 0.0000        |
| 99.9050                   | 5.5500                      | -6.1300             | 39.1000    | .9037                   | -1.4837 | 5.7167  | 6.6327                    | 0.0000        |

TABELA VII.18 - Viga 2 - Ensaio 2

VIGA 2 ROSETA 3 - RESULTADOS TEÓRICOS E DE ENSAIO

| FORÇA APLICADA MÉDIA (kN) | VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS |                     |            |                         |         |         | VALORES TEÓRICOS (kN/cm²) |               |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------|------------|-------------------------|---------|---------|---------------------------|---------------|
|                           | DIREÇÕES PRINCIPAIS         |                     |            | TENSÕES ENSAIO (kN/cm²) |         |         | TENSÃO CISALH.            | TENSÃO EIXO X |
|                           | $\sigma_1$ (kN/cm²)         | $\sigma_2$ (kN/cm²) | ÂNGULO (°) | DIREC X                 | DIREC Y | CISALH. |                           |               |
| 0.0000                    | 0.0000                      | 0.0000              | 0.0000     | 0.0000                  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000                    | 0.0000        |
| 20.0150                   | 1.6400                      | -1.0000             | 44.2000    | .3569                   | .2831   | 1.3165  | 1.3320                    | 0.0000        |
| 39.9700                   | 2.8200                      | -2.3800             | 44.0000    | .3107                   | .1293   | 2.5909  | 2.6580                    | 0.0000        |
| 59.9850                   | 4.0300                      | -3.8400             | 43.9000    | .2460                   | -.0560  | 3.9175  | 3.9790                    | 0.0000        |
| 79.9950                   | 5.1600                      | -5.3000             | 43.9000    | .1307                   | -.2707  | 5.1995  | 5.3117                    | 0.0000        |
| 99.9050                   | 6.3000                      | -6.8000             | 43.8000    | .0242                   | -.5242  | 6.4925  | 6.6327                    | 0.0000        |



TABELA VII.19 - Viga 2 - Ensaio 2

VIGA 2 ROSETA 4 - RESULTADOS TEORICOS E DE ENSAIO

| FORÇA APLICADA<br>MÉDIA<br>(kN) | VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS         |                                     |               |                                  |                                  |                                  | VALORES TEÓRICOS      |                  |
|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------|
|                                 | DIREÇÕES PRINCIPAIS                 |                                     |               | TENSÕES ENSAIO                   |                                  |                                  | (kN/cm <sup>2</sup> ) |                  |
|                                 | $\sigma_1$<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_2$<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | ÂNGULO<br>(°) | DIREC X<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | DIREC Y<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | CISALH.<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | TENSÃO<br>CISALH.     | TENSÃO<br>EIXO X |
| 0.0000                          | 0.0000                              | 0.0000                              | 0.0000        | 0.0000                           | 0.0000                           | 0.0000                           | 0.0000                | 0.0000           |
| 20.0150                         | 1.1700                              | -1.2200                             | 45.4000       | -0.0417                          | -0.0083                          | 1.1949                           | 1.2862                | 0.0000           |
| 39.9700                         | 2.2500                              | -2.5300                             | 45.0000       | -0.1400                          | -0.1400                          | 2.3900                           | 2.5685                | 0.0000           |
| 59.9850                         | 3.3500                              | -3.7700                             | 44.8000       | -0.1851                          | -0.2349                          | 3.5599                           | 3.8546                | 0.0000           |
| 79.9950                         | 4.3800                              | -5.0070                             | 44.7000       | -0.2643                          | -0.3627                          | 4.6932                           | 5.1405                | 0.0000           |
| 99.9050                         | 5.4200                              | -6.3300                             | 44.5000       | -0.3525                          | -0.5575                          | 5.8761                           | 6.4199                | 0.0000           |

Os Gráficos VII.15 a 17 reproduzem graficamente as tensões de cisalhamento apresentadas nas Tabelas acima.

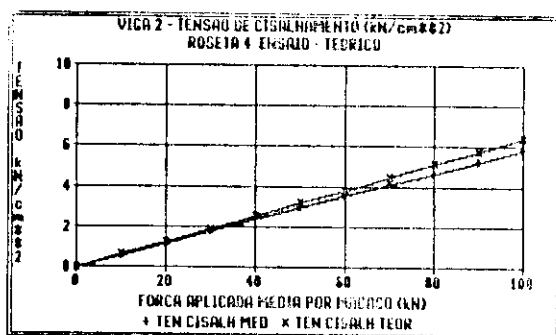


GRÁFICO VII.15- Viga 2 -  
Ensaio 2

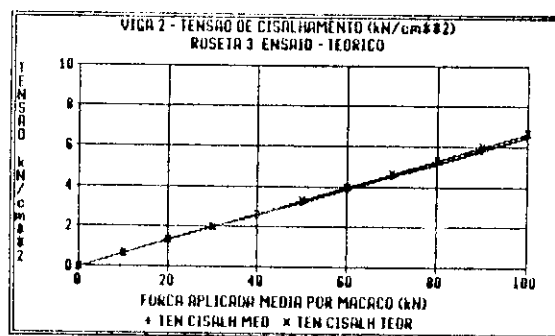


GRÁFICO VII.16- Viga 2 -  
Ensaio 2

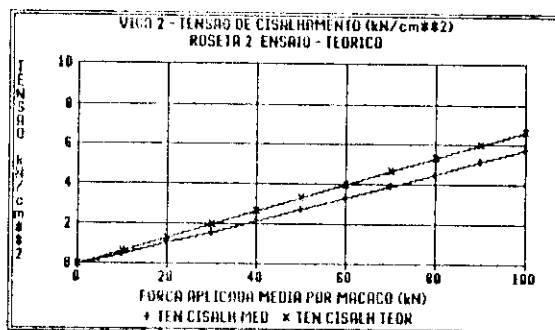


GRÁFICO VII.17 - Viga 2 - Ensaio 2

Os resultados das tensões de cisalhamento também são coerentes, com os valores calculados próximos aos medidos.

#### VII.4.3.3- Resultados das Tensões Viga 3.

A análise dos resultados das tensões para Viga 3 devem ser realizados considerando as particularidades deste modelo.

A aplicação da força de protensão, como já citada anteriormente, foi realizada várias vezes no ensaio 1 cujos resultados estão apresentados no anexo. Após a avaliação destes resultados concluiu-se que os valores obtidos na protensão através do aperto das porcas nos tirantes eram satisfatórios e atingiam os valores previamente definidos.

Os resultados teóricos foram obtidos considerando as expressões abaixo, deduzidas anteriormente no capítulo V deste trabalho;

$$\sigma_{\text{mesa comp.}} = - \frac{(P + \Delta P)}{A_g} - \frac{M - (P + \Delta P) e}{W}$$

$$\sigma_{\text{mesa trac.}} = - \frac{(P + \Delta P)}{A_g} + \frac{M - (P + \Delta P) e}{W}$$

Portanto, no ensaio 2 aplicou-se uma força de protensão  $P = 53,9\text{kN}$  e os resultados das tensões nos tirantes, observados nas Tabelas VII.20 e 21 e nos Gráficos VII.18 a 20, indicam que as tensões em ambos são próximas e o comportamento linear está evidente.

A análise das tensões medidas nas mesas também estão coerentes com os valores calculados teoricamente. Observa-se porém que os valores das tensões medidas nos tirantes são inferiores aos teóricos e na viga os resultados indicam o oposto.

Pode-se concluir que o comportamento dos tirantes fez com que as tensões observadas na viga fossem superiores aos calculados teoricamente.

As Tabelas VII.20 e VII.21 apresentam as tensões nas seções 1 e 2 da viga e nos tirantes.

TABELA VII.20 - Viga 3 - Ensaio 2

| FORÇA<br>MÉDIA<br>APLICADA<br>(kN) | TENSÃO SEÇÃO 1<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |         |                 |         | TENSÃO SEÇÃO 2<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |         |                 |         |
|------------------------------------|---|---------|-----------------|---------|---|---------|-----------------|---------|
|                                    | MESA TRACIONADA                         |         | MESA COMPRIMIDA |         | MESA TRACIONADA                         |         | MESA COMPRIMIDA |         |
|                                    | ENSAIO                                  | TEÓRICO | ENSAIO          | TEÓRICO | ENSAIO                                  | TEÓRICO | ENSAIO          | TEÓRICO |
| 2.10                               | -3.08                                   | -3.22   | .78             | .70     | -3.30                                   | -3.44   | .94             | .92     |
| 9.97                               | -1.48                                   | -1.58   | -1.05           | -1.24   | -2.34                                   | -2.62   | -.23            | -.21    |
| 19.95                              | .59                                     | .50     | -3.36           | -3.71   | -1.09                                   | -1.57   | -1.74           | -1.64   |
| 29.93                              | 2.69                                    | 2.58    | -5.70           | -6.18   | 1.14                                    | -1.53   | -3.26           | -3.07   |
| 39.97                              | 4.82                                    | 4.67    | -8.04           | -8.66   | 1.39                                    | .53     | -4.80           | -4.51   |
| 49.88                              | 6.97                                    | 6.74    | -10.39          | -11.11  | 2.62                                    | 1.56    | -6.33           | -5.94   |
| 59.92                              | 9.20                                    | 8.83    | -12.75          | -13.59  | 3.85                                    | 2.62    | -7.91           | -7.38   |
| 69.83                              | 11.69                                   | 10.90   | -15.17          | -16.04  | 5.12                                    | 3.65    | -9.53           | -8.80   |
| 79.94                              | 14.15                                   | 13.00   | -17.53          | -18.54  | 6.44                                    | 4.71    | -11.13          | -10.25  |
| 89.80                              | 16.61                                   | 15.06   | -19.78          | -20.98  | 7.73                                    | 5.75    | -12.71          | -11.66  |
| 99.89                              | 19.23                                   | 17.16   | -22.02          | -23.47  | 9.27                                    | 6.80    | -14.37          | -13.11  |

TABELA VII.21 - Viga 3 - Ensaio 2

| FORÇA<br>MÉDIA<br>APLICADA<br>(kN) | TENSÃO TIRANTES<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |         |           |         |
|------------------------------------|--|---------|-----------|---------|
|                                    | TIRANTE 1                                |         | TIRANTE 2 |         |
|                                    | ENSAIO                                   | TEÓRICO | ENSAIO    | TEÓRICO |
| 2.10                               | 13.28                                    | 13.85   | 13.53     | 13.85   |
| 9.97                               | 14.86                                    | 15.53   | 15.01     | 15.53   |
| 19.95                              | 16.77                                    | 17.66   | 16.93     | 17.66   |
| 29.93                              | 18.66                                    | 19.78   | 18.86     | 19.78   |
| 39.97                              | 20.52                                    | 21.92   | 20.71     | 21.92   |
| 49.88                              | 22.35                                    | 24.03   | 22.51     | 24.03   |
| 59.92                              | 24.11                                    | 26.17   | 24.31     | 26.17   |
| 69.83                              | 26.06                                    | 28.28   | 26.28     | 28.28   |
| 79.94                              | 28.02                                    | 30.43   | 28.23     | 30.43   |
| 89.80                              | 29.99                                    | 32.53   | 30.18     | 32.53   |
| 99.89                              | 31.96                                    | 34.68   | 32.12     | 34.68   |

Os gráficos VII.18 a VII.20 reproduzem os valores das tensões apresentadas nas Tabelas acima:

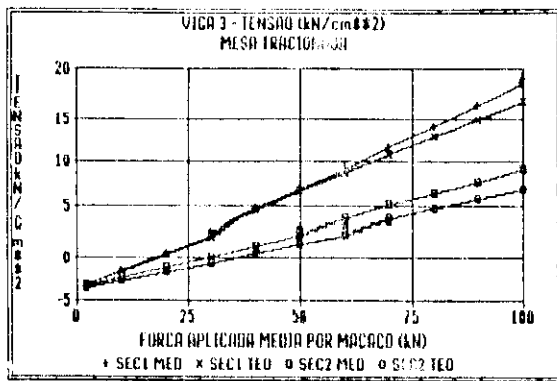


GRÁFICO VII.18- Viga 3 -  
Ensaio 2

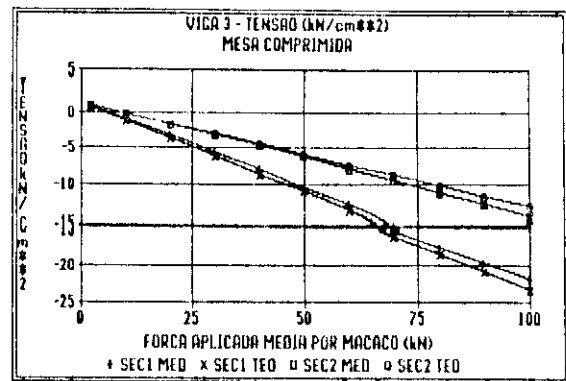


GRÁFICO VII.19- Viga 3 -  
Ensaio 2

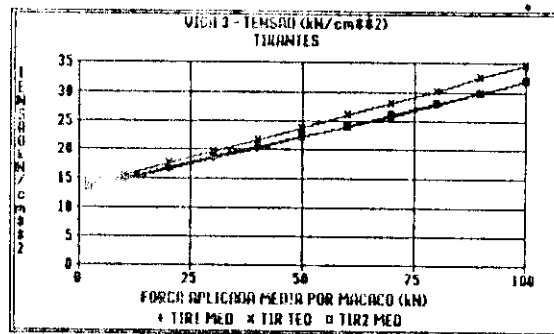


GRÁFICO VII.20 - Viga 3 - Ensaio 2

#### VII.4.3.4- Resultados das Tensões Viga 4

A análise das tensões nas seções 1 e 4 na Viga 4 permite observar que o comportamento tensão-carga aplicada é linear.

Como já citado na análise dos deslocamentos, a Viga 4 apresentou resultados experimentais discrepantes dos valores obtidos nos ensaios. O primeiro a ser destacado é que os resultados indicaram tensões na viga superiores ao modelo teórico e no tirante ocorreu o inverso.

Estes resultados corroboram e confirmam a afirmação anteriormente apresentada: a fabricação dos tirantes apresentou folgas decorrentes do contato tirante chapa de topo do montante responsáveis por estes resultados.

Por outro lado, os valores das tensões estimadas nas seções 6, 7 e 8, destinadas a avaliar a influência da

furação e dos rebites, apresentou resultados extremamente satisfatórios.

Os valores observados indicam que a influência dos rebites foi pequena (variação da ordem de 2%) nos valores médios das tensões, porém é conveniente ressaltar que estes resultados prendem-se a este modelo específico com as particularidades de dimensões de chapas e rebites. Não é possível extrapolar estes resultados, pois é reconhecido no meio técnico que as dimensões do corpo do rebite têm grande influência no comportamento desta ligação. Para este modelo fica evidenciado o efeito da transmissão de parte das tensões pelo atrito entre o rebite e as chapas, fato decorrente do processo de rebiteagem à quente ("aperto" do rebite) antes deste ser solicitado ao contato.

A Tabela VII.22 apresenta as tensões nas seções 1 e 4 da viga. A Tabela VII.23 apresenta as tensões observadas na mesa tracionada nas seções 1, 6, 7 e 8 onde a instrumentação foi realizada em seções afastadas de 40mm, incluindo seções com rebites. A Tabela VII.24 apresenta as tensões observadas nos tirantes.

TABELA VII.22 - Viga 4 - Ensaio 2

| FORÇA<br>MÉDIA<br>APLICADA<br>(kN) | TENSÃO SEÇÃO 1<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |         |                 |         | TENSÃO SEÇÃO 4<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |         |                 |         |
|------------------------------------|---|---------|-----------------|---------|---|---------|-----------------|---------|
|                                    | MESA TRACIONADA                         |         | MESA COMPRIMIDA |         | MESA TRACIONADA                         |         | MESA COMPRIMIDA |         |
|                                    | ENSAIO                                  | TEÓRICO | ENSAIO          | TEÓRICO | ENSAIO                                  | TEÓRICO | ENSAIO          | TEÓRICO |
| 0.000                              | 0.000                                   | 0.000   | 0.000           | 0.000   | 0.000                                   | 0.000   | 0.000           | 0.000   |
| 20.015                             | 2.276                                   | 1.703   | -2.788          | -3.264  | .553                                    | .498    | -1.148          | -1.591  |
| 40.030                             | 4.449                                   | 3.807   | -5.556          | -6.529  | 1.004                                   | .997    | -2.296          | -3.182  |
| 59.985                             | 6.663                                   | 5.705   | -8.344          | -9.784  | 1.476                                   | 1.494   | -3.465          | -4.769  |
| 79.940                             | 8.877                                   | 7.602   | -11.132         | -13.038 | 1.989                                   | 1.991   | -4.654          | -6.355  |
| 99.890                             | 11.275                                  | 9.500   | -14.022         | -16.292 | 2.686                                   | 2.487   | -5.904          | -7.941  |
| 119.960                            | 14.002                                  | 11.408  | -17.159         | -19.565 | 3.588                                   | 2.987   | -7.298          | -9.537  |
| 139.860                            | 16.810                                  | 13.301  | -20.357         | -22.811 | 4.428                                   | 3.483   | -8.754          | -11.119 |
| 149.785                            | 18.286                                  | 14.245  | -22.079         | -24.430 | 5.207                                   | 3.730   | -9.492          | -11.908 |

TABELA VII.23 - Viga 4 - Ensaio 2

| FORÇA<br>MÉDIA<br>APLICADA<br>(kN) | TENSÃO NOS TIRANTES<br>(kN / cm <sup>2</sup> ) |           |         |                       |           |         |                       |           |         |
|------------------------------------|--|-----------|---------|-----------------------|-----------|---------|-----------------------|-----------|---------|
|                                    | SEÇÃO INSTRUMENTADA 1                          |           |         | SEÇÃO INSTRUMENTADA 2 |           |         | SEÇÃO INSTRUMENTADA 3 |           |         |
|                                    | TIRANTE 1                                      | TIRANTE 2 | TEÓRICO | TIRANTE 1             | TIRANTE 2 | TEÓRICO | TIRANTE 1             | TIRANTE 2 | TEÓRICO |
| 0.00                               | 0.00   | 0.00      | 0.00    | 0.00                  | 0.00      | 0.00    | 0.00                  | 0.00      | 0.00    |
| 20.02                              | 2.73   | 2.77      | 3.36    | 2.67                  | 2.67      | 3.24    | 2.81                  | 2.75      | 3.36    |
| 40.03                              | 5.60   | 5.66      | 6.73    | 5.39                  | 5.41      | 6.48    | 5.76                  | 5.58      | 6.73    |
| 59.98                              | 8.38   | 8.49      | 10.08   | 8.10                  | 8.10      | 9.72    | 8.65                  | 8.34      | 10.08   |
| 79.94                              | 11.15  | 11.32     | 13.43   | 10.78                 | 10.80     | 12.95   | 11.52                 | 11.15     | 13.43   |
| 99.89                              | 13.92  | 13.57     | 16.78   | 13.35                 | 13.02     | 16.18   | 14.23                 | 13.51     | 16.78   |
| 119.96                             | 15.62  | 15.87     | 20.15   | 15.11                 | 15.13     | 19.43   | 16.22                 | 15.58     | 20.15   |
| 139.86                             | 17.40  | 17.69     | 23.50   | 16.79                 | 16.95     | 22.66   | 17.96                 | 17.45     | 23.50   |
| 149.79                             | 18.18  | 18.55     | 25.16   | 17.51                 | 17.84     | 24.27   | 18.76                 | 18.35     | 25.16   |

TABELA VII.24 - Viga 4 - Ensaio 2

| FORÇA<br>MÉDIA<br>APLICADA<br>(kN) | TENSÃO SEÇÃO 1<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |         | TENSÃO SEÇÃO 6<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | TENSÃO SEÇÃO 7<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) | TENSÃO SEÇÃO 8<br>(kN/cm <sup>2</sup> ) |
|------------------------------------|---|---------|---|---|---|
|                                    | MESA TRACIONADA                         |         | ENSAIO                                  | ENSAIO                                  | ENSAIO                                  |
|                                    | ENSAIO                                  | TEÓRICO |   |   |   |
| 0.000                              | 0.000                                   | 0.000   | 0.000                                   | 0.000                                   | 0.000                                   |
| 20.015                             | 2.276                                   | 1.903   | 2.214                                   | 2.235                                   | 2.235                                   |
| 40.030                             | 4.449                                   | 3.807   | 4.346                                   | 4.407                                   | 4.387                                   |
| 59.985                             | 6.663                                   | 5.705   | 6.581                                   | 6.601                                   | 6.581                                   |
| 79.940                             | 8.877                                   | 7.602   | 8.856                                   | 8.815                                   | 8.877                                   |
| 99.890                             | 11.275                                  | 9.500   | 11.337                                  | 11.213                                  | 11.398                                  |
| 119.960                            | 14.002                                  | 11.408  | 14.125                                  | 13.920                                  | 14.350                                  |
| 139.860                            | 16.810                                  | 13.301  | 17.035                                  | 16.748                                  | 17.343                                  |
| 149.785                            | 18.286                                  | 14.245  | 18.553                                  | 18.204                                  | 18.922                                  |

Os Gráficos VII.21 e VII.22 reproduzem as tensões da seção 1 e 4.

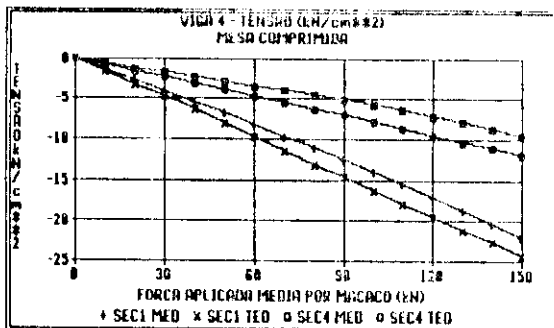


GRÁFICO VII.21- Viga 4 -  
Ensaio 2

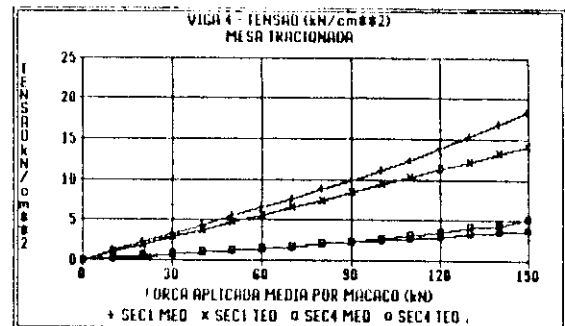


GRÁFICO VII.22- Viga 4 -  
Ensaio 2

O gráfico VII.23 reproduz os resultados obtidos nos tirantes.

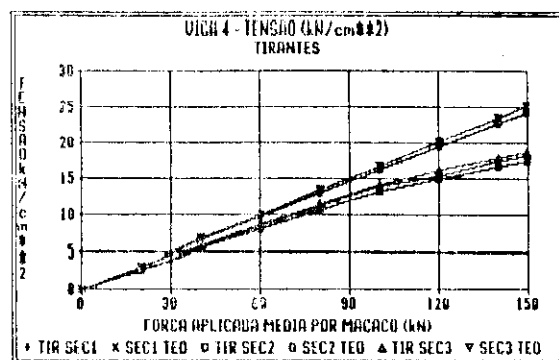


GRÁFICO VII.23- Viga 4 -  
Ensaio 2

#### VII.5- Conclusões:

Alguns comentários gerais sobre os resultados dos ensaios podem ser feitos:

- o comportamento força aplicada - deslocamento foi linear em todos os modelos ensaiados, permitindo concluir que a sistemática utilizada nos ensaios foi satisfatória;

- os reforços propostos apresentaram resultados satisfatórios e os deslocamentos observados, teóricos e os medidos, indicaram uma relação entre ambos dentro dos padrões normalmente aceitáveis na experimentação estrutural;

- os gráficos VII.24 e VII.25 ilustram os deslocamentos observados da seção central considerando também os valores teóricos calculados com a inércia bruta e líquida. Estes resultados indicam que os deslocamentos teóricos calculados com a inércia líquida se aproximam mais dos valores observados nos ensaios.

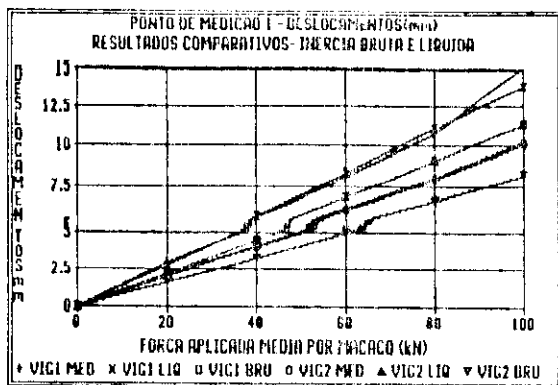


GRÁFICO VII.24- Viga 4 -  
Ensaio 2

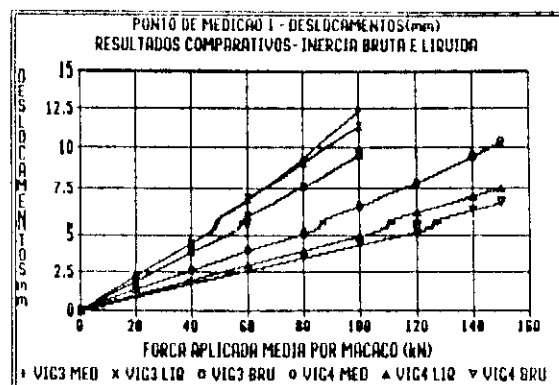


GRÁFICO VII.25- Viga 4 -  
Ensaio 2

- é possível visualizar que tanto para o reforço com cabo reto (Viga 3) como para a viga armada (Viga 4) os deslocamentos finais são inferiores à viga sem reforço com diminuições significativas destes deslocamentos.

- os resultados das tensões médias nas mesas e as demais observadas nos modelos ensaiados ratificam a boa técnica de instrumentação e ensaio dos modelos.

- o comportamento tensão estimada - força aplicada é linear em todos os modelos em suas várias etapas dos ensaios.

- os resultados comparativos das tensões na seção instrumentada 1 entre os vários modelos estão apresentados nos Gráficos VII.26 e VII.27. Nestes gráficos pode-se visualizar a influência de cada tipo de reforço nas tensões estimadas, bem como compará-las.

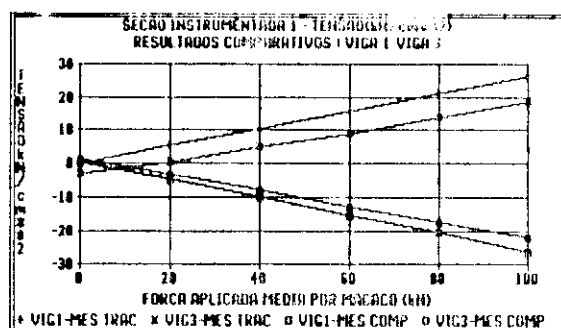


GRÁFICO VII.26- Viga 4 -  
Ensaio 2

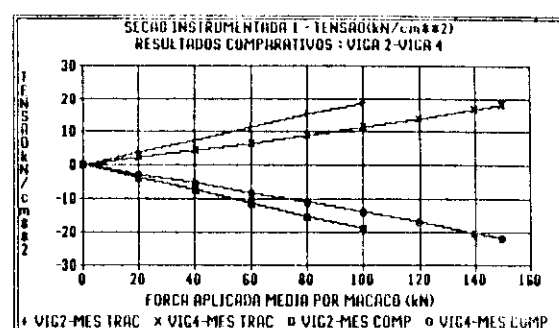


GRÁFICO VII.27- Viga 4 -  
Ensaio 2



Concluindo este capítulo é interessante ressaltar que os objetivos iniciais definidos no programa de ensaio foram atingidos, ou seja, analisar os resultados de ensaios de vigas rebitadas instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência e obter informações sobre três tipos de reforços comumente utilizados em vigas de aço.

## CAPÍTULO VIII

### CONSIDERAÇÕES FINAIS .

Ao final deste trabalho espera-se que as informações nele contidas permitam esclarecer alguns dos principais aspectos relativos à recuperação das pontes e que os dados obtidos nos ensaios e provas de carga possam contribuir para um melhor conhecimento do comportamento de pontes rebitadas.

A abrangência do tema deste trabalho, como já enfatizado em vários capítulos, torna-o limitado à análise de alguns dos principais aspectos da recuperação de pontes. A ênfase dada às pontes ferroviárias rebitadas está diretamente relacionada à realidade brasileira, pois pode-se afirmar que mais de noventa por cento das pontes metálicas em operação utilizam este meio de ligação.

A bibliografia pesquisada foi a mais ampla possível e os trabalhos relacionados procuraram estabelecer um panorama geral do tema no mundo. Foram pesquisados trabalhos específicos sobre recuperação de pontes, resultados de prova de carga, trabalhos sobre ligações rebitadas e até temas mais amplos que envolvem a política de manutenção, recuperação e operação de pontes em outros países. Constata-se também a quase total inexistência de trabalhos sob o tema publicados no Brasil.

Os dados históricos apresentados permitem ao leitor um primeiro contato com o tema abordado neste trabalho onde procurou-se, de uma maneira resumida e sintética, descrever

alguns aspectos históricos importantes na conceituação dos problemas que originam as recuperações e reforços de pontes e também alguns exemplos de recuperações de pontes realizadas no passado.

A importância de inspeções periódicas e os principais tipos de deterioração são objetos dos dois capítulos subsequentes. A abordagem destes temas, extensos por natureza, também foi desenvolvida baseado na realidade brasileira e com exemplos aqui obtidos.

Pode-se concluir que atualmente as inspeções, da maioria das pontes no Brasil, só são realizadas após a constatação de um problema grave e a deterioração predominante nas pontes visitadas é a corrosão, cuja principal causa é justamente a ausência de manutenções preventivas.

Na realidade, não é possível identificar a necessidade da recuperação ou reforço sem ter dados suficientes. As inspeções e como realizá-las, assim como a capacidade técnica dos engenheiros e técnicos responsáveis são os fatores que ditarão o sucesso ou o fracasso da recuperação de uma ponte.

"Recuperar" inicia-se com a coleta de informações sobre todos os aspectos inerentes à ponte sendo este processo relativamente complexo e com todos os dados correlacionados. Informações sobre o tipo de fundação, todo o sistema estrutural da ponte, o ano de fabricação, o tipo de aço, sua localização, o carregamento e até o fluxo do tráfego sobre a ponte. A decisão de recuperar e o respectivo projeto devem considerar todos estes aspectos, onde nunca pode ser descartada a hipótese da substituição.

Com estes dados procurou-se subdividir, até por facilidade de exposição, o tema recuperação ou reforço dos elementos estruturais isolados e da ponte como um todo.

As informações contidas no capítulo sobre a recuperação ou reforço de elementos estruturais permitem concluir que devem ser realizadas de tal maneira a não alterar de maneira significativa o centro de gravidade do perfil existente para não comprometer o comportamento das ligações ou concentrar

tensões em pontos não previstos.

A adição de chapas e perfis, respeitados os meios de ligação existentes, é a melhor forma de executar um reforço num elemento estrutural.

Por outro lado, o aumento do grau de hiperstaticidade constitui no melhor método de reforço de pontes onde a estrutura existente é incorporada ao novo sistema estrutural.

A simplicidade do reforço a executar é um fator importante não só pelos aspectos econômicos mas também para minimizar o tempo de execução e a interrupção do tráfego. Recomenda-se que sejam analisadas as possibilidades de continuidade de vigas, apoios intermediários através de vigas armadas ou pilares adicionais, protensão de elementos e a adição de estruturas complementares.

Enfatiza-se mais uma vez que as particularidades de cada ponte, o estado de deterioração e as condições locais de trabalho são quem definem a melhor solução que deve considerar os aspectos técnicos do projeto estrutural do reforço, sua viabilidade econômica e as possibilidades de execução.

A pouca ênfase dada ao cálculo e verificação estrutural têm como principal explicação o fato de que a maioria das pontes metálicas existentes no Brasil apresentam esquemas estáticos simples, onde é possível calculá-las utilizando métodos igualmente simples e a verificação da capacidade dos elementos também não apresenta maiores dificuldades.

A adoção de modelos de cálculo simples é também justificada pela análise dos problemas que envolvem estas pontes. As incertezas advindas do nível de comprometimento das seções por corrosão, a inexistência de um histórico preciso dos carregamentos que possibilite uma análise precisa da fadiga contribuem, em muito, para que o sistema de cálculo estático bem como as verificações da capacidade resistente sejam feitas até de maneira "conservadora".

Cabe salientar também que nos trabalhos pesquisados, observa-se este "conservadorismo" e somente em poucos casos constata-se uma análise utilizando modelos de cálculo

estático mais requintados, incorporando modelos numéricos tridimensionais e análises das redundâncias estruturais utilizando, por exemplo, programas de elementos finitos.

Alguns aspectos das provas de carga em pontes são abordados inicialmente através da descrição de equipamentos utilizados e a seguir alguns exemplos são relatados onde procurou-se apresentar as virtudes e problemas deste tipo de verificação estrutural.

Quanto as provas de carga é também possível apresentar um resumo das principais conclusões.

O planejamento dos equipamentos de medição, sua utilização e principalmente a análise dos resultados, exigem equipes devidamente qualificadas e treinadas para o êxito de uma prova de carga.

As medições de deslocamento, utilizando equipamentos com a sensibilidade adequada, permitem uma avaliação do comportamento global da estrutura e deve-se, portanto, instrumentar o maior número possível de pontos. A utilização de relógios comparadores é sempre recomendável pela sua confiabilidade, sensibilidade e facilidade de operação no campo.

A instrumentação destinada a medir deformações nos elementos estruturais exige que vários aspectos estejam devidamente equacionados, entre estes pode-se citar: uma adequação dos equipamentos de medição às condições locais, a sensibilidade adequada as medições esperadas e o controle dos problemas decorrentes dos efeitos parasitas, como por exemplo a variação da temperatura ou concentrações de tensão devido aos detalhes de ligação ou da deterioração localizada.

Com estes cuidados e com um número de pontos instrumentados por seção devidamente condizentes com o perfil e o tipo de solicitação a que está submetido, é possível obter resultados das deformações e avaliação pontual das tensões representativa da seção instrumentada.

Os extensômetros elétricos de resistência são os instrumentos recomendáveis para as medições de deformação em pontes metálicas, tendo em vista a sensibilidade adequada as

medições normalmente obtidas, a facilidade de operação e a confiabilidade nos resultados.

Os resultados obtidos na instrumentação das vigas principais e transversinas da ponte ferroviária da RFFSA permitem concluir que a utilização de três extensômetros elétricos uniaxiais nas mesas possibilitam uma boa avaliação das deformações, possibilitando adotar a média das leituras como a deformação representativa da mesa, passível de ser comparada aos valores calculados teoricamente.

Os resultados obtidos nas deformações dos extensômetros que compõem a roseta indicam que a avaliação das tensões de cisalhamento e das direções principais são satisfatórios.

Cabe salientar que a análise dos resultados das deformações permitirá ao calculista obter informações importantes sobre o caminhamento das deformações numa estrutura e também avaliar o estado de tensão de pontos localizados.

As conclusões que se permite obter em uma prova de carga devidamente instrumentada e bem conduzida são: uma boa identificação do caminhamento das cargas, a eliminação de possíveis dúvidas sobre esta distribuição e do comportamento global da própria estrutura e a análise localizada de deformações. Estes resultados, na maioria das vezes, extrapolam a própria análise particular de uma ponte, servindo de subsídio para a recuperação e reforço de outras pontes com tipologia e problemas semelhantes.

A necessidade de melhor analisar o comportamento das vigas rebitadas e também alguns tipos de reforços, originaram o trabalho experimental aqui relatado.

As principais conclusões já foram apresentadas no término do referido capítulo, porém pode-se enfatizar que entre os pontos positivos desta experimentação estão: um melhor conhecimento do comportamento deste tipo de viga — os resultados das tensões estimadas a partir das medições de deformação utilizando extensômetros elétricos de resistência permitiram concluir que é um excelente sistema — e que as alterações das deformações não são significativas devido a presença dos rebites. Esta última conclusão não deve ser

estendida a todos os tipos de vigas rebitadas pois o comportamento do rebite altera-se quando a dimensão do fuste é maior que seis vezes o seu diâmetro, cabe portanto um trabalho que analise esta situação.

Entre os pontos negativos destaca-se a impossibilidade, devido ao sistema de reação do Laboratório de Estruturas, de carregar os modelos até a ruína o que possibilitaria obter informações bastante interessantes e o outro aspecto refere-se ao número reduzido de modelos ensaiados, decorrente das limitações de ordem econômica.

Pode-se concluir também que o número de extensômetros elétricos de resistência, três, utilizados nas mesas dos perfis é o ideal para os perfis convencionais sendo possível estabelecer o critério da deformação média para estimar a tensão resultante nas mesas.

Os resultados obtidos na experimentação foram extremamente interessantes quer pelas conclusões obtidas, quer pela própria experiência em realizá-los.

O tratamento amplo e relativamente abrangente dado ao tema neste trabalho permite concluir que é possível continuar as pesquisas abordando agora temas mais específicos.

Entre estes temas pode-se sugerir um trabalho voltado a sistematização do cadastramento e inspeção de pontes com um trabalho de campo que permita elaborar e testar planilhas de inspeção realmente adaptadas a realidade brasileira e também o desenvolvimento de um programa de computador que sistematize os dados coletados, associando-os ao cálculo estático da ponte com possibilidades de carregamento com vários trens tipos.

Um outro tema que envolve trabalhos de campo poderia ser um programa amplo de provas de carga em pontes, com vários sistemas estruturais, com o objetivo de não só obter os resultados destas, como também adotar uma sistemática para a realização de provas de carga. Este projeto, devidamente apoiado por algum órgão responsável pela operação de pontes, proporcionaria um excelente material de apoio para as futuras recuperações ou reforços de pontes.

Utilizando ainda os ensaios em laboratório seria possível também desenvolver um trabalho que analisaria elementos estruturais retirados de pontes existentes, os quais seriam então submetidos a ensaios dinâmicos, onde poder-se-ia estabelecer os limites da vida útil à fadiga o que colaboraria não só para o planejamento de recuperações de pontes com um tráfego semelhante a daquela cujo elemento foi ensaiado, como também um melhor conhecimento deste fenômeno.

Pode-se dar continuidade aos trabalhos experimentais de vigas rebitadas com novos tipos de reforço, análises no estado limite último ou variando as dimensões das chapas, perfis e dos rebites.

Concluindo estas propostas de novas pesquisas seria interessante um trabalho que envolvesse um estudo detalhado de ligações rebitadas com trabalhos experimentais das ligações mais comuns em pontes no estado limite último e também uma análise destas ligações à fadiga.



## BIBLIOGRAFIA<sup>1</sup>

AASHTO. Standard specifications for highway bridges: with 1977-1981 Interim specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials. [I]

ALBRECHT, P., NAEEMI, A.H. Performance of weathering steel in bridges. National Cooperative Highway Research Program, Report 272, TRB, Washington, July 1984. 164p. [C]

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings. Chicago: AISC, 1986. 219p. [I]

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING ASSOCIATION. Steel structures -Chapter 15. In:\_\_\_\_\_. Manual for railway engineering. AREA, 1990. [I]

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING ASSOCIATION: Proceedings of the 46th Annual Convention, March 18-20, 1947. Chicago: AREA, 1947. v.48 [R]

---

<sup>1</sup>Todas as referências bibliográficas citadas foram consultadas e classificadas segundo três recomendações, em função de sua importância para os vários aspectos abordados neste trabalho.

[I] Leitura Importante  
[R] Leitura Recomendável  
[C] Leitura Complementar

- AMERICAN RAILWAY ENGINEERING ASSOCIATION: Proceedings of the 47th Annual Convention, March 16-18, 1948. Chicago: AREA, 1948. v.49 [R]
- AMERICAN RAILWAY ENGINEERING ASSOCIATION: Proceedings of the 49th Annual Convention, March 14-16, 1950. Chicago: AREA, 1950. v.51 [R]
- AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE OF WAY ASSOCIATION: Proceedings of the 6th Annual Convention, March 21-23, 1905. Chicago: AREA, 1905. v.6 [I]
- AMERICAN WELDING SOCIETY. Specifications for welded highway and railway bridges. 7th. ed. New York: AWS, 1966. (AWS D2.0-66) [I]
- ANAND, S.C., TALESSTCHI, A. Prestressed composite steel beam design. Journal of Structural Division, ASCE, v.99, p.301-319, March 1973. [C]
- ARMSTRONG, W.L. Dynamic testing of curved bridge-Huyck Stream. Journal of Structural Division, ASCE, v.98, n.9, p.2015-2030, Sept. 1972. [R]
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7189/85: Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 3p. [I]
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-8800/86: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 200p. [I]
- ASSOCIAÇÃO SUIÇA DE ENGENHEIROS E ARQUITETOS. Inspeções periódicas de pontes: referência ao art.34 da norma S.I.A. 160 (1970). Zurique: SIA, 1975. (SNV 505 160/3) [C]
- AVENT, R.R. Heat-straightening of steel: fact and fable. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.115, n.11, p.2773-93, Nov. 1989. [R]

- AYYUB, B.M., IBRAHIM, A. Posttensioned trusses: reliability and redundancy. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.116, n.6, p.1507-1521, June, 1990. [I]
- AYYUB, B.M., IBRAHIM, A., SCHELLING, D. Posttensioned trusses: analysis and design. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.116, n.6, p.1491-1506, June, 1990.[I]
- BAKHT, B., JAEGER, L.G. Bridge analysis simplified. New York: McGraw-Hill, 1985. 294p. [R]
- BAKHT, B., JAEGER, L.G. Bridge evaluation for multipresence of vehicles. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.116, n.3, p.603-618, March, 1990. [R]
- BAKHT, B., JAEGER, L.G. Bridge testing: a surprise every time. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.116, n.5, p.1370-1383, May, 1990. [I]
- BALLIO, G., CALADO, L. Steel bent sections under cyclic loads experimental and numerical approaches. Costruzioni Metalliche, n.1, p.1-23, 1986. [I]
- BALLIO, G., MAZZOLANI, F.M. Strutture in acciaio. Milano: Ed. Ulrico Hoepli, 1988. 779p. [I]
- BAUDA, P. Réparation du pont Caulaincourt. Travaux, n.620, p.34-37, avril, 1987. [R]
- BAUDA, P., REBRION, P. Réparation du pont de la rue de Tolbiac. Travaux, n.620, p.28-33, avril, 1987. [R]
- BEAUCHAMP, J.C., CHAN, M.Y.T., PION, R.H. Repair and evaluation of a damaged truss bridge - Lewes, Yukon River. Canadian Journal of Civil Engineering, v.11, n.3, p.494-504, Sept. 1984. [R]

- BELENYA, E. Prestressed load-bearing metal structures.  
Translated from the russian by I.V.Savin. Moscow: Mir  
Publ., 1977. 463p. [I]
- BELENYA, E.I., GOROVSKII, D.M. The analysis of steel beams  
strengthened by a tie rod. I.C.E. Monthly, v.2, n.9,  
p.412-419, 1971/72. [I]
- BELLEI, I.H. Evolução histórica da construção de pontes em  
estruturas metálicas. Volta Redonda: FEM Fabr. de  
Estruturas Metálicas, [1988]. [C]
- BELLEI, I.H. Obras de arte urbanas: evolução histórica do  
projeto de pontes. In: ENCONTRO ABCEM PONTES METÁLICAS,  
2., Guarujá, SP, 15-17 out. 1978. Anais. p.1c-4c [C]
- BERGER, R.H., GORDON, S. Extending the service life of  
existing bridges. Transportation Research Record, n.664,  
p.47-55, 1978. (Bridge Engineering, v.1) [I]
- BERRIDGE, P.S.A., LEE, D.H. Prestressing restores weakened  
truss bridge. Civil Engineering, ASCE, v.26, n.9,  
p.48-49, Sept. 1956. [C]
- BISKUP, J.T. Welding inspection. In: INTERNATIONAL  
CONFERENCE ON PLANNING AND DESIGN OF TALL BUILDINGS,  
Lehigh University, Bethelhem, August 21-26, 1972.  
Proceedings. New York: ASCE, 1972. v.1B, p.851-865 [C]
- BOWERS, D.G. Loading history of span 10 on yellow millpond  
viaduct. Highway Research Record, n.428, p.64-71, 1973. [C]
- BRÜHWILER, E., SMITH, I.F.C., HIRT, M.A. Fatigue and  
fracture of riveted bridge members. Journal of Structural  
Engineering, ASCE, v.116, n.1, p.198-214, Jan. 1990. [I]

- BRUNGRABER, R.J., KIM, J.B. Rehabilitation of steel truss bridges using a superimposed arch system. Transportation Research Record, n.950, p.146-149, 1984. (Second Bridge Engineering Conference, Minneapolis, v.1) [I]
- BRYLA, S. Essais sur assemblages rivés, renforcés par soudure. Mémoires/Publications, v.1, p.9-18, 1932. [I]
- BUFFARA. V.A. Pontes metálicas ferroviárias. In: ENCONTRO ABCEM PONTES METÁLICAS, 2., Guarujá, SP, 15-17 out. 1978. Anais. p.1b-36b [R]
- BURDETTE, E.G., GOODPASTURE, D.W. Comparison of measured and computed ultimate strengths of four highway bridges. Highway Research Record, n.382, p.38-49, 1972. [I]
- BURDETTE, E.G., GOODPASTURE, D.W. Correlation of bridge load capacity estimates with test data. National Cooperative Highway Research Program, Report 306, TRB, Washington, June 1988. 75p. [I]
- BURDETTE, E.G., GOODPASTURE, D.W., DOYLE, S.K. Comparison of measured and computed load-deflection behavior of two highway bridges. Transportation Research Record, n.507, p.17-25, 1974. [I]
- BYERS, W.G. Impact from railway loading on steel girder spans. Journal of the Structural Division, ASCE, v.96, n.6, p.1093-1103, June 1970. [R]
- CANTRELL, A.H. Some major problems in railway civil engineering maintenance. Railway Engineering Division Meeting, n.47, p.106-144, Nov. 1952. [C]
- CARAMELLI, S. et alii. Analisi di traffico e indagini sperimentali a fatica dei ponti in acciaio. Costruzioni Metalliche, n.2, p.101-126, 1986. [C]

- CAUVIN, A., SOTTOTETTI, S. Strutture in acciaio presollecitate: esempio di applicazione al rinforzo di un ponte. Le Strade, v.86, n.1212, p.69-75, 1984. [I]
- CHAMBERLIN, W.P. Historic bridges: criteria for decision making. National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 101, TRB, Washington, October 1983. 77p. [C]
- CHANDLER, K.A., BAYLISS, D.A. Corrosion protection of steel structures. London: Elsevier, 1985. 411p. [R]
- CHOLOUS, J. La précontrainte dans le renforcement des ponts métalliques de la S.N.C.F. In: CONGRÉS DE LA ASSOCIATION INTERNATIONALE DES PONTS ET CHARPENTES, 7., Rio de Janeiro, 1964. Annales. Zurich: Verlag, 1964. v.1 [R]
- CICCI, F., CSAGOLY, P. Assessment of fatigue life of a steel girder bridge in service. Transportation Research Record, n.507, p.26-44, 1974. [R]
- COSABOOM, B., KOZLOV, G.S., ZOCCOLA, J. Atmospheric corrosion tests of unpainted steels for use in construction of highway bridges. Highway Research Record, n.287, p.32-45, 1969. [C]
- COSTA, O.M. Estudo do reforço das pontes da Rede de Viação Paraná-Santa Catarina. Curitiba: Paranaense, 1937. 40p.[I]
- COSTA, O.M. Vigas armadas. Rio de Janeiro: IBGE, 1942. 220p. [I]
- CSAGOLY, P.F., BAKHT, B. Lateral buckling of pony truss bridges. Transportation Research Record, n.607, p.14-18, 1976. (Bridge Design, Testing and Evaluation) [R]

CSAGOLY, P.F., JAEGER, L.G. Multi-load-path structures for highway bridges. Transportation Research Record, n.711, p.34-39, 1979. [I]

DALLY, J.W., RILEY, W.F. Experimental stress analysis. 2.ed. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 1978. 571p. [C]

DANIELS, J.H., KIM, W., WILSON, J.L. Recommended guidelines for redundancy design and rating of two-girder steel bridges. National Cooperative Highway Research Program, Report 319, TRB, Washington, Oct. 1989. 142p. [I]

DAVEY, N. Research on the strenght of bridges: testing of highway bridges. Mémoires/Publications, v.9, p.35-44, 1949. [R]

DESNOYERS, C. Cours de construction des ponts. Paris: V.Ch. Dunod, 1885. 2v. [C]

DI VIETRO, P. Monitoring a bridge's pulse. Civil Engineering, ASCE, v.56, n.3, p.54-55, Mar. 1986. [C]

FAZIO, R.N., FAZIO, A.E. Rivet replacement criteria. Transportation Research Record, n.950, p.176-182, 1984. (Second Bridge Engineering Conference, Minneapolis, Sept. 1984, v.1) [I]

FERJENCIK, P., TOCHACEK, M. Progetto di strutture metalliche presollecitate. Costruzioni Metalliche, v.18, n.1, p.7-22, gen.-feb. 1966. [I]

FILIZOLA, J.C. Recuperação de pontes de aço. São Carlos, 1989. Notas de aula da disciplina "Tópicos Especiais de Estruturas Metálicas". 92p. [I]

- FISHER, J.W. et alii. Detection and repair of fatigue damage in welded highway bridges. National Cooperative Highway Research Program, Report 206, TRB, Washington, June 1979. 85p. [I]
- FISHER, J.W. et alii. Fatigue and fracture evaluation for rating riveted bridges. National Cooperative Highway Research Program, Report 302, TRB, Washington, Dec. 1987. 86p. [I]
- FISHER, J.W. et alii. Retrofitting fatigue damaged bridges. Transportation Research Record, n.664, p.102-109, 1978. (Bridge Engineering, v.1) [I]
- FISHER, J.W., KEATING, P.B. Distortion-induced fatigue cracking of bridge details with web gaps. J. Construct. Steel Research, v.12, p.215-228, 1989. [I]
- FISHER, J.W., YEN, B.T., WANG, D. Fatigue strength of riveted bridge members. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.116, n.11, p.2968-2981, Nov. 1990. [I]
- GENTIL, V. Corrosão. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 453p. [R]
- GONÇALVES, R.M. et alii. Inspeção em ponte de estrutura metálica destinada ao suporte de tubulações de derivados de petróleo da Petrobrás. São Carlos: EESC, 1987. (Relatório de prestação de serviços) [C]
- GONÇALVES, R.M., SALES, J.J., NIMIR, W.A. Alguns aspectos da deterioração e inspeção de pontes metálicas. In: SEMINÁRIO USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO, 4., São Paulo, jun. 1989. Anais. São Paulo: EPUSP/PCC, 1989. p.199-211. [R]
- GOODEARL, K.A. La reconstruction du pont de Grosvenor, (Londres). Acier-Stahl-Steel, v.31, n.9, p.385-392, sept. 1966. [C]



- GOURLET, J., BRIGAUD, C. La réparation de deux ponts métalliques à Paris: surveillance-entretien des ouvrages d'art à Paris. Travaux, n.620, p.27, avril, 1987. [R]
- GOURMELON, J.P., ROBERT, J.L. Méthodologie d'auscultation et de surveillance des câbles de ponts suspendus. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n.139, p.85-91, sept.-oct. 1985. [I]
- GRADE de aço pode viabilizar recuperação de ponte. Construção Hoje, p.39, 31 ago. 1989. [C]
- GREGORY, E.N., SLATER, G., WOODLEY, C.C. Welded repair of cracks in steel bridge members. National Cooperative Highway Research Program, Report 321, TRB, Washington, October 1989. 46p. [I]
- GROUNI, H.N., NOWAK, A.S. Calibration of the Ontario bridge design code 1983 edition. Canadian Journal of Civil Engineering, v.11, n.4, p.760-770, 1984. [I]
- HARDING, J.E., PARKE, G.A.R., RYALL, M.J. (eds.) Bridge management: inspection, maintenance, assessment and repair. London: Elsevier Applied Science, 1990. 797p. [I]
- HARRISON, H.L. Straightening structural members in place. The Welding Journal, Research Supplement, v.31, n.5, p.257s-262s, May, 1952. [C]
- HEINS. C.P., FOUT, W.S., WILKINSON, R.Y. Replacement or repair of old truss bridges. Transportation Research Record, n.607, p.63-65, 1976. (Bridge Design, Testing and Evaluation) [I]
- HEINS JR., C.P., GALAMBOS, C.F. Highway bridge field tests in the United States, 1948-70. Public Roads, v.36, n.12, p.271-291, Feb. 1972. [I]

- HENRY, C.P. et alii. Northampton street bridge. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.110, n.7, p.1644-1664, July, 1984. [R]
- HICKS, J.G. Inspection and non-destructive testing. In: \_\_\_\_\_ . Welded joint design. 2nd.ed. Oxford: Blackwell Scientific, 1987. Chapter 12, p.81-83 [C]
- HIRT, M.A. Fatigue considerations for the design of railroad bridges. Transportation Research Record, n.664, p.86-92, 1978. (Bridge Engineering, v.1) [I]
- HOPWOOD, T., HAVENS, J.H. Acoustic emission and fatigue characteristics of typical bridge steels. Transportation Research Record, n.664, p.129-135, 1978. (Bridge Engineering, v.1) [R]
- HSIONG, W. Repair of Poplar Street Complex Bridges in East St. Louis. Transportation Research Record, n.664, p.110-119, 1978. (Bridge Engineering, v.1) [R]
- ISTRUZIONI per la progettazione di strutture in acciaio presollecitate. Norma cecoslovacca ON 73 1405. Traduzione di Jiri Horejsi. Costruzioni Metalliche, v.28, n.4, p.210-223 ; n.5, p.272-288, 1976. [I]
- JAEGER, L.G., BAKHT, B. Bridge analysis by microcomputer. New York: McGraw- Hill, 1989. 330p. [R]
- JANNEY, J.R. Guide to investigation of structural failures: with editorial revisions incorporated. New York: ASCE, 1986. 75p. [I]
- JIMENEZ, R.C., GONZALEZ, C.L. Remplacement de quatre ponts métalliques sur la ligne de chemin de fer Lerida-Reus (Espagne). Acier-Stahl-Steel, n.11, p.446-452, 1973. [R]

- JOHNSON, S.M. Deterioration, maintenance, and repair of structures. Huntington, NY: Robert E. Krieger Publ., 1981. 373p. [I]
- JOUVIE, F. Les ponts métalliques à la SNCF: le patrimoine, les réparations, la reconstruction et la construction. Travaux, n.613, p.59-68, sept. 1986. [I]
- JOWAY, H.F. Usages particuliers de l'acier pour la restauration d'edifices anciens. Acier-Stahl-Steel, v.31, n.9, p.369-372, sept. 1966. [C]
- KEATING, P.B., FISHER, J.W. Evaluation of fatigue tests and design criteria on welded details. National Cooperative Highway Research Program, Report 286, TRB, Washington, 1986. 66p. [R]
- KELLER, R.L. Bridge rehabilitation project on Montana Rail Link. American Railway Engineering Association, Bulletin, v.92, n.731, p.167-173, May, 1991. [R]
- KELLERMANN, J.L. Building height tripled: by new thinking plus new steel. Civil Engineering, ASCE, v.33, n.3, p.31-33, Mar. 1963. [C]
- KIM, J.B., BRUNGRABER, R.J., YADLOSKY, J.M. Truss bridge rehabilitation using steel arches. Journal of Strutural Engineering, ASCE, v.110, n.7, p.1589-1597, July 1984. [I]
- KING, J.D., POWELL, H.R. Redesign modernizes old bridge. Civil Enginerring, ASCE, v.40, n.11, p.37-9, Nov. 1970.[I]
- KING, J.P.C., CSAGOLY, P.F., FISHER, J.W. Field testing of Aguasabon river bridge in Otario. Transportation Research Record, n.579, p.48-60, 1976. (Earthquake-induced dynamic response of bridges and bridge measurements) [I]

- KIRBY, R.S. et alii. Engineering in history. New York: McGraw-Hill, 1956. 530p. [C]
- KLAIBER, F.W. et alii. Methods of strengthening existing highway bridges. National Cooperative Highway Research Program, Report 293, TRB, Washington, Sept. 1987. 114p.[I]
- KOSTEM, C.N. Overloading of steel multigirder bridges. Transportation Research Record, n.950, p.84-88, 1984. (2nd. Bridge Engineering Conference, Minneapolis, v.1) [I]
- KULAK, G.L., FISHER, J.W., STRUIK, J.H.A. Guide to design criteria for bolted and riveted joints. 2nd.ed. New York: John Wiley & Sons, 1987. 333p. [I]
- LABAUNE, J. Élargissement et consolidation du Pont-Neuf sur la Vienne à Limoges. Construction, Paris, v.24, n.3, p.100-108, mars, 1969. [C]
- LAFUENTE, R. Mesure de la tension dans les câbles: application au réglage des ponts suspendus. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n.125, p.31-36, mai-juin, 1983. [I]
- LEFTWICH, S.D., BARTON, F.W. Stress analysis of haunch region in a rigid-frame bridge. Transportation Research Record, n.676, p.19-26, 1978. (Bridge Design, Evaluation and Repair) [R]
- LICHTENSTEIN, A.G. Historic bridges: conflict ahead. Civil Engineering, ASCE, v.57, n.5, p.64-66, May, 1987. [C]
- LOGEAIS, L. Cas du bâtiment: les structures métalliques. Annales de l'Institute Technique du Batiment et des Travaux Publics, n.411, p.22-25, jan. 1983. [C]

- LOWSON, W.W. The reconstruction of the Craigellachie bridge. The Structural Engineer, v.45, n.1, p.23-28, Jan.1967. [R]
- MACKEY, S., WILLIAMSON, N.W. Experimental investigation of 33 ft. span lattice girder. Mémoires/Publications, v.11, p.303-324, 1951. [I]
- MAEDA, Y. Fatigue cracks of deep thin-walled plate girders. Transportation Research Record, n.664, p.120-128, 1978. (Bridge Engineering, v.1) [R]
- MANKO, Z. Investigations of predeformed steel railway spans with main girders having inclined webs. J. Construct. Steel Research, v.6, p.199-218, 1986. [I]
- MANNING, D.G. Detecting defects and deterioration in highway structures. National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 118, TRB, Washington, July 1985. 50p. [I]
- MARTINELLI, D.A.O. Contribuição ao emprego de extensômetros elétricos de resistência no estudo de estruturas. São Carlos, 1961. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos-USP. [I]
- MATHIVAT, J., KIRSCHNER, P. Un nouveau procédé pour la réalisation d'ouvrages enterrés: le procédé "Matière". Travaux, n.620, p.46-49, avril, 1987. [C]
- MATSUMOTO, T., MOTOMURA, S. Test of welding technique for repair of steel highway bridges. Transportation Research Record, n.950, p.157-163, 1984. (Second Bridge Engineering Conference, Minneapolis, v.1) [I]
- MCKEEL JR., W.T., KINNIER, H.L. Dynamics stress study of composite-span bridge with conventional and elastomeric bearings. Highway Research Record, n.354, p.13-26, 1971. [R]

- MILLER, D.O., BECKMAN, R.D. Renovation of the Third Avenue bridge in Minneapolis. Transportation Research Record, n.950, p.150-156, 1984. (Second Bridge Engineering Conference, Minneapolis, v.1) [C]
- MITCHELL, G.R. Research on the strenght of bridges: problems of impact and fatigue and their effect on permissible stresses in cast iron girder bridges. Mémoires/Publications, v.9, p.61-68, 1949. [C]
- MOHN, D.E. Golden Gate bridge: they worked by night. Modern Steel Construction, v.26, n.1, p.11-14, 1986. [C]
- MOHN, D.E. Golden Gate bridge improvements. Civil Engineering, ASCE, v.57, n.5, p.50-51, May, 1987. [C]
- MORTESEN, M. Vorgespannte Stahlkonstruktionen. In: HANDBUCH für den Stahlbau Band III - Konstruktionen. Berlin (DDR): VEB, s.d. p.259-350. [C]
- MUKHANOV, K. Estructuras metálicas. Trad. de K.Asryantz. Moscou: Mir Ed., 1980. 519p. (Original russo) [C]
- NAGARAJA RAO, N.R., TALL, L. Columns reinforced under load. The Welding Journal, Research Supplement, v.42, n.4, p.177s-185s, Apr. 1963. [C]
- NOWAK, A.S., THARMABALA, T. Bridge reliability evaluation using load tests. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.114, n.10, p.2268-2279, Oct. 1988. [I]
- OKADA, K., OKAMURA, H., SONODA, K. Fatigue failure mechanism of reinforced concrete bridge deck slabs. Transportation Research Record, n.664, p.136-144, 1978. (Bridge Engineering, v.1) [C]
- OUVRAGES métalliques: ouvrages mixtes acier-béton. Travaux, n.620, p.38-45, avril, 1987. [R]

- PENSE, A.W. Nondestructive methods of fatigue crack detection in steel bridge members. National Cooperative Highway Research Program, Research Results Digest 66, TRB, Washington, p.1-14, Jan. 1975. [I]
- PERSY, J.P. Réparation et renforcement par soudure d'ouvrages d'art en fer puddlé. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n.130, p.37-50, mar.-avr. 1984. [I]
- PFEIL, W. Manual de inspeção de pontes rodoviárias. Rio de Janeiro: DNER - Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1980. 139p. [R]
- POINEAU, D. Cas des ponts en béton et ponts métalliques. Annales de l'Institute Technique du Batiment et des Travaux Publics, n.411, p.26-47, Jan. 1983. [C]
- PROTENDIDOS DYWIDAG. Sistemas de protensão DYWIDAG: cabos de protensão de uma só barra. São Paulo, s.d. (catálogo técnico) [C]
- RABBAT, B.G., HANSON, N.W. Fatigue tests of bolted connections designed by shear-friction. Transportation Research Record, n.664, p.145-152, 1978. (Bridge Engineering, v.1) [R]
- RAVINDRA, M.K., GALAMBOS, T.V. Load and resistance factor design for steel. Journal of the Structural Division, ASCE, v.104, n.9, p.1337-1353, Sept. 1978. [I]
- REBUILDING a bridge piece by piece: Grosvenor bridge. Engineering, London, v.203, n.5280, p.1063-1066, 30 June 1967. [C]
- REBUILDING Telford's Craigellachie Bridge. Civil Engineering, London, v.60, n.708, p.1059-1060, 1965. [R]

- REEMSNYDER, H.S. Fatigue life extension of riveted connections. Journal of the Structural Division, ASCE, v.101, n.12, p.2591-2608, Dec. 1975. [I]
- RISSEL, M.C. et alii. Assessment of deficiencies and preservation of bridge substructures below the waterline. National Cooperative Highway Research Program, Report 251, TRB, Washington, p.1-43, Oct. 1982. [C]
- SANDERS JR., W.W. et alii. Ultimate load test of truss bridge floor system. Journal of the Structural Division, ASCE, v.102, n.7, p.1383-1398, July, 1976. [I]
- SCHELLING, D.R., FU, C.C. Comparison of bridge rating methods. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.110, n.7, p.1447-1467, July, 1984. [I]
- SCHULTE, H. Pontes metálicas. São Paulo: Instituto Mackenzie, s.d. [I]
- SCHULTE, H., YAGUI, T. Estruturas de aço: elementos básicos. São Carlos: EESC-USP, 1981. 347p. [I]
- SCHWENDEMAN, L.P., HEDGREN JR., A.W. Bolted repair of fractured I-79 girder. Journal of The Structural Division, ASCE, v.104, n.10, p.1657-1670, Oct. 1978. [I]
- SEIM, C. Building over the Golden Gate. Civil Engineering, ASCE, v.57, n.5, p.46-49, May, 1987. [C]
- SHANAFELT, G.O., HORN, W.B. Guidelines for evaluation and repair of damaged steel bridge members. National Cooperative Highway Research Program, Report 271, TRB, Washington, June 1984. 64p. [I]
- SHIPWAY, J.S. Tay rail bridge centenary: some notes on its construction 1882-87. Proc. Instn Civ. Engrs., Part 1, v.86, p.1089-1109, Dec. 1989. [C]



- SHIROLE, A.M., HILL, J.J. Systems approach to bridge structure rehabilitation or replacement decision-making. Transportation Research Record, n.664, p.22-31, 1978. (Bridge Engineering, v.1) [R]
- SIMON, J.E. et alii. Réparation du pont suspendu d'Elbeuf (Seine-Maritime). Travaux, p.42-49, mai, 1990. [R]
- SMITH, I.F.C., HIRT, M.A. Fatigue-resistant steel bridges. J. Construct. Steel Research, v.12, p.197-214, 1989. [I]
- SOTO, M.H. Some considerations in widening and rehabilitation of bridges. Transportation Research Record, n.664, p.56-63, 1978. (Bridge Engineering, v.1)[R]
- SPINNER, B.H. Eads bridge repaired by jacking. Civil Engineering, ASCE, v.41, n.6, p.50-52, June 1971. [R]
- SPRARAGEN, W., GRAPNEL, S.L. Reinforcing structures under load: a review the literature until January 1, 1943. The Welding Journal, Research Supplement, v.23, n.2, p.65s-92s, Feb. 1944. [I]
- STEINMAN, D.B. Famous bridges of the world. New York: Dover Publ., 1961. 99p. [C]
- STERIAN, D. L'introduction des efforts initiaux artificiels dans les tabliers des ponts métalliques. Acier-Stahl-Steel, v.34, n.1, p.26-32, 48, jan. 1969. [I]
- STEVENS, D.E. A new steel backbone for an old concrete bridge. Civil Engineering, ASCE, v.29, n.7, p.54-56, July, 1959. [C]
- SÜSSEKIND, J.C. Curso de análise estrutural. Porto Alegre: Ed. Globo; São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1976. v.2, 291p. [C]

- SWEENEY, R.A.P. Importance of redundancy in bridge-fracture control. Transportation Research Record, n.711, p.23-30, 1979. [I]
- SWEENEY, R.A.P. Some examples of detection and repair of fatigue damage in railway bridge members. Transportation Research Record, n.676, p.8-14, 1978. (Bridge Design, Evaluation and Repair) [I]
- TAKEYA, T. Introdução à análise experimental de estruturas. São Carlos: EESC, Depto. de Estruturas, 1988. 27p. [I]
- TASK COMMITTEE ON STRENGTH OF OLD TRUSS BRIDGES. Repair and strengthening of old steel truss bridges. New York: ASCE, 1979. 137p. [I]
- TAYLOR, P.R. Renovation of Lions Gate Bridge North Viaduct. Transportation Research Record, n.664, p.77-79, 1978. (Bridge Engineering, v.1) [C]
- THOMAS, F.G. Research on the strenght of bridges: investigation on bridge deck systems. Mémoires/Publications, v.9, p.45-61, 1949. [C]
- TROITSKY, M.S. Prestressed steel bridges: theory and design. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 386p. [I]
- TROVILLET, P., SCHWARTZ, J., JOLLIOT, R. Profiles métalliques anciens: données sur la géométrie. Bulletin de Liaison de Laboratoires des Ponts et Chaussées, n.157, p.3-8, sept.-oct. 1988. [R]
- UPSTONE, T.J., REILY, D. Construction of the navigation spans of the Rio Niterói Bridge, Brazil. Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1, v.66, p.227-246, May, 1979. [C]
- VAIDYANATHAN, H., CHEUNG, M.S., BEAUCHAMP, J.C. Extension of life for Perley Bridge. Transportation Research Record, n.664, p.64-76, 1978. (Bridge Engineering, v.1)[R]

- VICTOR, R.F. Orthotropic bridge saves old covered bridge. Transportation Research Record, n.664, p.80-85, 1978. (Bridge Engineering, v.1) [R]
- VILLAS BOAS, J.M. A ponte levadiça, soldada, sobre o Guaíba: problemas de obtenção do aço e de fabricação. Trab.apres. ao 13. Congresso da Associação Brasileira de Metais, Volta Redonda, Jul, 1958. 17p. [I]
- WARRIER, G.P. Restoration of Hardinge Bridge in Bangladesh. Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1, v.62, p.399-418, Aug, 1977. [R]
- WEST, J.D. Some methods of extending the life of bridges by major repairs or strengthening. Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1, v.6, p.183-202. Feb. 1957. [I]
- WHITNEY, C.S. Bridges: a study in their art, science and evolution. New York: W.E. Rudge, 1929. 363p. [C]
- WITTFOHT, H. Puentes: ejemplos internacionales. Barcelona: Gustavo Gili, 1975. 320p. [C]
- WOODS, S.W. Rehabilitation of steel deck girder bridges. Transportation Research Record, n.950, p.188-192, 1984. (2nd. Bridge Engineering Conference, Minneapolis, v.1) [I]
- YAMADA, K., MIKI, C. Recent research on fatigue of bridge structures in Japan. J. Construct. Steel Research, v.13, p.211-222, 1989. [R]
- ZUCKERMAN, A.I. Stiffening the Manhattan Bridge. Transportation Research Record, n.676, p.14-19, 1978. (Bridge Design. Evaluation and Repair) [C]
- ZURASKI, P.D., JOHNSON, J.E. Fatigue strenght of deteriorated steel highway bridges. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.116, n.10, p.2671-2690, Oct. 1990.[I]

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ALGUNS ASPECTOS RELATIVOS À INSPEÇÃO E  
RECUPERAÇÃO DE PONTES DE AÇO  
— ÊNFASE EM PONTES FERROVIÁRIAS —

ANEXO I

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de "Doutor em Engenharia", área: Estruturas.

Eng. ROBERTO MARTINS GONÇALVES  
ORIENTADOR: PROF. DR. WALTER ABRAHÃO NIMIR

São Carlos, Maio de 1992

## ANEXO

Este Anexo tem como objetivo permitir ao leitor uma análise complementar dos resultados obtidos nos ensaios das vigas rebitadas, caso seja de seu interesse. A sinopse dos resultados, apresentada no Capítulo sete, é ilustrativa e resume as principais informações sobre os resultados dos ensaios.

Apresentam-se, primeiramente os resultados de corpos de prova, ensaiados à tração, dos aços e rebites utilizados nas vigas rebitadas. Apresenta-se também a caracterização micro-estrutural dos rebites, comparando-os com parafusos A-325.

A seguir, estão apresentados todos os resultados de deslocamentos e deformações, medidas nos vários ensaios das vigas modelos 1 a 4.

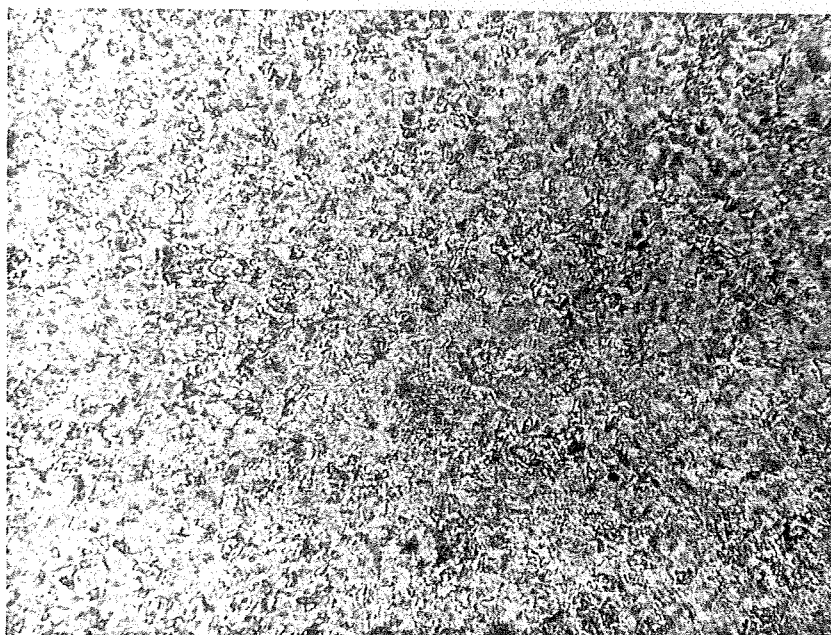
Os pontos instrumentados de cada modelo, deslocamentos e deformações, estão ilustrados no início de cada série das vigas, seguidos das Tabelas e Gráficos com os valores obtidos nos ensaios.

Resultados dos Corpos de Prova dos Aços

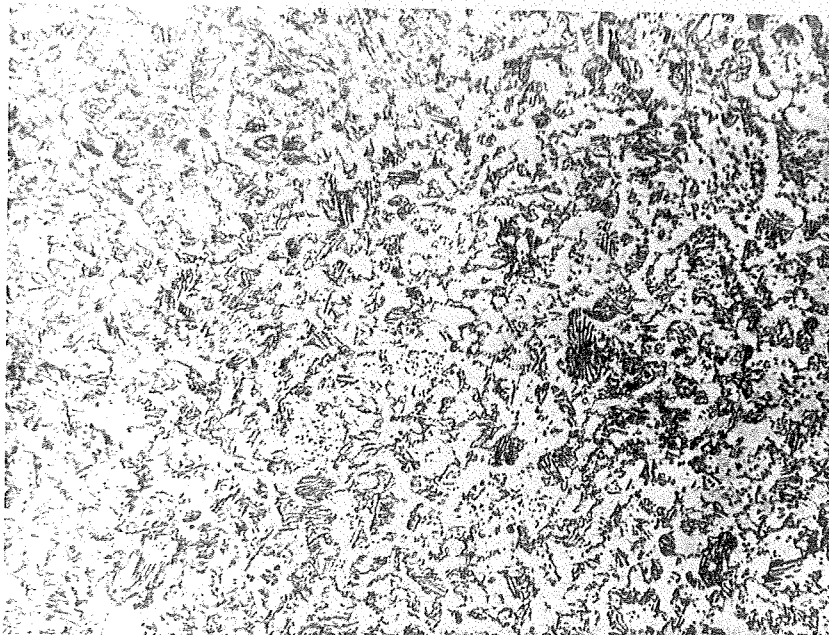
| DADOS SOBRE OS CORPOS DE PROVA   |             |                      |                      |                   |           |                |                |        |
|--|-------------|----------------------|----------------------|-------------------|-----------|----------------|----------------|--------|
| MATERIAL   | C.P.<br>NRO | $\phi_{ext}$<br>(mm) | $\phi_{int}$<br>(mm) | $L_{tot}$<br>(mm) | L<br>(mm) | $f_y$<br>(MPa) | $f_u$<br>(MPa) | A<br>% |
| Chapa de<br>e= 9.5mm<br>ASTM-A36<br>f =250MPa<br>f <sup>y</sup> =400MPa<br>f <sup>u</sup>        | 1           | 3.9                  | 2.2                  | 22.0              | 16.0      | 326            | 498            | 37.5   |
|  | 2           | 3.9                  | 2.2                  | 22.8              | 16.0      | 325            | 490            | 42.5   |
|  | 3           | 3.9                  | 2.2                  | 22.8              | 16.0      | 335            | 502            | 42.5   |
| Chapa de<br>e= 4.8mm<br>ASTM-A36<br>f =250MPa<br>f <sup>y</sup> =400MPa<br>f <sup>u</sup>        | 1           | 1.9                  | 1.08                 | 37.5              | 29.9      | 380            | 431            | 25.4   |
|  | 2           | 1.9                  | 1.10                 | 37.2              | 29.9      | 345            | 431            | 24.4   |
|  | 3           | 1.9                  | 1.08                 | 38.4              | 29.9      | 352            | 422            | 28.4   |
| Rebite<br>$\phi$ =12.5mm<br>SAE-1010<br>f =183MPa<br>f <sup>y</sup> =330MPa<br>f <sup>u</sup>    | 1           | 3.9                  | 2.1                  | 42.0              | 33.7      | 363            | 474            | 24.6   |
|  | 2           | 3.9                  | 2.1                  | 36.1              | 30.0      | 294            | 425            | 20.3   |
|  | 3           | 3.9                  | 2.3                  | 37.4              | 29.8      | 359            | 441            | 25.5   |
| Parafuso<br>$\phi$ =12.5mm<br>A-325<br>f =183MPa<br>f <sup>y</sup> =330MPa<br>f <sup>u</sup>     | 1           | 3.9                  | 2.6                  | 33.3              | 29.9      | 1009           | 1103           | 11.4   |
|  | 2           | 3.9                  | 2.8                  | 33.0              | 29.9      | 809            | 1013           | 10.4   |
|  | 3           | 3.9                  | 2.3                  | 33.0              | 30.0      | 792            | 984            | 10.0   |
| Bar. Red.<br>$\phi$ =16.0mm<br>SAE-1060<br>f =450MPa<br>f <sup>y</sup> =700MPa<br>f <sup>u</sup> | 1           | 3.9                  | 3.1                  | 18.1              | 16.0      | 874            | 931            | 13.1   |
|  | 2           | 3.9                  | 3.1                  | 18.0              | 16.0      | 833            | 916            | 12.5   |
|  | 3           | 3.9                  | 3.0                  | 18.5              | 16.0      | 849            | 935            | 15.6   |
| Bar. Red.<br>$\phi$ =20.0mm<br>SAE-1040<br>f =290MPa<br>f <sup>y</sup> =500MPa<br>f <sup>u</sup> | 1           | 3.9                  | 2.8                  | 21.0              | 16.0      | 457            | 743            | 31.3   |
|  | 2           | 3.9                  | 2.8                  | 21.1              | 16.0      | 453            | 735            | 31.9   |
|  | 3           | 3.9                  | 2.8                  | 21.0              | 16.0      | 457            | 737            | 31.3   |

Nas Fotos, apresentadas abaixo, encontram-se os resultados da metalografia de uma amostra retirada de um rebite e de um parafuso(A-325). Pode-se observar que a granulometria dos cristais são diferentes.

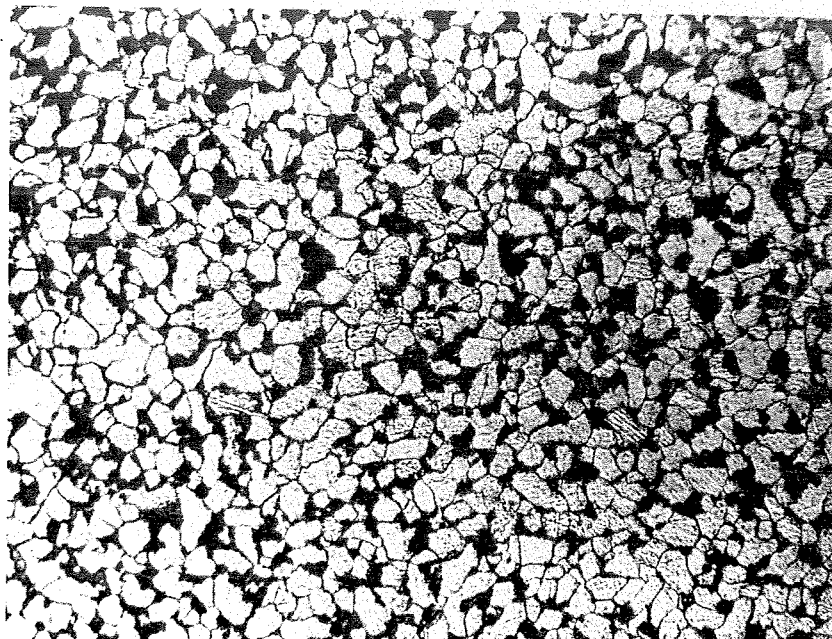
A análise micro-estrutural destes materiais foi realizada pelo Prof. Luis Marino, Departamento de Materiais da EESC-USP, que não constatou nenhuma anomalia nestes aços.



*Foto A-1 Micro-estrutura do rebite.  
Fator de ampliação igual a 160 vezes.*

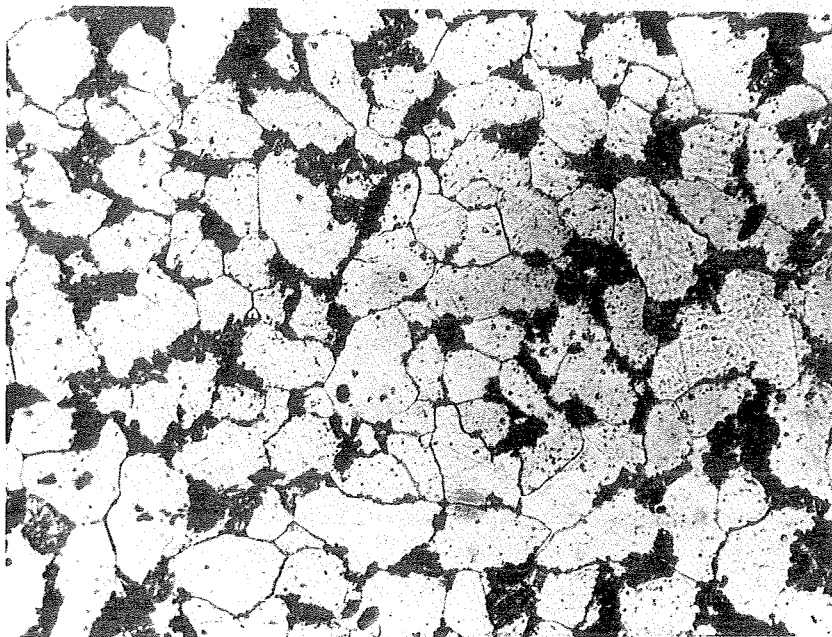


*Foto A-2 Micro-estrutura do rebite.  
Fator de ampliação igual a 400 vezes.*



*Foto A-3 Micro-estrutura do parafuso.  
Fator de ampliação igual a 160 vezes.*





*Foto A-4 Micro-estrutura do parafuso.  
Fator de ampliação igual a 400 vezes.*

## RESULTADOS DOS ENSAIOS

### TABELAS E GRÁFICOS

#### . VIGAS REBITADAS

DEFORMAÇÕES

DESLOCAMENTOS

## MODELO - VIGA I

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

- . ENSAIO 1
- . ENSAIO 2
- . ENSAIO 3

- DESLOCAMENTOS

- DEFORMAÇÕES

## MODELO - VIGA I

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### . ENSAIO 1

#### - DESLOCAMENTOS

#### .TABELAS

#### .GRÁFICOS

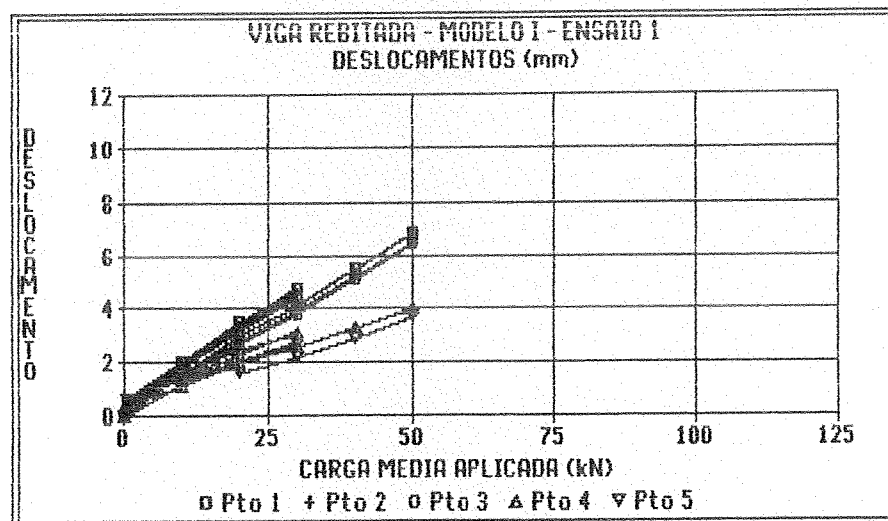
MODELO: VIGA REBITADA I

ENSAIO Nro: 1

DATA: 4 DE FEVEREIRO DE 1991

HORARIO: 10:30 Hs

| ETAPA | CARGA APL<br>MEDIA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS<br>(mm) |       |       |      |       |
|-------|----------------------------|-----------------------|-------|-------|------|-------|
|       |                            | Pto 1                 | Pto 2 | Pto 3 | Pto4 | Pto 5 |
|       | 0.00                       | 0.00                  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 0.00  |
| 1     | 9.95                       | 2.04                  | 1.97  | 1.83  | 1.61 | 1.24  |
| 2     | 19.95                      | 3.46                  | 3.35  | 3.19  | 2.46 | 2.06  |
| 3     | 30.00                      | 4.69                  | 4.50  | 4.38  | 3.07 | 2.70  |
| 4     | .50                        | .62                   | .64   | .64   | .53  | .57   |
| 5     | 10.10                      | 1.54                  | 1.48  | 1.38  | 1.14 | 1.79  |
| 6     | 20.05                      | 2.96                  | 2.81  | 2.71  | 1.96 | 1.59  |
| 7     | 30.00                      | 4.12                  | 3.90  | 3.81  | 2.56 | 2.17  |
| 8     | 39.90                      | 5.47                  | 5.16  | 5.06  | 3.26 | 2.87  |
| 9     | 50.00                      | 6.93                  | 6.54  | 6.47  | 4.04 | 3.66  |
| 10    | 59.95                      | 8.55                  | 8.06  | 8.02  | 4.94 | 4.61  |



MODELO - VIGA I

RESULTADOS DOS ENSAIOS

ENSAIO 1

- DEFORMAÇÕES

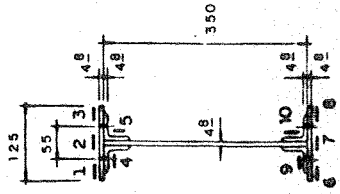
EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA

UNIAXIAIS

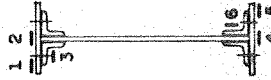
ROSETAS

**POSICIONAMENTO TÍPICO DOS EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS  
DE RESISTÊNCIA PARA TODOS OS MODELOS**

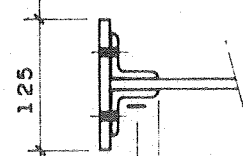
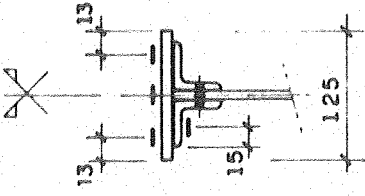
**Seções 1 e 2**



**Seção 3**



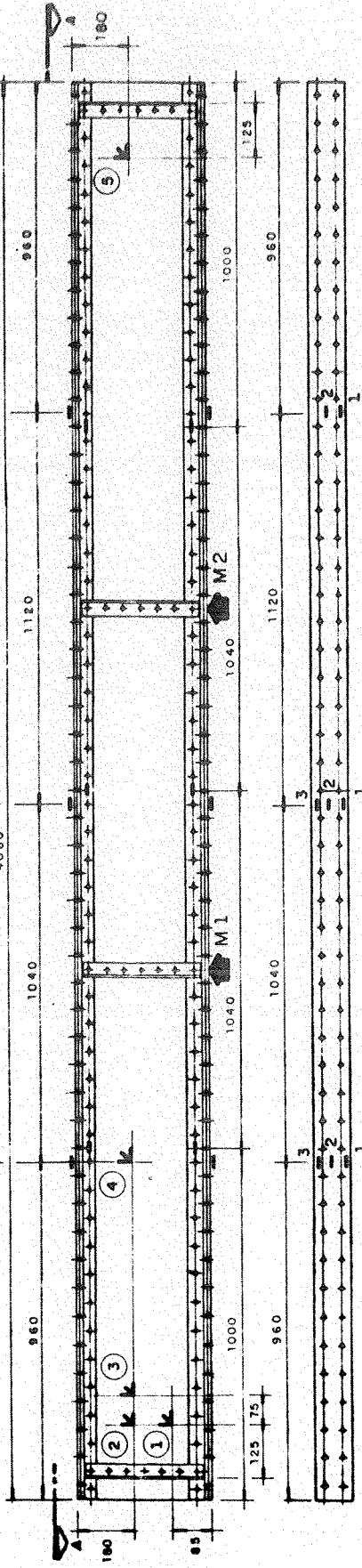
NUMERAÇÃO TÍPICA  
DAS ROSETAS



3

1

2



**VISTA A**



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I ENSAIO No.1 DATA: 04/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +1.                    | +0.                    | +1.                    | -1.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                     |
| 10.32                  | 9.64                   | +134.                  | +120.                  | +122.                  | +112.                  | +93.                   | -102.                  | -122.                  | -149.                  | -91.                   | -124.                   |
| 20.63                  | 19.28                  | +263.                  | +238.                  | +253.                  | +214.                  | +188.                  | -228.                  | -246.                  | -278.                  | -187.                  | -228.                   |
| 30.83                  | 29.15                  | +395.                  | +356.                  | +388.                  | +306.                  | +289.                  | -366.                  | -373.                  | -406.                  | -285.                  | -330.                   |
| 0.59                   | 0.46                   | +22.                   | +6.                    | +14.                   | -16.                   | +13.                   | -1.                    | -12.                   | -32.                   | -7.                    | -3.                     |
| 10.43                  | 9.76                   | +149.                  | +121.                  | +133.                  | +93.                   | +103.                  | -107.                  | -128.                  | -162.                  | -95.                   | -114.                   |
| 20.63                  | 19.63                  | +275.                  | +240.                  | +263.                  | +202.                  | +197.                  | -237.                  | -252.                  | -284.                  | -190.                  | -223.                   |
| 30.83                  | 29.27                  | +399.                  | +359.                  | +394.                  | +309.                  | +292.                  | -370.                  | -373.                  | -404.                  | -284.                  | -328.                   |
| 41.15                  | 38.79                  | +533.                  | +471.                  | +537.                  | +406.                  | +366.                  | -517.                  | -503.                  | -519.                  | -387.                  | -423.                   |
| 51.35                  | 48.55                  | +669.                  | +581.                  | +698.                  | +503.                  | +443.                  | -686.                  | -632.                  | -620.                  | -491.                  | -515.                   |
| 61.31                  | 58.42                  | +805.                  | +693.                  | +875.                  | +601.                  | +524.                  | -895.                  | -764.                  | -677.                  | -601.                  | -584.                   |
| 0.23                   | 0.00                   | +69.                   | -47.                   | +82.                   | -40.                   | -37.                   | -21.                   | -24.                   | -30.                   | -17.                   | -10.                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I ENSAIO No.1 DATA: 04/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                     |
| 10.32                  | 9.64                   | +91.                   | +82.                   | +73.                   | +84.                   | +61.                   | -69.                   | -82.                   | -96.                   | -59.                   | -81.                    |
| 20.63                  | 19.28                  | +175.                  | +163.                  | +153.                  | +161.                  | +124.                  | -151.                  | -163.                  | -182.                  | -119.                  | -157.                   |
| 30.83                  | 29.15                  | +257.                  | +244.                  | +237.                  | +235.                  | +189.                  | -234.                  | -246.                  | -268.                  | -179.                  | -232.                   |
| 0.59                   | 0.46                   | +9.                    | +7.                    | +7.                    | +7.                    | +7.                    | +2.                    | -4.                    | -8.                    | -2.                    | -1.                     |
| 10.43                  | 9.76                   | +94.                   | +85.                   | +79.                   | +85.                   | +67.                   | -69.                   | -81.                   | -97.                   | -58.                   | -77.                    |
| 20.63                  | 19.63                  | +177.                  | +166.                  | +159.                  | +162.                  | +129.                  | -150.                  | -163.                  | -183.                  | -118.                  | -154.                   |
| 30.83                  | 29.27                  | +261.                  | +248.                  | +240.                  | +238.                  | +191.                  | -230.                  | -245.                  | -268.                  | -178.                  | -229.                   |
| 41.15                  | 38.79                  | +347.                  | +330.                  | +323.                  | +309.                  | +256.                  | -315.                  | -327.                  | -352.                  | -241.                  | -302.                   |
| 51.35                  | 48.55                  | +436.                  | +410.                  | +408.                  | +380.                  | +320.                  | -407.                  | -412.                  | -431.                  | -307.                  | -370.                   |
| 61.31                  | 58.42                  | +528.                  | +492.                  | +491.                  | +450.                  | +377.                  | -521.                  | -496.                  | -488.                  | -380.                  | -430.                   |
| 0.23                   | 0.00                   | +25.                   | +5.                    | +17.                   | -5.                    | +3.                    | +6.                    | -1.                    | -8.                    | -19.                   | +6.                     |

---

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

---

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
VIGA I            ENSAIO No.1            DATA: 04/02/91  
DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
SECAO 3

---

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>(µE) | 2<br>(µE) | 3<br>(µE) | 4<br>(µE) | 5<br>(µE) | 6<br>(µE) |
|------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.00                   | 0.00                   | -1.       | -1.       | -1.       | +0.       | +0.       | -1.       |
| 10.32                  | 9.64                   | +80.      | +82.      | +74.      | -83.      | -104.     | -69.      |
| 20.63                  | 19.28                  | +157.     | +164.     | +146.     | -167.     | -191.     | -135.     |
| 30.83                  | 29.15                  | +236.     | +251.     | +217.     | -253.     | -274.     | -203.     |
| 0.59                   | 0.46                   | +8.       | +10.      | +3.       | -6.       | -19.      | -8.       |
| 10.43                  | 9.76                   | +85.      | +88.      | +75.      | -84.      | -109.     | -71.      |
| 20.63                  | 19.63                  | +163.     | +172.     | +147.     | -170.     | -191.     | -137.     |
| 30.83                  | 29.27                  | +240.     | +256.     | +219.     | -253.     | -270.     | -201.     |
| 41.15                  | 38.79                  | +324.     | +342.     | +288.     | -341.     | -345.     | -267.     |
| 51.35                  | 48.55                  | +409.     | +431.     | +357.     | -429.     | -415.     | -329.     |
| 61.31                  | 58.42                  | +497.     | +524.     | +430.     | -520.     | -473.     | -384.     |
| 0.23                   | 0.00                   | +24.      | +28.      | -9.       | -11.      | -17.      | +6.       |

---

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I ENSAIO No.1 DATA: 04/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 1

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 10.32         | 9.64          | -4.                               | +39.                              | -4.                               | +39.                              | -46.                              | +5.6                | -7.8                | +45.0                    |
| 20.63         | 19.28         | -8.                               | +67.                              | -8.                               | +67.                              | -82.                              | +9.6                | -14.0               | +45.0                    |
| 30.83         | 29.15         | -9.                               | +95.                              | -9.                               | +95.                              | -113.                             | +13.6               | -19.2               | +45.0                    |
| 0.59          | 0.46          | +5.                               | +8.                               | +3.                               | +8.                               | -0.                               | +1.7                | +0.5                | U/C                      |
| 10.43         | 9.76          | +2.                               | +43.                              | -1.                               | +43.                              | -42.                              | +6.8                | -6.5                | +44.0                    |
| 20.63         | 19.63         | -3.                               | +70.                              | -4.                               | +70.                              | -77.                              | +10.6               | -12.5               | +44.8                    |
| 30.83         | 29.27         | -6.                               | +97.                              | -6.                               | +97.                              | -109.                             | +14.6               | -17.9               | +45.0                    |
| 41.15         | 38.79         | -7.                               | +124.                             | -8.                               | +124.                             | -138.                             | +18.6               | -22.7               | +44.9                    |
| 51.35         | 48.55         | -8.                               | +147.                             | -9.                               | +147.                             | -164.                             | +22.0               | -26.9               | +44.8                    |
| 61.31         | 58.42         | -7.                               | +159.                             | -10.                              | +159.                             | -176.                             | +23.9               | -28.9               | +44.7                    |
| 0.23          | 0.00          | +27.                              | +15.                              | -2.                               | +27.                              | -2.                               | +5.9                | +1.3                | U/C                      |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I ENSAIO No.1 DATA: 04/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 2

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 10.32         | 9.64          | -6.                               | +40.                              | -8.                               | +40.                              | -53.                              | +5.4                | -9.3                | +44.4                    |
| 20.63         | 19.28         | -6.                               | +75.                              | -13.                              | +75.                              | -94.                              | +10.5               | -16.1               | +43.7                    |
| 30.83         | 29.15         | -5.                               | +110.                             | -16.                              | +110.                             | -131.                             | +15.9               | -22.0               | +43.6                    |
| 0.59          | 0.46          | +2.                               | +8.                               | +3.                               | +8.                               | -3.                               | +1.5                | -0.1                | U/C                      |
| 10.43         | 9.76          | -1.                               | +44.                              | -4.                               | +44.                              | -49.                              | +6.7                | -8.1                | +44.1                    |
| 20.63         | 19.63         | -2.                               | +79.                              | -9.                               | +79.                              | -89.                              | +11.7               | -14.7               | +43.9                    |
| 30.83         | 29.27         | -1.                               | +113.                             | -12.                              | +113.                             | -126.                             | +16.9               | -20.8               | +43.6                    |
| 41.15         | 38.79         | +1.                               | +148.                             | -15.                              | +148.                             | -162.                             | +22.3               | -26.5               | +43.5                    |
| 51.35         | 48.55         | +2.                               | +180.                             | -17.                              | +180.                             | -195.                             | +27.4               | -31.8               | +43.6                    |
| 61.31         | 58.42         | +4.                               | +206.                             | -16.                              | +206.                             | -219.                             | +31.7               | -35.3               | +43.7                    |
| 0.23          | 0.00          | +10.                              | +8.                               | +6.                               | +10.                              | +6.                               | +2.7                | +2.0                | -5.7                     |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS

VIGA I ENSAIO No.1 DATA: 04/02/91

DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 3

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +1.                               | +0.                               | +1.                               | +2.                               | -0.                               | +0.4                | +0.1                | U/C                      |
| 10.32         | 9.64          | -8.                               | +32.                              | -12.                              | +32.                              | -52.                              | +3.7                | -9.6                | +43.4                    |
| 20.63         | 19.28         | -6.                               | +71.                              | -14.                              | +71.                              | -91.                              | +9.9                | -15.7               | +43.5                    |
| 30.83         | 29.15         | -4.                               | +112.                             | -13.                              | +112.                             | -129.                             | +16.5               | -21.5               | +43.9                    |
| 0.59          | 0.46          | +1.                               | +5.                               | +2.                               | +5.                               | -2.                               | +0.9                | -0.1                | U/C                      |
| 10.43         | 9.76          | -3.                               | +37.                              | -8.                               | +37.                              | -47.                              | +5.1                | -8.2                | +43.4                    |
| 20.63         | 19.63         | -3.                               | +76.                              | -9.                               | +76.                              | -88.                              | +11.1               | -14.7               | +43.8                    |
| 30.83         | 29.27         | -1.                               | +115.                             | -9.                               | +116.                             | -126.                             | +17.5               | -20.6               | +44.0                    |
| 41.15         | 38.79         | +2.                               | +155.                             | -8.                               | +155.                             | -161.                             | +24.1               | -25.8               | +44.1                    |
| 51.35         | 48.55         | +5.                               | +196.                             | -3.                               | +196.                             | -194.                             | +31.0               | -30.5               | +44.4                    |
| 61.31         | 58.42         | +9.                               | +234.                             | +10.                              | +234.                             | -214.                             | +38.2               | -32.4               | +45.1                    |
| 0.23          | 0.00          | +8.                               | +9.                               | +9.                               | +9.                               | +7.                               | +2.5                | +2.3                | +67.6                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I ENSAIO No.1 DATA: 04/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 4

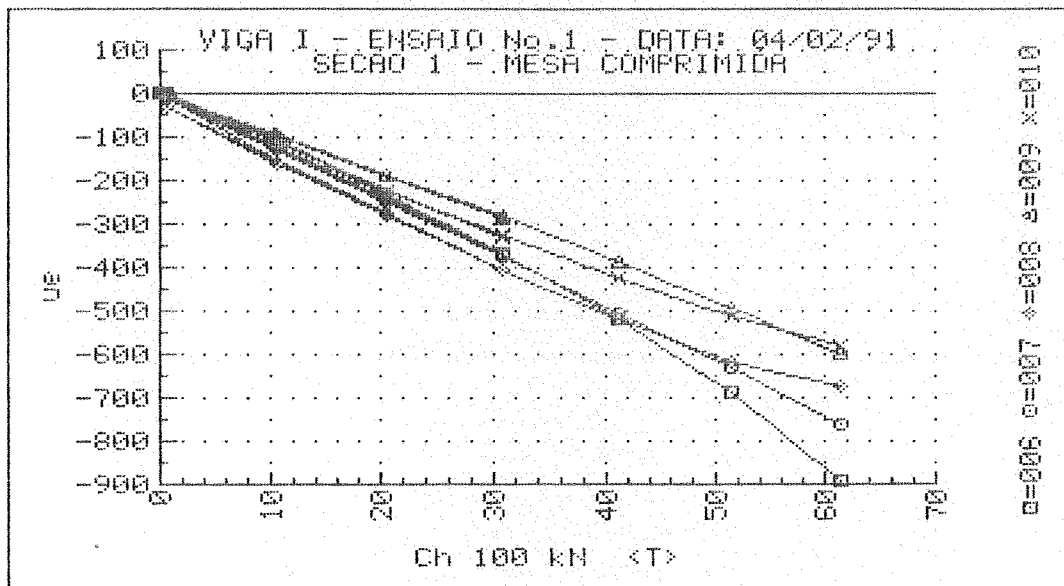
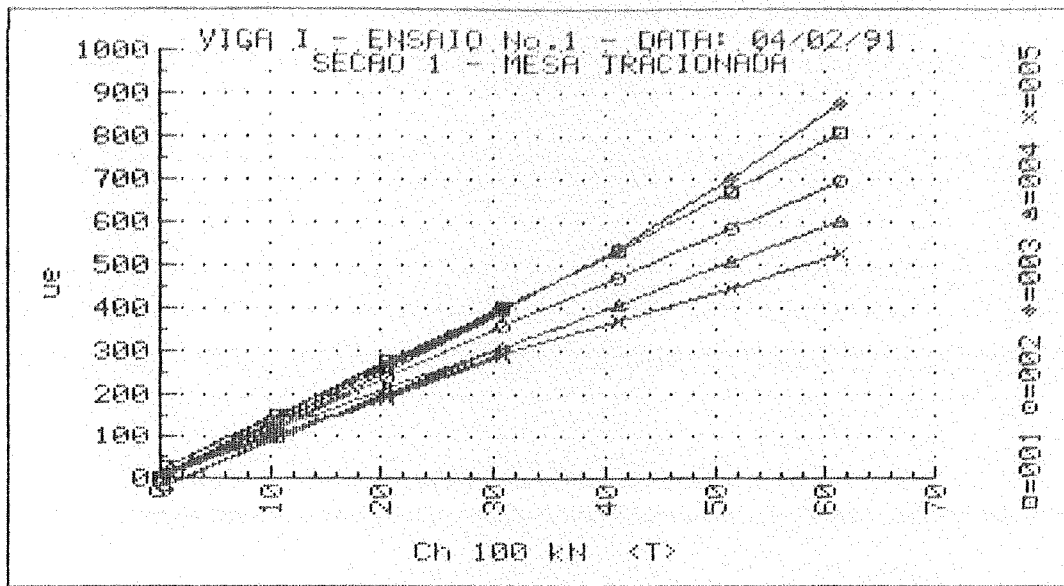
| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | α<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | -1.                    | +0.                    | +1.                    | -1.                    | +0.1                    | -0.1                    | U/C      |
| 10.32                  | 9.64                   | -1.                    | +40.                   | -5.                    | +40.                   | -45.                   | +5.9                    | -7.5                    | +43.7    |
| 20.63                  | 19.28                  | -2.                    | +77.                   | -7.                    | +77.                   | -85.                   | +11.5                   | -14.0                   | +44.2    |
| 30.83                  | 29.15                  | -3.                    | +114.                  | -8.                    | +114.                  | -125.                  | +17.3                   | -20.4                   | +44.4    |
| 0.59                   | 0.46                   | +3.                    | +6.                    | +1.                    | +6.                    | -2.                    | +1.2                    | -0.1                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.76                   | +3.                    | +43.                   | -2.                    | +43.                   | -42.                   | +6.8                    | -6.5                    | +43.4    |
| 20.63                  | 19.63                  | +1.                    | +80.                   | -4.                    | +80.                   | -83.                   | +12.5                   | -13.3                   | +44.2    |
| 30.83                  | 29.27                  | +0.                    | +117.                  | -5.                    | +117.                  | -122.                  | +18.2                   | -19.6                   | +44.4    |
| 41.15                  | 38.79                  | +2.                    | +155.                  | -4.                    | +155.                  | -157.                  | +24.3                   | -24.9                   | +44.5    |
| 51.35                  | 48.55                  | +5.                    | +195.                  | -1.                    | +195.                  | -191.                  | +31.0                   | -29.9                   | +44.6    |
| 61.31                  | 58.42                  | +9.                    | +234.                  | +11.                   | +234.                  | -214.                  | +38.4                   | -32.3                   | +45.1    |
| 0.23                   | 0.00                   | +16.                   | +11.                   | +1.                    | +17.                   | +0.                    | +3.8                    | +1.2                    | U/C      |

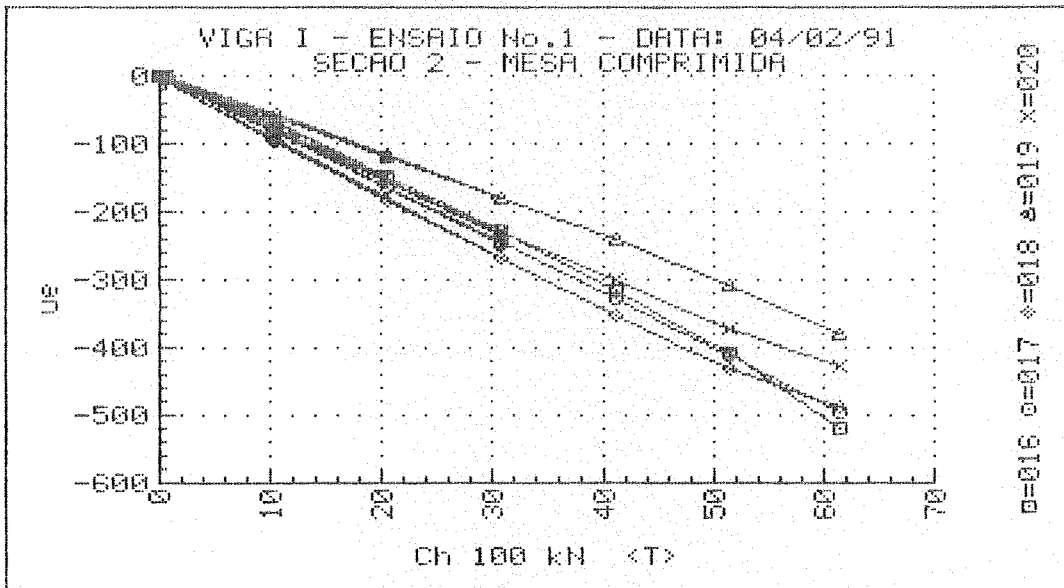
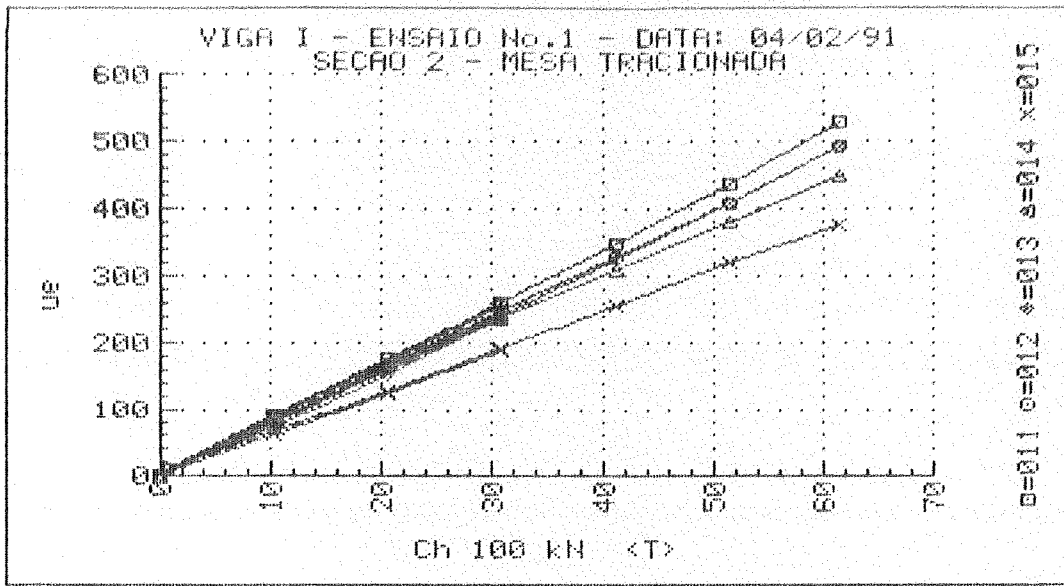
UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

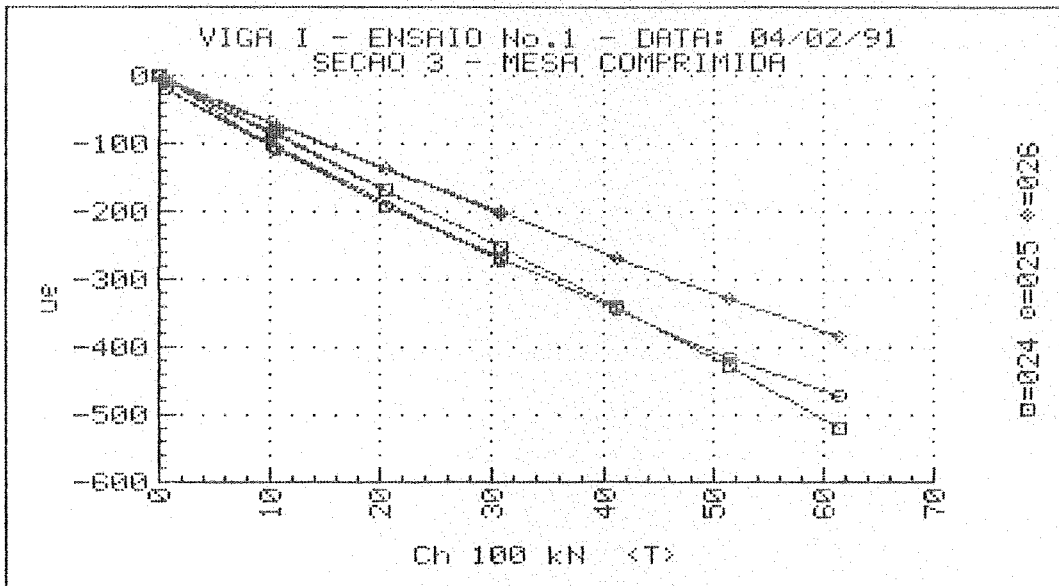
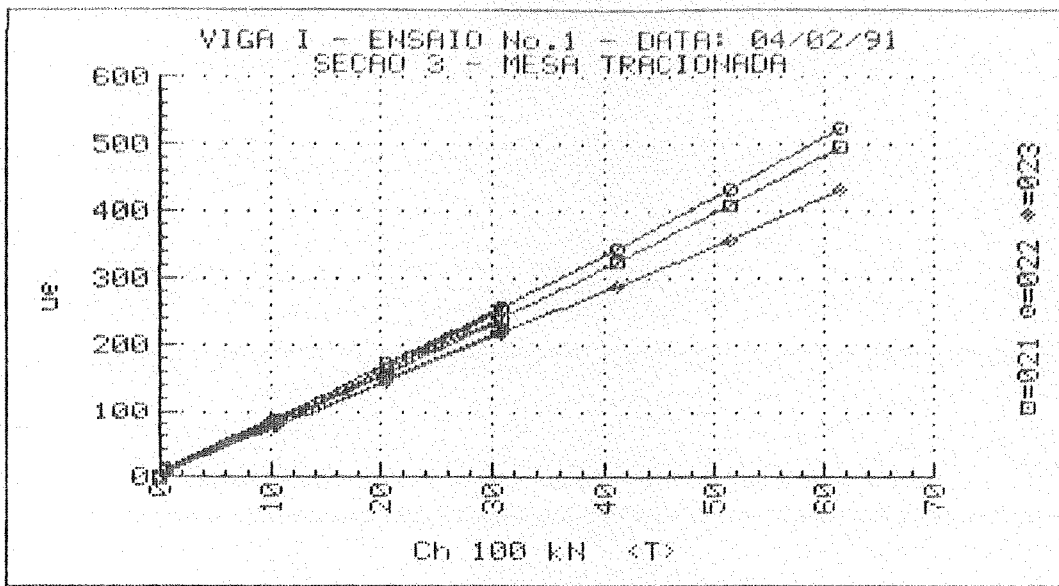
ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I ENSAIO No.1 DATA: 04/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 5

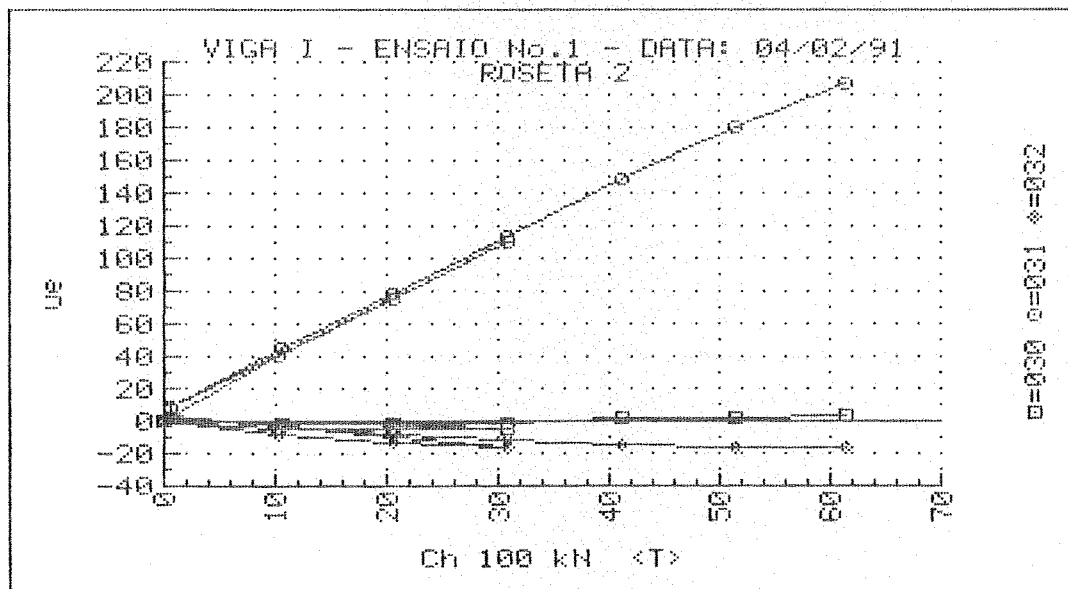
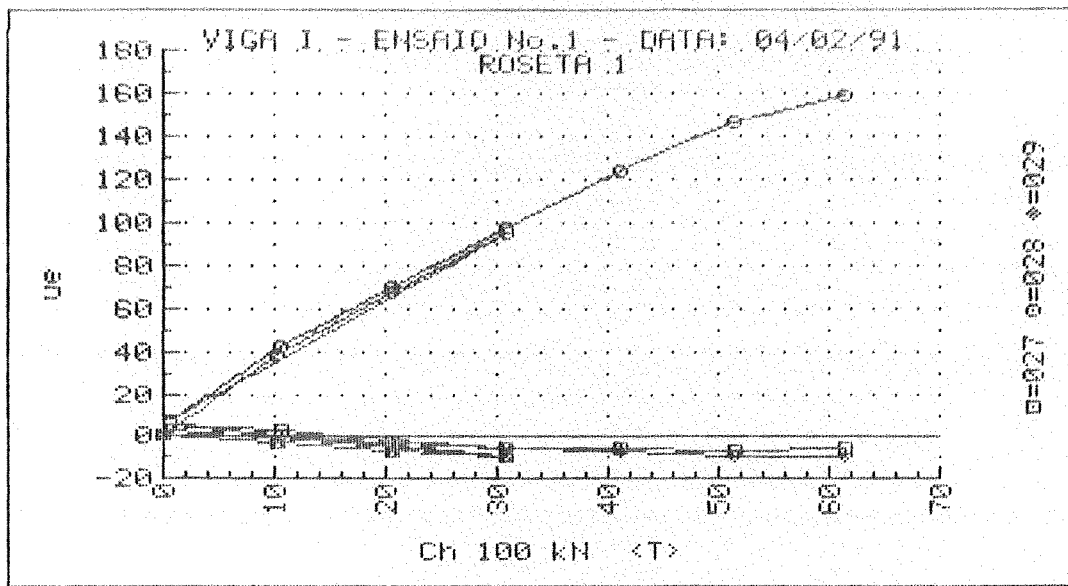
| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.0                    | +0.0                    | U/C      |
| 10.32                  | 9.64                   | +1.                    | -44.                   | -9.                    | +36.                   | -44.                   | +5.2                    | -7.4                    | -41.6    |
| 20.63                  | 19.28                  | +9.                    | -78.                   | -14.                   | +73.                   | -78.                   | +11.1                   | -12.8                   | -40.7    |
| 30.83                  | 29.15                  | +15.                   | -111.                  | -19.                   | +108.                  | -112.                  | +16.8                   | -17.9                   | -40.6    |
| 0.59                   | 0.46                   | +3.                    | -2.                    | +3.                    | +8.                    | -2.                    | +1.6                    | +0.1                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.76                   | +7.                    | -40.                   | -5.                    | +42.                   | -40.                   | +6.8                    | -6.2                    | -41.0    |
| 20.63                  | 19.63                  | +12.                   | -73.                   | -10.                   | +76.                   | -74.                   | +12.0                   | -11.5                   | -40.6    |
| 30.83                  | 29.27                  | +18.                   | -107.                  | -16.                   | +110.                  | -108.                  | +17.5                   | -16.9                   | -40.5    |
| 41.15                  | 38.79                  | +26.                   | -138.                  | -21.                   | +145.                  | -140.                  | +23.1                   | -21.8                   | -40.3    |
| 51.35                  | 48.55                  | +32.                   | -167.                  | -25.                   | +177.                  | -170.                  | +28.5                   | -26.3                   | -40.3    |
| 61.31                  | 58.42                  | +40.                   | -190.                  | -26.                   | +206.                  | -193.                  | +33.4                   | -29.5                   | -40.2    |
| 0.23                   | 0.00                   | +9.                    | +4.                    | +2.                    | +10.                   | +1.                    | +2.3                    | +1.0                    | U/C      |

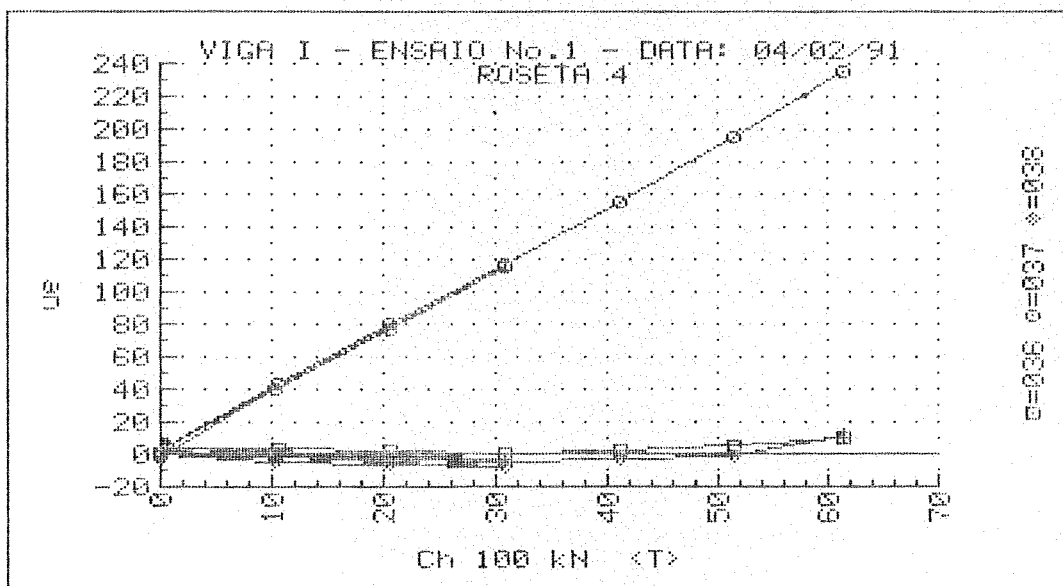
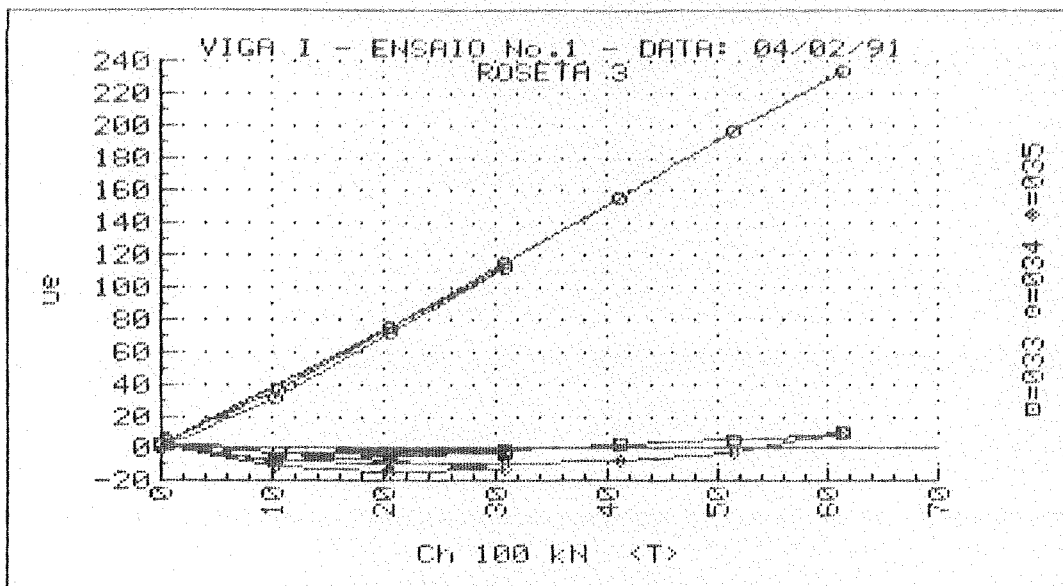


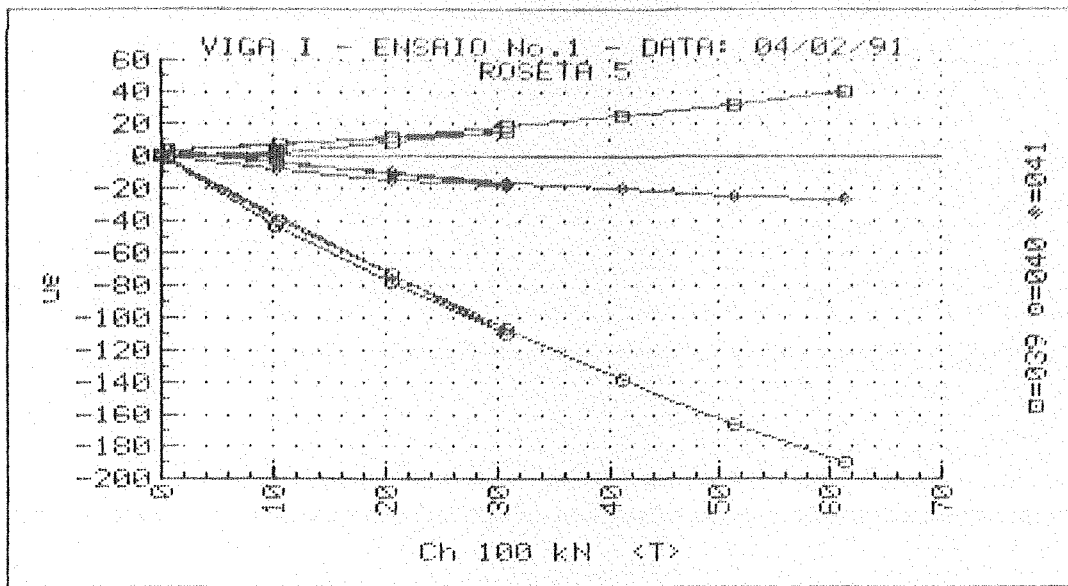












## MODELO - VIGA I

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### . ENSAIO 2

#### - DESLOCAMENTOS

.TABELAS

.GRÁFICOS

MODELO: VIGA REBITADA I

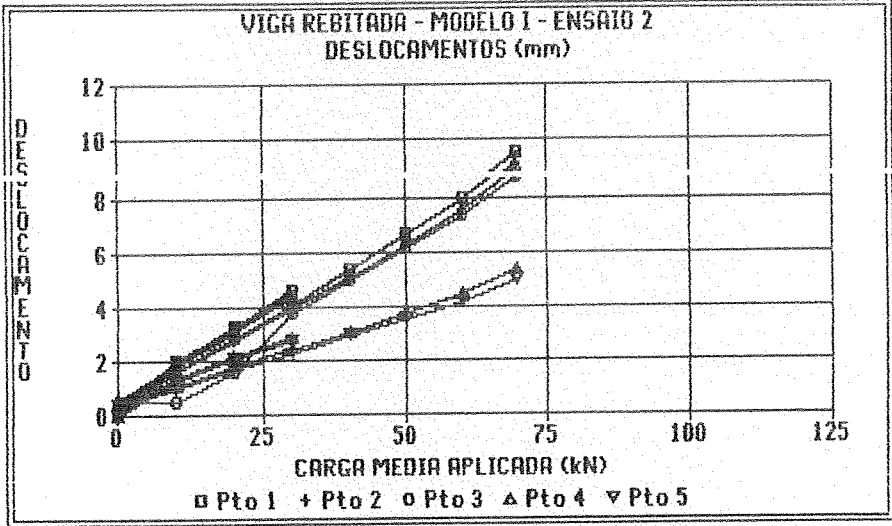
ENSAIO Nro:2

DATA: 8 DE FEVEREIRO DE 1991

HORARIO: 10:30 Hs

| ETAPA | CARGA APL<br>MEDIA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS<br>(mm) |       |       |      |       |
|-------|----------------------------|-----------------------|-------|-------|------|-------|
|       |                            | Pto 1                 | Pto 2 | Pto 3 | Pto4 | Pto 5 |
|       | 0.00                       | 0.00                  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 0.00  |
| 1     | 9.95                       | 2.02                  | 2.00  | 1.89  | 1.50 | 1.26  |
| 2     | 20.00                      | 3.32                  | 3.25  | 3.17  | 2.24 | 2.01  |
| 3     | 30.05                      | 4.61                  | 4.45  | 4.35  | 2.91 | 2.75  |
| 4     | .10                        | .42                   | .46   | .49   | .42  | .34   |
| 5     | 10.10                      | 1.64                  | 1.57  | 1.48  | 1.09 | .96   |
| 6     | 19.95                      | 2.90                  | 2.77  | 2.65  | 1.77 | 1.67  |
| 7     | 30.00                      | 4.14                  | 3.94  | 3.81  | 2.42 | 2.38  |
| 8     | 39.95                      | 5.38                  | 5.12  | 5.01  | 3.06 | 3.04  |
| 9     | 50.00                      | 6.65                  | 6.31  | 6.19  | 3.71 | 3.70  |
| 10    | 59.95                      | 7.96                  | 7.54  | 7.43  | 4.41 | 4.36  |
| 11    | 69.85                      | 9.54                  | 9.04  | 8.88  | 5.21 | 5.17  |





## MODELO - VIGA I

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### . ENSAIO 2

#### - DEFORMAÇÕES

#### EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA

.UNIAXIAIS

.ROSETAS

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I            ENSAIO No.2            DATA: 08/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAD 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                     |
| 10.32                  | 9.64                   | +118.                  | +122.                  | +140.                  | +107.                  | +97.                   | -112.                  | -121.                  | -138.                  | -92.                   | -116.                   |
| 20.63                  | 19.40                  | +242.                  | +245.                  | +275.                  | +216.                  | +193.                  | -232.                  | -244.                  | -270.                  | -185.                  | -229.                   |
| 30.83                  | 29.27                  | +371.                  | +368.                  | +406.                  | +327.                  | +288.                  | -348.                  | -369.                  | -410.                  | -278.                  | -343.                   |
| 0.12                   | 0.12                   | +1.                    | +6.                    | +9.                    | +1.                    | +5.                    | +5.                    | +0.                    | -8.                    | +1.                    | -3.                     |
| 10.43                  | 9.76                   | +123.                  | +126.                  | +146.                  | +110.                  | +101.                  | -109.                  | -122.                  | -143.                  | -90.                   | -118.                   |
| 20.63                  | 19.28                  | +244.                  | +247.                  | +278.                  | +217.                  | +195.                  | -228.                  | -243.                  | -273.                  | -183.                  | -229.                   |
| 30.83                  | 29.38                  | +373.                  | +370.                  | +410.                  | +328.                  | +290.                  | -347.                  | -369.                  | -410.                  | -279.                  | -342.                   |
| 40.91                  | 39.02                  | +497.                  | +492.                  | +542.                  | +434.                  | +383.                  | -468.                  | -493.                  | -545.                  | -373.                  | -450.                   |
| 51.11                  | 48.90                  | +623.                  | +618.                  | +678.                  | +538.                  | +476.                  | -590.                  | -618.                  | -680.                  | -468.                  | -562.                   |
| 61.20                  | 58.65                  | +749.                  | +741.                  | +811.                  | +644.                  | +565.                  | -693.                  | -745.                  | -803.                  | -561.                  | -687.                   |
| 71.40                  | 68.29                  | +897.                  | +812.                  | +976.                  | +747.                  | +649.                  | -754.                  | -877.                  | -913.                  | -651.                  | -869.                   |
| 0.12                   | 0.00                   | +89.                   | -118.                  | +64.                   | +19.                   | +6.                    | +176.                  | -91.                   | +488.                  | -24.                   | -153.                   |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I      ENSAIO No.2      DATA: 08/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | -1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                    | +0.                     |
| 10.32                  | 9.64                   | +78.                   | +82.                   | +89.                   | +80.                   | +66.                   | -64.                   | -82.                   | -101.                  | -57.                   | -82.                    |
| 20.63                  | 19.40                  | +158.                  | +164.                  | +176.                  | +157.                  | +130.                  | -135.                  | -163.                  | -198.                  | -116.                  | -163.                   |
| 30.83                  | 29.27                  | +238.                  | +247.                  | +260.                  | +234.                  | +194.                  | -207.                  | -246.                  | -293.                  | -176.                  | -244.                   |
| 0.12                   | 0.12                   | +1.                    | +3.                    | +6.                    | +7.                    | +5.                    | +6.                    | +0.                    | -5.                    | +2.                    | -1.                     |
| 10.43                  | 9.76                   | +81.                   | +85.                   | +91.                   | +85.                   | +69.                   | -59.                   | -82.                   | -106.                  | -56.                   | -84.                    |
| 20.63                  | 19.28                  | +160.                  | +166.                  | +176.                  | +160.                  | +132.                  | -130.                  | -163.                  | -200.                  | -115.                  | -164.                   |
| 30.83                  | 29.38                  | +239.                  | +249.                  | +261.                  | +236.                  | +196.                  | -204.                  | -245.                  | -295.                  | -176.                  | -245.                   |
| 40.91                  | 39.02                  | +316.                  | +331.                  | +347.                  | +309.                  | +260.                  | -279.                  | -327.                  | -388.                  | -236.                  | -324.                   |
| 51.11                  | 48.90                  | +392.                  | +414.                  | +437.                  | +381.                  | +325.                  | -353.                  | -411.                  | -482.                  | -298.                  | -404.                   |
| 61.20                  | 58.65                  | +467.                  | +495.                  | +530.                  | +449.                  | +390.                  | -423.                  | -492.                  | -574.                  | -359.                  | -480.                   |
| 71.40                  | 68.29                  | +539.                  | +578.                  | +642.                  | +515.                  | +451.                  | -488.                  | -575.                  | -672.                  | -419.                  | -563.                   |
| 0.12                   | 0.00                   | +31.                   | +18.                   | +22.                   | -9.                    | -4.                    | +15.                   | -3.                    | +27.                   | -3.                    | -8.                     |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
VIGA I            ENSAIO No.2            DATA: 08/02/91  
DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
SECAD 3

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu$ E) | 2<br>( $\mu$ E) | 3<br>( $\mu$ E) | 4<br>( $\mu$ E) | 5<br>( $\mu$ E) | 6<br>( $\mu$ E) |
|------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.             | -1.             | +0.             | +1.             | +0.             | +0.             |
| 10.32                  | 9.64                   | +76.            | +83.            | +74.            | -84.            | -87.            | -67.            |
| 20.63                  | 19.40                  | +154.           | +167.           | +147.           | -168.           | -173.           | -132.           |
| 30.83                  | 29.27                  | +237.           | +251.           | +223.           | -253.           | -263.           | -198.           |
| 0.12                   | 0.12                   | +1.             | +4.             | +3.             | -2.             | -4.             | -2.             |
| 10.43                  | 9.76                   | +78.            | +86.            | +76.            | -84.            | -88.            | -67.            |
| 20.63                  | 19.28                  | +154.           | +169.           | +147.           | -167.           | -172.           | -131.           |
| 30.83                  | 29.38                  | +236.           | +253.           | +223.           | -254.           | -261.           | -198.           |
| 40.91                  | 39.02                  | +313.           | +337.           | +295.           | -340.           | -346.           | -264.           |
| 51.11                  | 48.90                  | +390.           | +422.           | +367.           | -427.           | -431.           | -330.           |
| 61.20                  | 58.65                  | +467.           | +508.           | +436.           | -512.           | -520.           | -395.           |
| 71.40                  | 68.29                  | +541.           | +599.           | +499.           | -599.           | -629.           | -459.           |
| 0.12                   | 0.00                   | +30.            | +21.            | +4.             | -3.             | -23.            | +3.             |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I            ENSAIO No.2            DATA: 08/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 1

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 10.32         | 9.64          | -2.                               | +44.                              | -5.                               | +44.                              | -51.                              | +6.6                | -8.5                | +44.1                    |
| 20.63         | 19.40         | -6.                               | +78.                              | -8.                               | +78.                              | -91.                              | +11.3               | -15.2               | +44.7                    |
| 30.83         | 29.27         | -8.                               | +110.                             | -11.                              | +110.                             | -129.                             | +16.0               | -21.6               | +44.5                    |
| 0.12          | 0.12          | +4.                               | +10.                              | +1.                               | +11.                              | -6.                               | +2.0                | -0.6                | +40.0                    |
| 10.43         | 9.76          | +0.                               | +48.                              | -3.                               | +48.                              | -51.                              | +7.4                | -8.2                | +44.2                    |
| 20.63         | 19.28         | -3.                               | +79.                              | -7.                               | +79.                              | -89.                              | +11.9               | -14.7               | +44.4                    |
| 30.83         | 29.38         | -6.                               | +112.                             | -10.                              | +112.                             | -128.                             | +16.5               | -21.2               | +44.4                    |
| 40.91         | 39.02         | -8.                               | +143.                             | -15.                              | +143.                             | -166.                             | +21.0               | -27.6               | +44.3                    |
| 51.11         | 48.90         | -9.                               | +177.                             | -20.                              | +177.                             | -205.                             | +26.0               | -34.3               | +44.1                    |
| 61.20         | 58.65         | -8.                               | +215.                             | -26.                              | +215.                             | -248.                             | +31.6               | -41.3               | +43.9                    |
| 71.40         | 68.29         | -2.                               | +266.                             | -38.                              | +266.                             | -306.                             | +39.3               | -50.9               | +43.2                    |
| 0.12          | 0.00          | +26.                              | +40.                              | -7.                               | +44.                              | -25.                              | +8.2                | -2.6                | +31.0                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I            ENSAIO No.2            DATA: 08/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 2

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 10.32         | 9.64          | -4.                               | +45.                              | -7.                               | +45.                              | -56.                              | +6.5                | -9.5                | +44.2                    |
| 20.63         | 19.40         | -4.                               | +83.                              | -11.                              | +83.                              | -98.                              | +12.1               | -16.5               | +43.8                    |
| 30.83         | 29.27         | -4.                               | +120.                             | -17.                              | +120.                             | -141.                             | +17.6               | -23.7               | +43.5                    |
| 0.12          | 0.12          | +2.                               | +9.                               | +2.                               | +9.                               | -6.                               | +1.7                | -0.6                | +45.0                    |
| 10.43         | 9.76          | -1.                               | +49.                              | -5.                               | +49.                              | -55.                              | +7.4                | -9.0                | +44.0                    |
| 20.63         | 19.28         | -2.                               | +85.                              | -10.                              | +85.                              | -98.                              | +12.6               | -16.2               | +43.7                    |
| 30.83         | 29.38         | -2.                               | +122.                             | -16.                              | +122.                             | -140.                             | +18.1               | -23.3               | +43.5                    |
| 40.91         | 39.02         | -2.                               | +158.                             | -22.                              | +158.                             | -182.                             | +23.4               | -30.3               | +43.3                    |
| 51.11         | 48.90         | -1.                               | +195.                             | -28.                              | +195.                             | -225.                             | +28.8               | -37.4               | +43.1                    |
| 61.20         | 58.65         | +0.                               | +234.                             | -36.                              | +234.                             | -270.                             | +34.5               | -45.0               | +43.0                    |
| 71.40         | 68.29         | +3.                               | +279.                             | -48.                              | +280.                             | -326.                             | +41.1               | -54.4               | +42.6                    |
| 0.12          | 0.00          | +9.                               | +31.                              | +3.                               | +31.                              | -19.                              | +5.8                | -2.2                | +41.2                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I ENSAIO No.2 DATA: 08/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 3

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 10.32         | 9.64          | -4.                               | +41.                              | -10.                              | +41.                              | -55.                              | +5.5                | -9.6                | +43.0                    |
| 20.63         | 19.40         | -4.                               | +82.                              | -13.                              | +82.                              | -100.                             | +11.9               | -16.8               | +43.5                    |
| 30.83         | 29.27         | -3.                               | +122.                             | -17.                              | +122.                             | -142.                             | +17.9               | -23.8               | +43.5                    |
| 0.12          | 0.12          | +2.                               | +9.                               | +1.                               | +9.                               | -6.                               | +1.5                | -0.7                | +43.1                    |
| 10.43         | 9.76          | -2.                               | +44.                              | -8.                               | +45.                              | -54.                              | +6.4                | -9.2                | +43.3                    |
| 20.63         | 19.28         | -2.                               | +85.                              | -11.                              | +85.                              | -99.                              | +12.6               | -16.4               | +43.5                    |
| 30.83         | 29.38         | -1.                               | +125.                             | -15.                              | +125.                             | -141.                             | +18.6               | -23.4               | +43.5                    |
| 40.91         | 39.02         | -1.                               | +164.                             | -19.                              | +164.                             | -184.                             | +24.5               | -30.3               | +43.5                    |
| 51.11         | 48.90         | +0.                               | +204.                             | -24.                              | +205.                             | -228.                             | +30.7               | -37.6               | +43.4                    |
| 61.20         | 58.65         | +0.                               | +246.                             | -31.                              | +247.                             | -278.                             | +36.8               | -45.9               | +43.3                    |
| 71.40         | 68.29         | -1.                               | +290.                             | -48.                              | +291.                             | -340.                             | +42.5               | -56.9               | +42.8                    |
| 0.12          | 0.00          | +6.                               | +28.                              | -1.                               | +29.                              | -24.                              | +4.8                | -3.4                | +41.4                    |



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS

VIGA I

ENSAIO No.2

DATA: 08/02/91

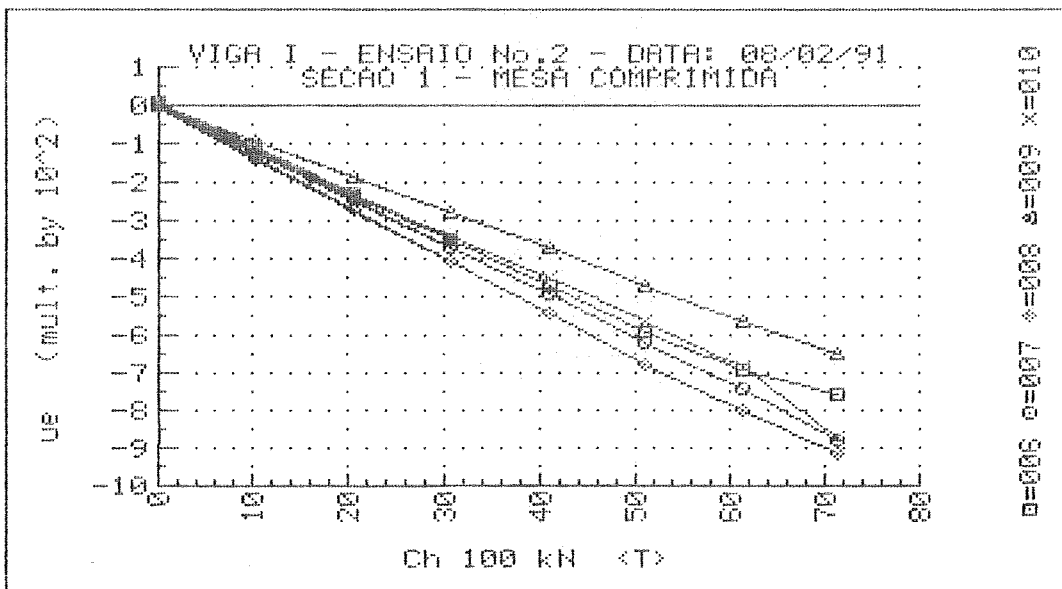
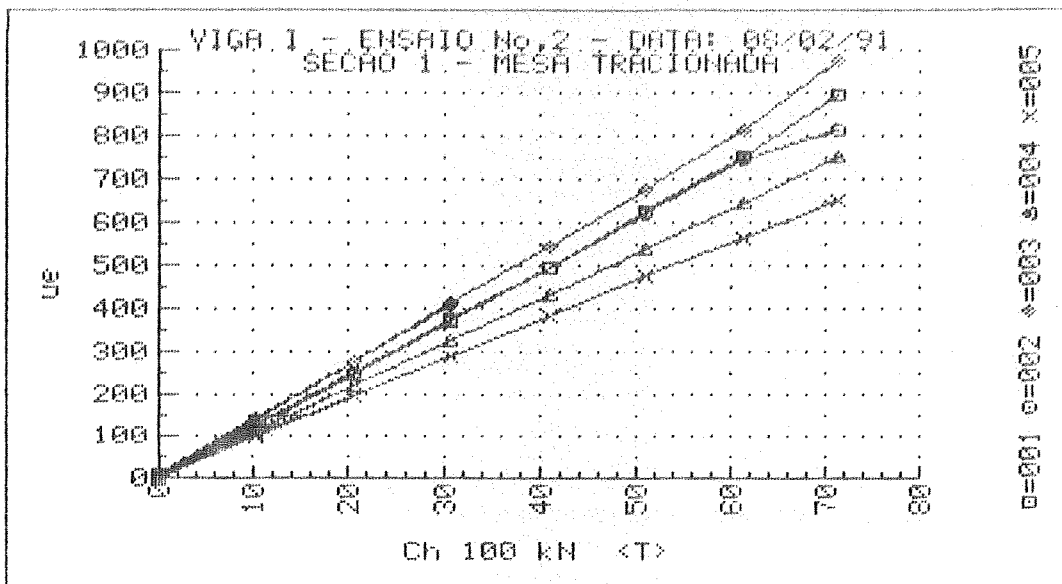
DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 4

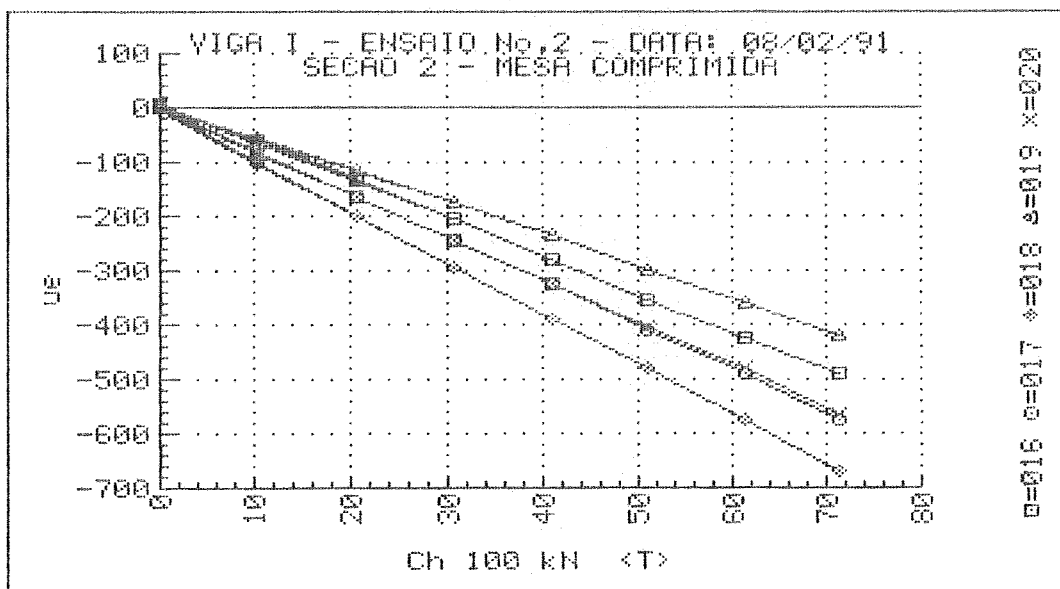
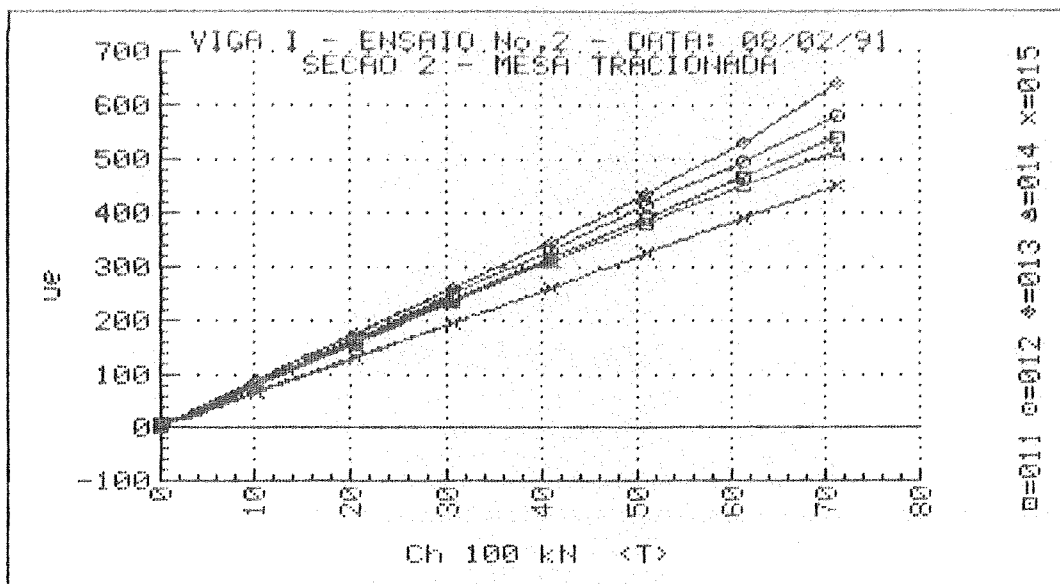
| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 10.32         | 9.64          | -1.                               | +43.                              | -7.                               | +44.                              | -51.                              | +6.4                | -8.6                | +43.3                    |
| 20.63         | 19.40         | -2.                               | +82.                              | -10.                              | +82.                              | -95.                              | +12.2               | -15.8               | +43.6                    |
| 30.83         | 29.27         | -3.                               | +119.                             | -14.                              | +119.                             | -136.                             | +17.7               | -22.6               | +43.7                    |
| 0.12          | 0.12          | +2.                               | +9.                               | +1.                               | +9.                               | -6.                               | +1.5                | -0.7                | +43.1                    |
| 10.43         | 9.76          | +1.                               | +46.                              | -5.                               | +46.                              | -50.                              | +7.1                | -8.2                | +43.3                    |
| 20.63         | 19.28         | +0.                               | +83.                              | -9.                               | +83.                              | -93.                              | +12.5               | -15.3               | +43.5                    |
| 30.83         | 29.38         | -2.                               | +121.                             | -13.                              | +121.                             | -136.                             | +18.1               | -22.5               | +43.7                    |
| 40.91         | 39.02         | -4.                               | +158.                             | -18.                              | +158.                             | -180.                             | +23.5               | -29.8               | +43.8                    |
| 51.11         | 48.90         | -5.                               | +195.                             | -25.                              | +195.                             | -224.                             | +28.8               | -37.4               | +43.6                    |
| 61.20         | 58.65         | -7.                               | +231.                             | -36.                              | +231.                             | -274.                             | +33.6               | -46.0               | +43.3                    |
| 71.40         | 68.29         | -7.                               | +268.                             | -66.                              | +269.                             | -342.                             | +37.5               | -58.8               | +42.2                    |
| 0.12          | 0.00          | +9.                               | +27.                              | -12.                              | +29.                              | -33.                              | +4.4                | -5.5                | +35.2                    |

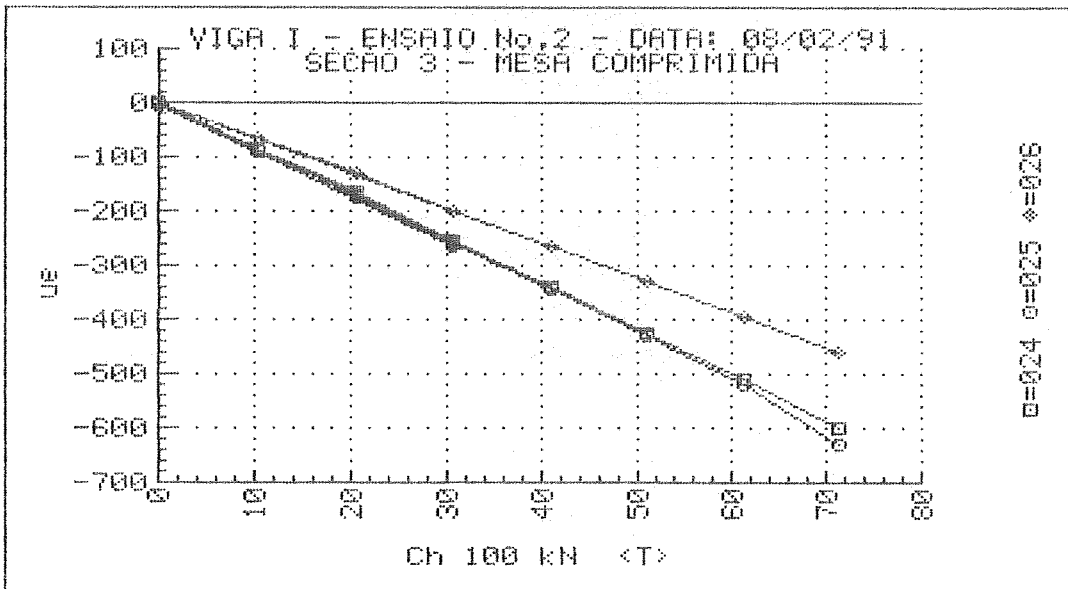
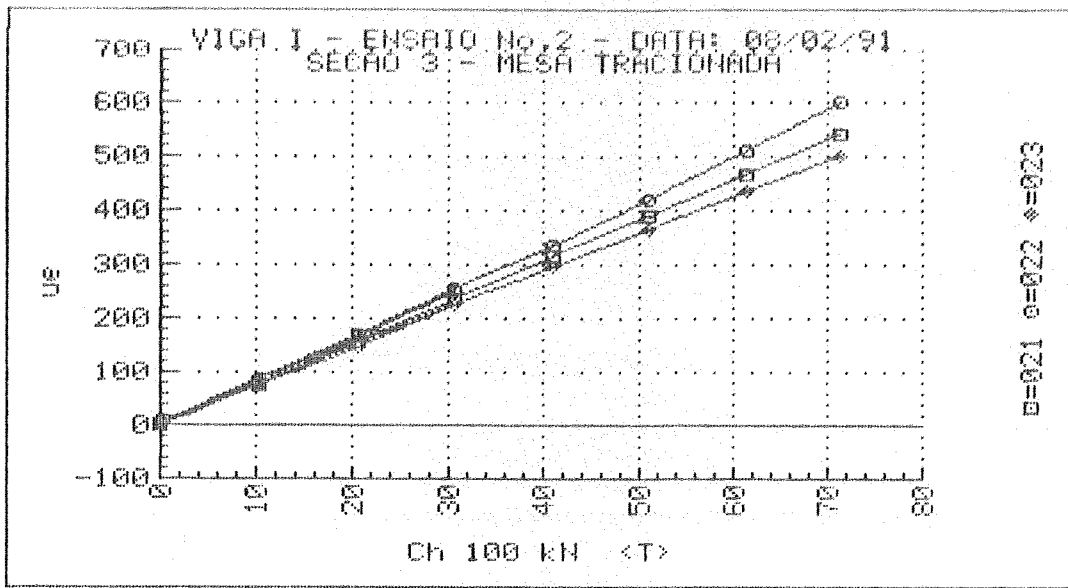
UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

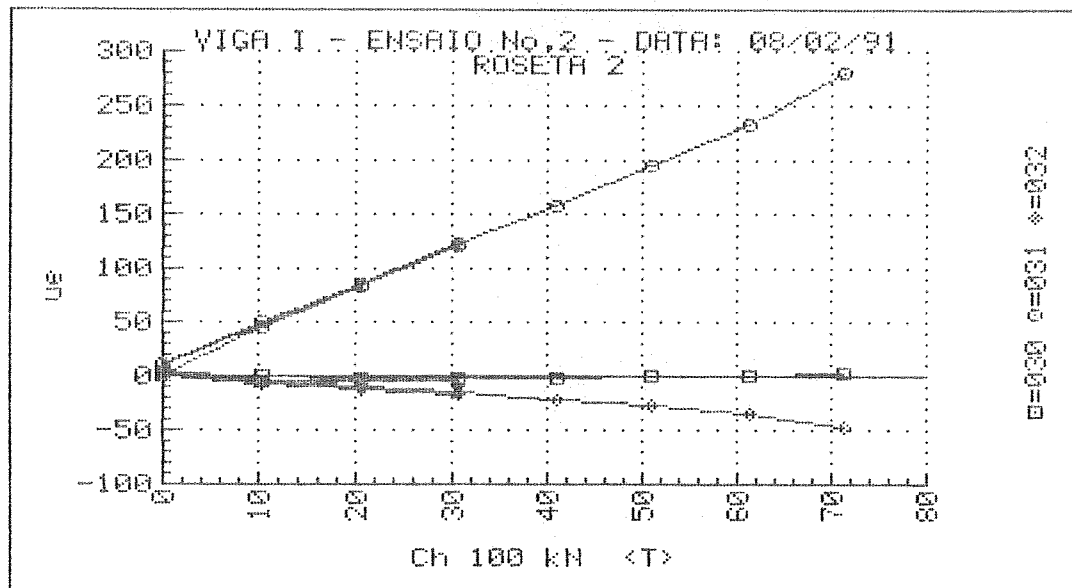
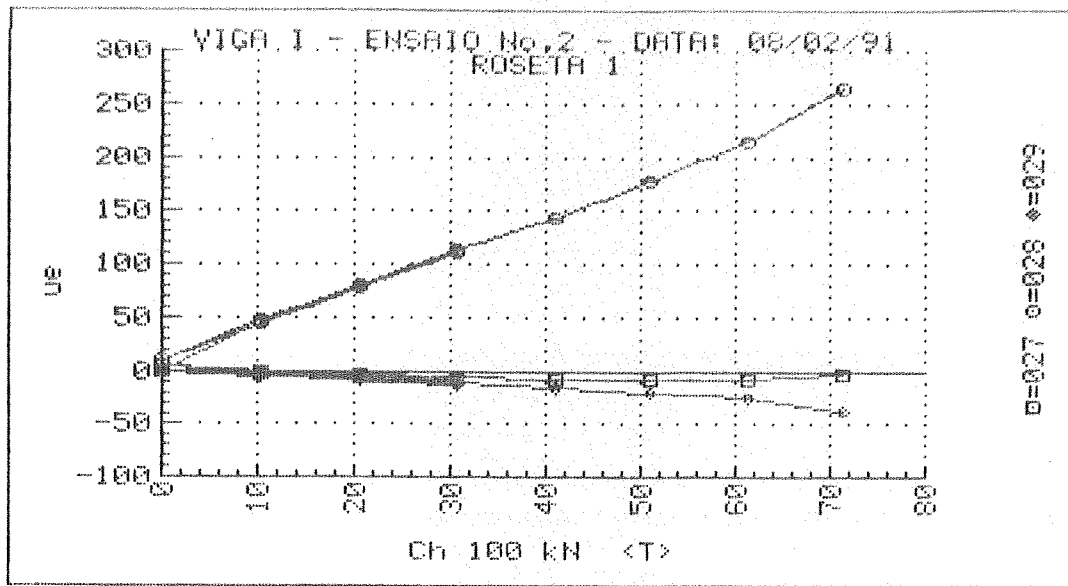
ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I            ENSAIO No.2            DATA: 08/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 5

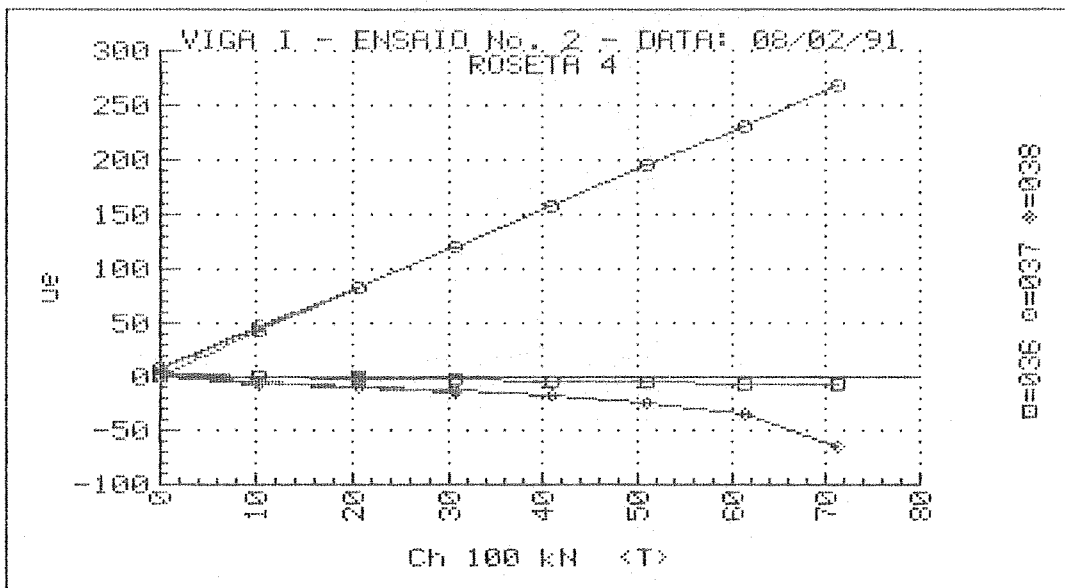
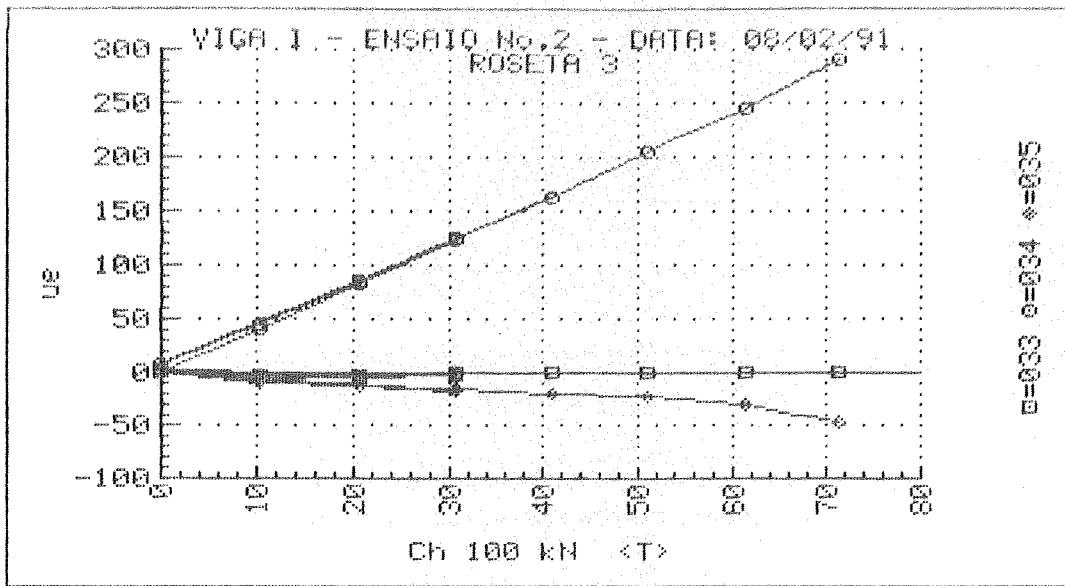
| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 10.32         | 9.64          | +0.                               | -42.                              | -9.                               | +33.                              | -42.                              | +4.7                | -7.2                | -41.8                    |
| 20.63         | 19.40         | +6.                               | -79.                              | -14.                              | +71.                              | -79.                              | +10.6               | -13.1               | -41.2                    |
| 30.83         | 29.27         | +10.                              | -115.                             | -20.                              | +107.                             | -116.                             | +16.2               | -19.0               | -41.1                    |
| 0.12          | 0.12          | +2.                               | +3.                               | +2.                               | +3.                               | +1.                               | +0.7                | +0.4                | U/C                      |
| 10.43         | 9.76          | +3.                               | -40.                              | -6.                               | +37.                              | -40.                              | +5.7                | -6.5                | -41.8                    |
| 20.63         | 19.28         | +9.                               | -76.                              | -12.                              | +73.                              | -76.                              | +11.2               | -12.3               | -41.0                    |
| 30.83         | 29.38         | +14.                              | -114.                             | -18.                              | +111.                             | -115.                             | +17.2               | -18.3               | -40.9                    |
| 40.91         | 39.02         | +19.                              | -150.                             | -25.                              | +146.                             | -152.                             | +22.7               | -24.4               | -40.8                    |
| 51.11         | 48.90         | +24.                              | -190.                             | -31.                              | +185.                             | -192.                             | +28.6               | -30.8               | -40.8                    |
| 61.20         | 58.65         | +27.                              | -232.                             | -40.                              | +222.                             | -234.                             | +34.2               | -37.8               | -40.8                    |
| 71.40         | 68.29         | +32.                              | -286.                             | -53.                              | +268.                             | -289.                             | +40.9               | -47.0               | -40.6                    |
| 0.12          | 0.00          | +7.                               | -25.                              | +0.                               | +31.                              | -25.                              | +5.4                | -3.5                | -41.6                    |

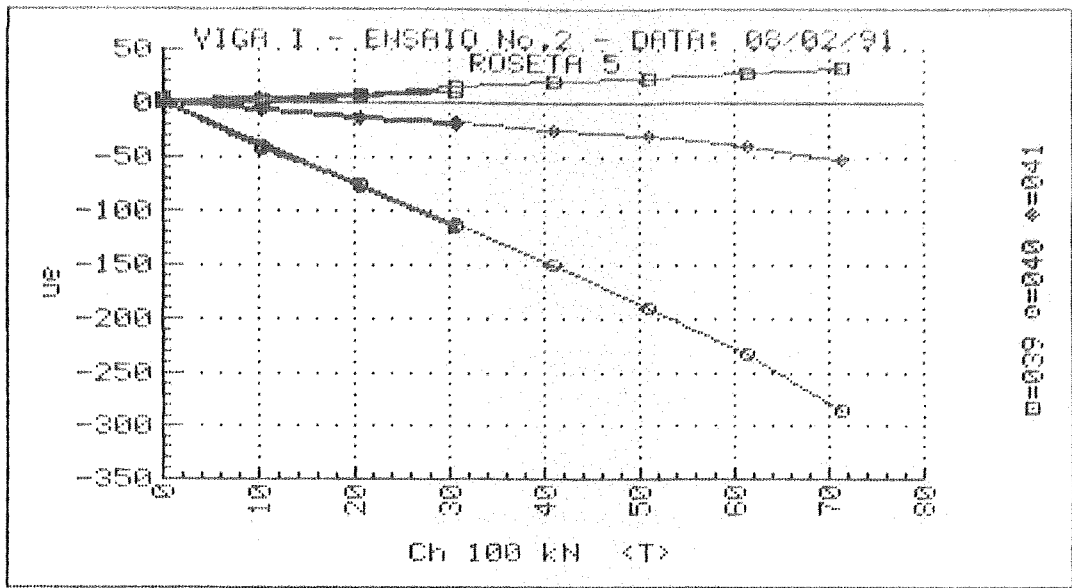














## MODELO - VIGA I

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### . ENSAIO 3

#### - DESLOCAMENTOS

.TABELAS

.GRÁFICOS

MODELO: VIGA REBITADA I

ENSAIO Nro:3

DATA: 15 DE FEVEREIRO DE 1991

HORARIO: 0:45 Hs

| ETAPA | CARGA APL<br>MEDIA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS<br>(mm) |       |       |      |       |
|-------|----------------------------|-----------------------|-------|-------|------|-------|
|       |                            | Pto 1                 | Pto 2 | Pto 3 | Pto4 | Pto 5 |
|       | 0.00                       | 0.00                  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 0.00  |
| 1     | 10.00                      | 1.62                  | 1.48  | 1.47  | 1.04 | 1.03  |
| 2     | 20.00                      | 2.87                  | 2.65  | 2.66  | 1.70 | 1.64  |
| 3     | 30.05                      | 4.24                  | 3.99  | 3.95  | 2.49 | 2.38  |
| 4     | 0.00                       | -.04                  | .01   | -.01  | .03  | -.04  |
| 5     | 10.00                      | 1.68                  | 1.48  | 1.54  | 1.05 | 1.05  |
| 6     | 20.05                      | 2.95                  | 2.71  | 2.73  | 1.74 | 1.69  |
| 7     | 30.00                      | 4.32                  | 4.00  | 4.00  | 2.49 | 2.49  |
| 8     | 40.05                      | 5.54                  | 5.20  | 5.15  | 3.12 | 3.13  |
| 9     | 50.00                      | 6.79                  | 6.42  | 6.35  | 3.83 | 3.71  |
| 10    | 59.95                      | 8.09                  | 7.65  | 7.54  | 4.49 | 4.41  |
| 11    | 70.00                      | 9.38                  | 8.89  | 8.77  | 5.20 | 5.00  |
| 12    | 80.05                      | 10.77                 | 10.22 | 10.07 | 5.90 | 5.74  |
| 13    | 90.05                      | 12.74                 | 12.06 | 11.95 | 6.86 | 6.77  |
| 14    | 99.95                      | 15.22                 | 14.37 | 14.29 | 8.07 | 7.97  |
| 15    | 106.45                     | 17.82                 | 16.82 | 16.63 | 9.25 | 9.16  |
| 16    | 105.40                     | 18.34                 | 17.33 | 17.15 | 9.47 | 9.42  |

## MODELO - VIGA I

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

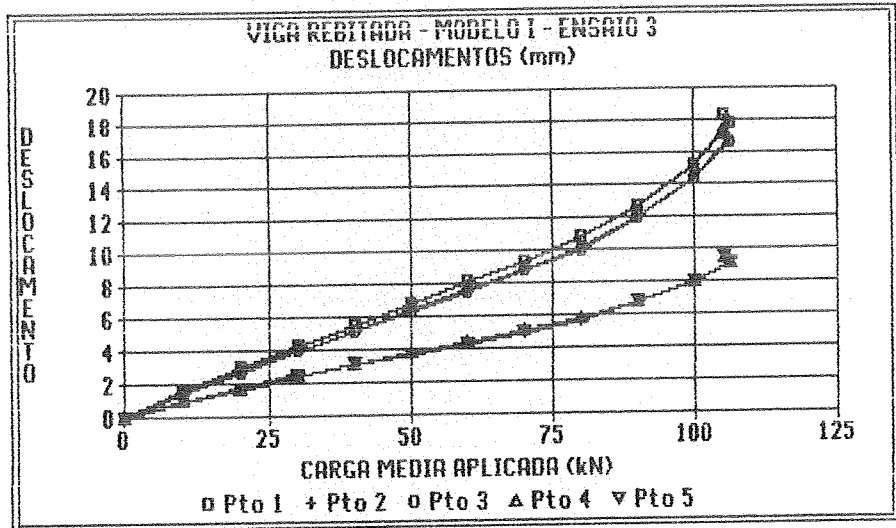
#### . ENSAIO 3

#### - DEFORMAÇÕES

#### EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA

.UNIAXIAIS

.ROSETAS



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I            ENSAIO No.3            DATA: 15/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAD 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | +0.                    | +0.                     |
| 10.08                  | 9.87                   | +110.                  | +123.                  | +146.                  | +103.                  | +97.                   | -106.                  | -121.                  | -142.                  | -91.                   | -123.                   |
| 20.40                  | 19.51                  | +229.                  | +246.                  | +287.                  | +208.                  | +194.                  | -220.                  | -243.                  | -279.                  | -183.                  | -240.                   |
| 30.72                  | 29.38                  | +349.                  | +369.                  | +425.                  | +314.                  | +290.                  | -336.                  | -369.                  | -416.                  | -277.                  | -354.                   |
| 0.00                   | 0.00                   | +2.                    | +3.                    | +3.                    | +2.                    | +3.                    | +3.                    | +3.                    | +0.                    | +2.                    | +1.                     |
| 10.20                  | 9.76                   | +109.                  | +124.                  | +151.                  | +101.                  | +99.                   | -100.                  | -119.                  | -145.                  | -88.                   | -123.                   |
| 20.52                  | 19.63                  | +229.                  | +248.                  | +291.                  | +209.                  | +195.                  | -216.                  | -242.                  | -279.                  | -181.                  | -239.                   |
| 30.72                  | 29.38                  | +351.                  | +371.                  | +426.                  | +316.                  | +292.                  | -334.                  | -367.                  | -415.                  | -275.                  | -353.                   |
| 40.80                  | 39.26                  | +471.                  | +493.                  | +560.                  | +419.                  | +384.                  | -450.                  | -489.                  | -554.                  | -368.                  | -464.                   |
| 50.88                  | 49.13                  | +593.                  | +618.                  | +698.                  | +524.                  | +477.                  | -566.                  | -614.                  | -694.                  | -462.                  | -578.                   |
| 61.08                  | 58.77                  | +717.                  | +740.                  | +832.                  | +629.                  | +565.                  | -678.                  | -737.                  | -835.                  | -556.                  | -688.                   |
| 71.04                  | 69.11                  | +843.                  | +864.                  | +969.                  | +735.                  | +655.                  | -793.                  | -862.                  | -978.                  | -650.                  | -805.                   |
| 81.01                  | 78.98                  | +972.                  | +960.                  | +1113.                 | +847.                  | +749.                  | -910.                  | -981.                  | -1126.                 | -743.                  | -931.                   |
| 91.09                  | 88.85                  | +1123.                 | +949.                  | +1329.                 | +936.                  | +842.                  | -1046.                 | -1089.                 | -1308.                 | -846.                  | -1090.                  |
| 100.94                 | 98.84                  | +1295.                 | +927.                  | +1589.                 | +1037.                 | +970.                  | -1178.                 | -1193.                 | -1500.                 | -972.                  | -1263.                  |
| 107.74                 | 105.23                 | +1390.                 | +913.                  | +1697.                 | +1095.                 | +1087.                 | -1181.                 | -1297.                 | -1523.                 | -1083.                 | -1412.                  |
| 105.98                 | 104.76                 | +1406.                 | +891.                  | +1696.                 | +1089.                 | +1098.                 | -1131.                 | -1303.                 | -1490.                 | -1089.                 | -1441.                  |
| 0.12                   | 0.12                   | +131.                  | -391.                  | +211.                  | -10.                   | +119.                  | -65.                   | -2.                    | +66.                   | -130.                  | -79.                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I            ENSAIO No.3            DATA: 15/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAD 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                     |
| 10.08                  | 9.87                   | +68.                   | +82.                   | +97.                   | +72.                   | +65.                   | -65.                   | -80.                   | -98.                   | -57.                   | -81.                    |
| 20.40                  | 19.51                  | +141.                  | +164.                  | +189.                  | +147.                  | +131.                  | -141.                  | -161.                  | -186.                  | -116.                  | -158.                   |
| 30.72                  | 29.38                  | +213.                  | +247.                  | +281.                  | +220.                  | +197.                  | -221.                  | -242.                  | -273.                  | -177.                  | -235.                   |
| 0.00                   | 0.00                   | +3.                    | +3.                    | +4.                    | +4.                    | +3.                    | +4.                    | +3.                    | +2.                    | +3.                    | +2.                     |
| 10.20                  | 9.76                   | +68.                   | +84.                   | +101.                  | +72.                   | +68.                   | -60.                   | -78.                   | -97.                   | -55.                   | -80.                    |
| 20.52                  | 19.63                  | +140.                  | +166.                  | +193.                  | +147.                  | +133.                  | -139.                  | -160.                  | -186.                  | -115.                  | -158.                   |
| 30.72                  | 29.38                  | +214.                  | +248.                  | +283.                  | +221.                  | +198.                  | -220.                  | -241.                  | -271.                  | -176.                  | -234.                   |
| 40.80                  | 39.26                  | +284.                  | +328.                  | +373.                  | +294.                  | +262.                  | -299.                  | -323.                  | -357.                  | -238.                  | -308.                   |
| 50.88                  | 49.13                  | +355.                  | +411.                  | +469.                  | +367.                  | +328.                  | -380.                  | -405.                  | -442.                  | -299.                  | -383.                   |
| 61.08                  | 58.77                  | +426.                  | +492.                  | +563.                  | +439.                  | +394.                  | -461.                  | -487.                  | -527.                  | -361.                  | -457.                   |
| 71.04                  | 69.11                  | +497.                  | +574.                  | +661.                  | +510.                  | +460.                  | -543.                  | -568.                  | -611.                  | -424.                  | -532.                   |
| 81.01                  | 78.98                  | +569.                  | +658.                  | +759.                  | +583.                  | +519.                  | -623.                  | -651.                  | -699.                  | -486.                  | -607.                   |
| 91.09                  | 88.85                  | +644.                  | +743.                  | +887.                  | +647.                  | +573.                  | -704.                  | -734.                  | -799.                  | -546.                  | -690.                   |
| 100.94                 | 98.84                  | +703.                  | +824.                  | +1141.                 | +705.                  | +636.                  | -791.                  | -817.                  | -881.                  | -606.                  | -779.                   |
| 107.74                 | 105.23                 | +717.                  | +856.                  | +1477.                 | +735.                  | +689.                  | -887.                  | -876.                  | -898.                  | -652.                  | -824.                   |
| 105.98                 | 104.76                 | +696.                  | +838.                  | +1575.                 | +725.                  | +687.                  | -875.                  | -867.                  | -882.                  | -645.                  | -817.                   |
| 0.12                   | 0.12                   | +17.                   | -35.                   | +471.                  | -5.                    | -15.                   | -66.                   | -7.                    | +57.                   | -15.                   | -13.                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I            ENSAIO No.3            DATA: 15/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAD 3

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    |
| 10.08                  | 9.87                   | +68.                   | +83.                   | +68.                   | -82.                   | -85.                   | -65.                   |
| 20.40                  | 19.51                  | +137.                  | +166.                  | +136.                  | -166.                  | -166.                  | -129.                  |
| 30.72                  | 29.38                  | +209.                  | +250.                  | +206.                  | -252.                  | -246.                  | -195.                  |
| 0.00                   | 0.00                   | +2.                    | +2.                    | +2.                    | +2.                    | +1.                    | +2.                    |
| 10.20                  | 9.76                   | +66.                   | +84.                   | +67.                   | -81.                   | -88.                   | -64.                   |
| 20.52                  | 19.63                  | +138.                  | +167.                  | +138.                  | -165.                  | -166.                  | -128.                  |
| 30.72                  | 29.38                  | +211.                  | +251.                  | +208.                  | -251.                  | -246.                  | -193.                  |
| 40.80                  | 39.26                  | +282.                  | +335.                  | +276.                  | -336.                  | -324.                  | -258.                  |
| 50.88                  | 49.13                  | +354.                  | +421.                  | +347.                  | -423.                  | -402.                  | -323.                  |
| 61.08                  | 58.77                  | +425.                  | +506.                  | +415.                  | -508.                  | -477.                  | -387.                  |
| 71.04                  | 69.11                  | +499.                  | +594.                  | +486.                  | -596.                  | -553.                  | -449.                  |
| 81.01                  | 78.98                  | +577.                  | +686.                  | +558.                  | -682.                  | -623.                  | -505.                  |
| 91.09                  | 88.85                  | +657.                  | +786.                  | +620.                  | -769.                  | -693.                  | -561.                  |
| 100.94                 | 98.84                  | +730.                  | +869.                  | +683.                  | -858.                  | -724.                  | -615.                  |
| 107.74                 | 105.23                 | +765.                  | +906.                  | +718.                  | -931.                  | -668.                  | -649.                  |
| 105.98                 | 104.76                 | +751.                  | +893.                  | +709.                  | -932.                  | -605.                  | -642.                  |
| 0.12                   | 0.12                   | +18.                   | -12.                   | -6.                    | -33.                   | +45.                   | -11.                   |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I ENSAIO No.3 DATA: 15/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 1

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_A$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_B$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_C$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +1.                               | +0.                               | +1.                               | -1.                               | +0.1                | -0.1                | U/C                      |
| 10.08         | 9.87          | -1.                               | +36.                              | -5.                               | +36.                              | -42.                              | +5.3                | -7.0                | +43.6                    |
| 20.40         | 19.51         | -3.                               | +70.                              | -9.                               | +70.                              | -82.                              | +10.2               | -13.8               | +43.8                    |
| 30.72         | 29.38         | -4.                               | +103.                             | -15.                              | +103.                             | -122.                             | +15.0               | -20.5               | +43.6                    |
| 0.00          | 0.00          | +3.                               | +4.                               | +3.                               | +4.                               | +2.                               | +1.0                | +0.7                | U/C                      |
| 10.20         | 9.76          | +2.                               | +39.                              | -3.                               | +39.                              | -40.                              | +6.1                | -6.3                | +43.3                    |
| 20.52         | 19.63         | +0.                               | +73.                              | -8.                               | +73.                              | -80.                              | +11.0               | -13.2               | +43.6                    |
| 30.72         | 29.38         | -2.                               | +105.                             | -13.                              | +105.                             | -120.                             | +15.5               | -20.0               | +43.6                    |
| 40.80         | 39.26         | -3.                               | +138.                             | -20.                              | +138.                             | -161.                             | +20.3               | -26.9               | +43.4                    |
| 50.88         | 49.13         | -2.                               | +173.                             | -26.                              | +173.                             | -201.                             | +25.5               | -33.5               | +43.2                    |
| 61.08         | 58.77         | +0.                               | +208.                             | -33.                              | +209.                             | -242.                             | +30.7               | -40.4               | +42.9                    |
| 71.04         | 69.11         | +3.                               | +245.                             | -44.                              | +246.                             | -287.                             | +36.0               | -47.9               | +42.5                    |
| 81.01         | 78.98         | +9.                               | +284.                             | -56.                              | +285.                             | -333.                             | +41.8               | -55.6               | +42.0                    |
| 91.09         | 88.85         | +16.                              | +326.                             | -71.                              | +329.                             | -384.                             | +48.2               | -64.2               | +41.5                    |
| 100.94        | 98.84         | +29.                              | +382.                             | -96.                              | +387.                             | -454.                             | +56.4               | -76.1               | +40.7                    |
| 107.74        | 105.23        | +38.                              | +436.                             | -129.                             | +443.                             | -534.                             | +63.7               | -90.3               | +40.1                    |
| 105.98        | 104.76        | +44.                              | +451.                             | -140.                             | +459.                             | -556.                             | +65.9               | -94.2               | +39.8                    |
| 0.12          | 0.12          | +44.                              | +40.                              | -17.                              | +54.                              | -27.                              | +10.4               | -2.3                | +20.1                    |



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I ENSAIO No.3 DATA: 15/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 2

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +1.                               | +1.                               | -0.                               | +0.2                | +0.0                | U/C                      |
| 10.08         | 9.87          | +3.                               | +40.                              | -6.                               | +40.                              | -43.                              | +6.1                | -6.9                | +42.0                    |
| 20.40         | 19.51         | +4.                               | +77.                              | -13.                              | +77.                              | -87.                              | +11.5               | -14.3               | +42.0                    |
| 30.72         | 29.38         | +5.                               | +113.                             | -22.                              | +113.                             | -130.                             | +16.7               | -21.7               | +41.9                    |
| 0.00          | 0.00          | +2.                               | +3.                               | +3.                               | +3.                               | +2.                               | +0.8                | +0.6                | U/C                      |
| 10.20         | 9.76          | +4.                               | +43.                              | -4.                               | +43.                              | -43.                              | +6.7                | -6.7                | +42.5                    |
| 20.52         | 19.63         | +5.                               | +79.                              | -12.                              | +80.                              | -87.                              | +12.1               | -14.3               | +42.1                    |
| 30.72         | 29.38         | +6.                               | +114.                             | -21.                              | +114.                             | -129.                             | +17.0               | -21.4               | +41.9                    |
| 40.80         | 39.26         | +8.                               | +149.                             | -29.                              | +150.                             | -171.                             | +22.1               | -28.5               | +41.7                    |
| 50.88         | 49.13         | +10.                              | +184.                             | -39.                              | +186.                             | -214.                             | +27.4               | -35.7               | +41.5                    |
| 61.08         | 58.77         | +12.                              | +219.                             | -49.                              | +221.                             | -257.                             | +32.3               | -43.1               | +41.3                    |
| 71.04         | 69.11         | +15.                              | +254.                             | -61.                              | +257.                             | -302.                             | +37.5               | -50.8               | +41.1                    |
| 81.01         | 78.98         | +18.                              | +289.                             | -73.                              | +293.                             | -348.                             | +42.4               | -58.5               | +40.9                    |
| 91.09         | 88.85         | +21.                              | +324.                             | -89.                              | +328.                             | -396.                             | +47.1               | -67.0               | +40.6                    |
| 100.94        | 98.84         | +24.                              | +362.                             | -111.                             | +368.                             | -455.                             | +52.1               | -77.6               | +40.3                    |
| 107.74        | 105.23        | +26.                              | +391.                             | -138.                             | +398.                             | -510.                             | +55.3               | -87.9               | +39.8                    |
| 105.98        | 104.76        | +26.                              | +393.                             | -147.                             | +401.                             | -521.                             | +55.1               | -90.3               | +39.6                    |
| 0.12          | 0.12          | +6.                               | +26.                              | -5.                               | +27.                              | -26.                              | +4.3                | -4.0                | +39.3                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I            ENSAIO No.3            DATA: 15/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 3

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | -0.                    | +0.2                    | +0.0                    | U/C      |
| 10.08                  | 9.87                   | +4.                    | +46.                   | -2.                    | +46.                   | -45.                   | +7.5                    | -6.9                    | +43.2    |
| 20.40                  | 19.51                  | +4.                    | +86.                   | -9.                    | +86.                   | -91.                   | +13.3                   | -14.7                   | +43.0    |
| 30.72                  | 29.38                  | +5.                    | +125.                  | -16.                   | +125.                  | -137.                  | +19.0                   | -22.3                   | +42.7    |
| 0.00                   | 0.00                   | +2.                    | +3.                    | +3.                    | +3.                    | +2.                    | +0.8                    | +0.6                    | U/C      |
| 10.20                  | 9.76                   | +5.                    | +49.                   | +0.                    | +49.                   | -45.                   | +8.1                    | -6.7                    | +43.6    |
| 20.52                  | 19.63                  | +6.                    | +89.                   | -8.                    | +89.                   | -91.                   | +13.9                   | -14.5                   | +42.9    |
| 30.72                  | 29.38                  | +6.                    | +127.                  | -15.                   | +127.                  | -137.                  | +19.4                   | -22.2                   | +42.7    |
| 40.80                  | 39.26                  | +6.                    | +164.                  | -23.                   | +164.                  | -181.                  | +24.8                   | -29.8                   | +42.6    |
| 50.88                  | 49.13                  | +8.                    | +203.                  | -31.                   | +204.                  | -228.                  | +30.6                   | -37.6                   | +42.4    |
| 61.08                  | 58.77                  | +8.                    | +240.                  | -42.                   | +242.                  | -276.                  | +35.8                   | -45.8                   | +42.3    |
| 71.04                  | 69.11                  | +7.                    | +277.                  | -54.                   | +279.                  | -326.                  | +40.8                   | -54.6                   | +42.1    |
| 81.01                  | 78.98                  | +6.                    | +314.                  | -68.                   | +316.                  | -379.                  | +45.6                   | -63.9                   | +41.9    |
| 91.09                  | 88.85                  | +4.                    | +350.                  | -86.                   | +353.                  | -435.                  | +50.1                   | -74.2                   | +41.7    |
| 100.94                 | 98.84                  | -1.                    | +384.                  | -118.                  | +388.                  | -507.                  | +53.1                   | -88.1                   | +41.2    |
| 107.74                 | 105.23                 | -9.                    | +402.                  | -163.                  | +408.                  | -581.                  | +52.7                   | -103.2                  | +40.5    |
| 105.98                 | 104.76                 | -13.                   | +398.                  | -180.                  | +404.                  | -598.                  | +50.7                   | -107.3                  | +40.2    |
| 0.12                   | 0.12                   | +8.                    | +31.                   | +0.                    | +31.                   | -24.                   | +5.5                    | -3.3                    | +41.1    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

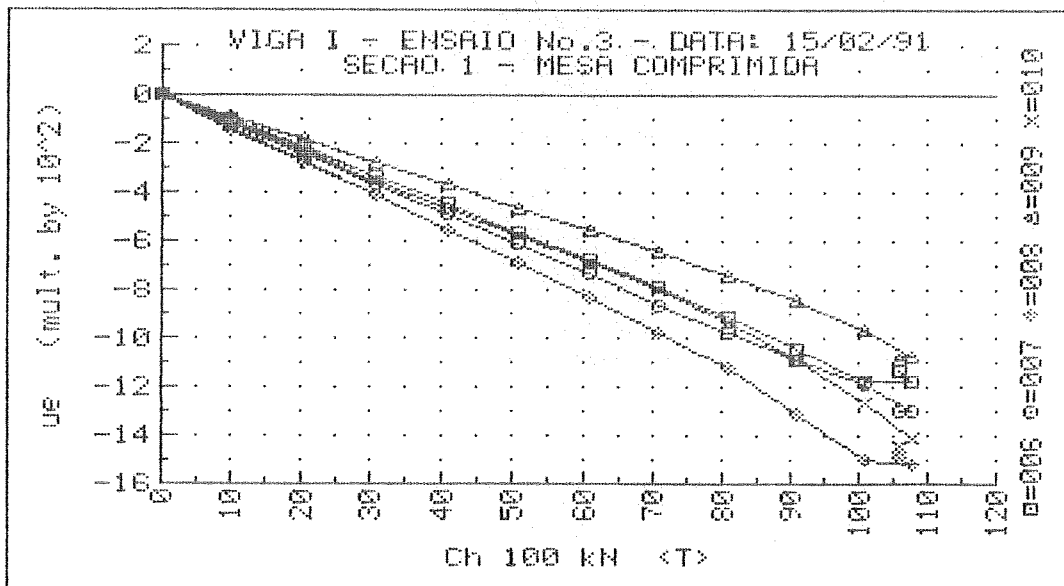
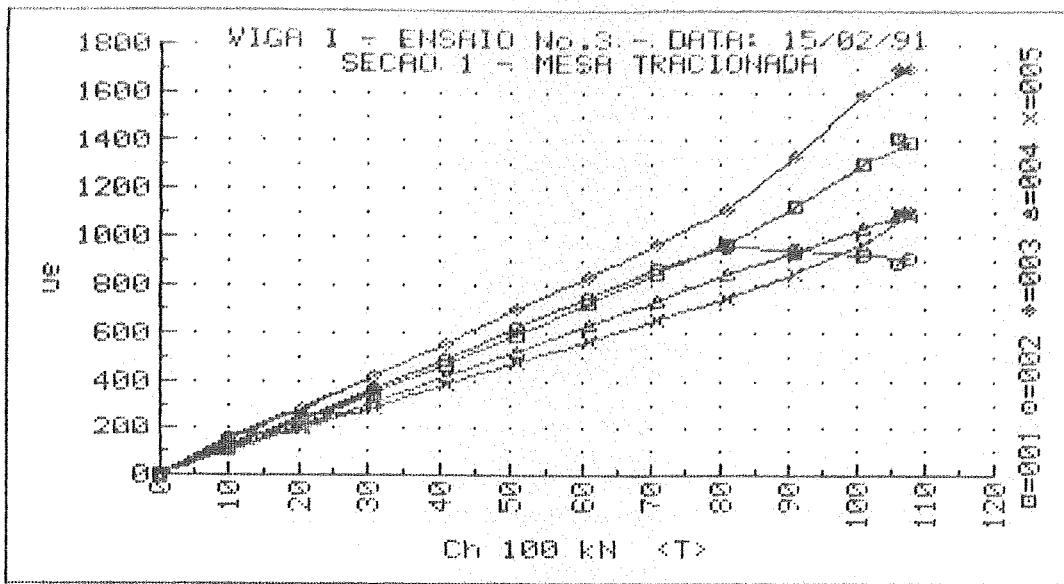
ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I            ENSAIO No.3            DATA: 15/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 4

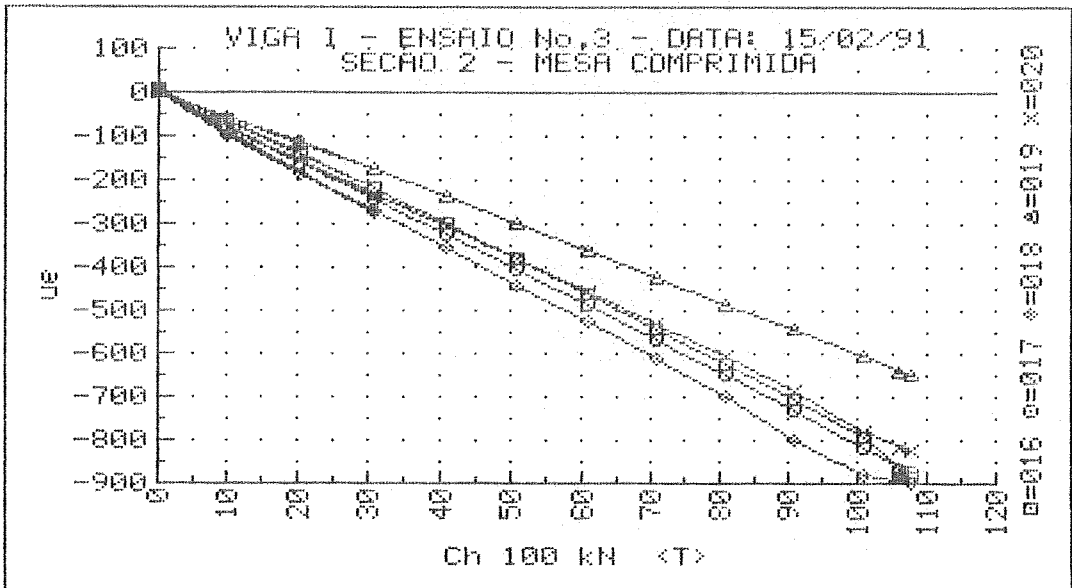
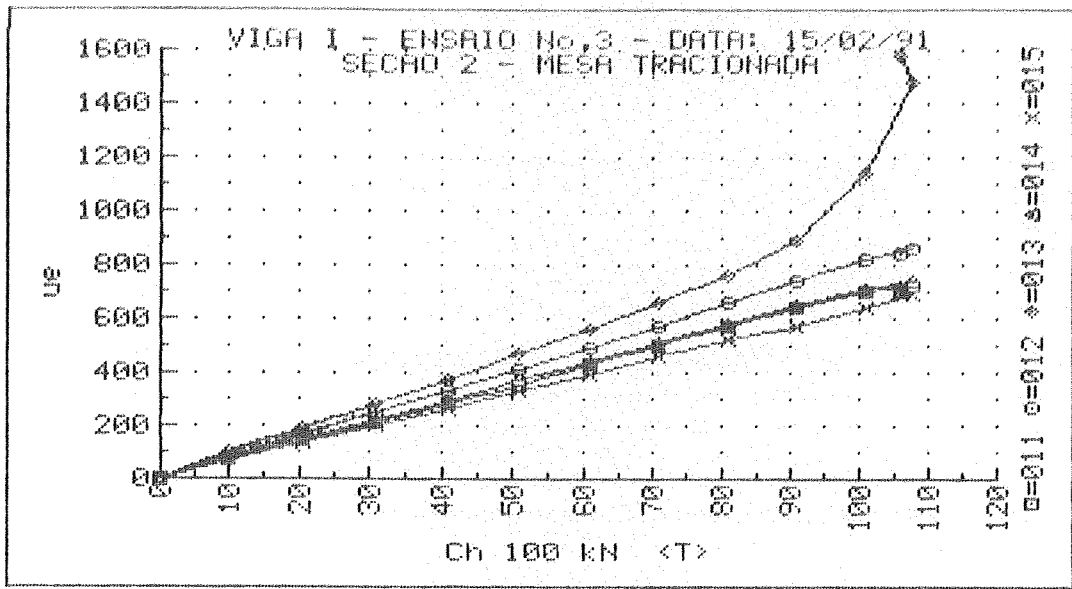
| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(μE) | ε <sub>b</sub><br>(μE) | ε <sub>c</sub><br>(μE) | ε <sub>1</sub><br>(μE) | ε <sub>2</sub><br>(μE) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | α<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.0                    | +0.0                    | U/C      |
| 10.08                  | 9.87                   | -2.                    | +37.                   | -9.                    | +37.                   | -47.                   | +5.1                    | -8.2                    | +42.8    |
| 20.40                  | 19.51                  | -5.                    | +73.                   | -18.                   | +73.                   | -96.                   | +10.0                   | -16.6                   | +42.8    |
| 30.72                  | 29.38                  | -7.                    | +107.                  | -29.                   | +107.                  | -143.                  | +14.5                   | -25.0                   | +42.4    |
| 0.00                   | 0.00                   | +2.                    | +2.                    | +2.                    | +2.                    | +2.                    | +0.6                    | +0.6                    | U/C      |
| 10.20                  | 9.76                   | -1.                    | +40.                   | -8.                    | +40.                   | -48.                   | +5.7                    | -8.2                    | +42.8    |
| 20.52                  | 19.63                  | -3.                    | +75.                   | -18.                   | +75.                   | -96.                   | +10.4                   | -16.5                   | +42.5    |
| 30.72                  | 29.38                  | -6.                    | +109.                  | -28.                   | +109.                  | -143.                  | +14.9                   | -24.9                   | +42.4    |
| 40.80                  | 39.26                  | -9.                    | +142.                  | -41.                   | +143.                  | -192.                  | +19.2                   | -33.6                   | +42.2    |
| 50.88                  | 49.13                  | -11.                   | +175.                  | -55.                   | +176.                  | -242.                  | +23.3                   | -42.7                   | +42.0    |
| 61.08                  | 58.77                  | -14.                   | +207.                  | -71.                   | +209.                  | -294.                  | +27.2                   | -52.1                   | +41.8    |
| 71.04                  | 69.11                  | -17.                   | +239.                  | -91.                   | +242.                  | -349.                  | +30.8                   | -62.4                   | +41.4    |
| 81.01                  | 78.98                  | -20.                   | +270.                  | -113.                  | +274.                  | -406.                  | +34.2                   | -73.0                   | +41.1    |
| 91.09                  | 88.85                  | -11.                   | +304.                  | -145.                  | +310.                  | -466.                  | +38.4                   | -84.1                   | +40.1    |
| 100.94                 | 98.84                  | -7.                    | +334.                  | -201.                  | +344.                  | -553.                  | +40.3                   | -101.2                  | +38.7    |
| 107.74                 | 105.23                 | -10.                   | +338.                  | -290.                  | +358.                  | -659.                  | +36.1                   | -124.2                  | +37.0    |
| 105.98                 | 104.76                 | -13.                   | +330.                  | -322.                  | +353.                  | -688.                  | +33.1                   | -131.2                  | +36.4    |
| 0.12                   | 0.12                   | +31.                   | +37.                   | -29.                   | +48.                   | -46.                   | +7.7                    | -7.1                    | +24.9    |

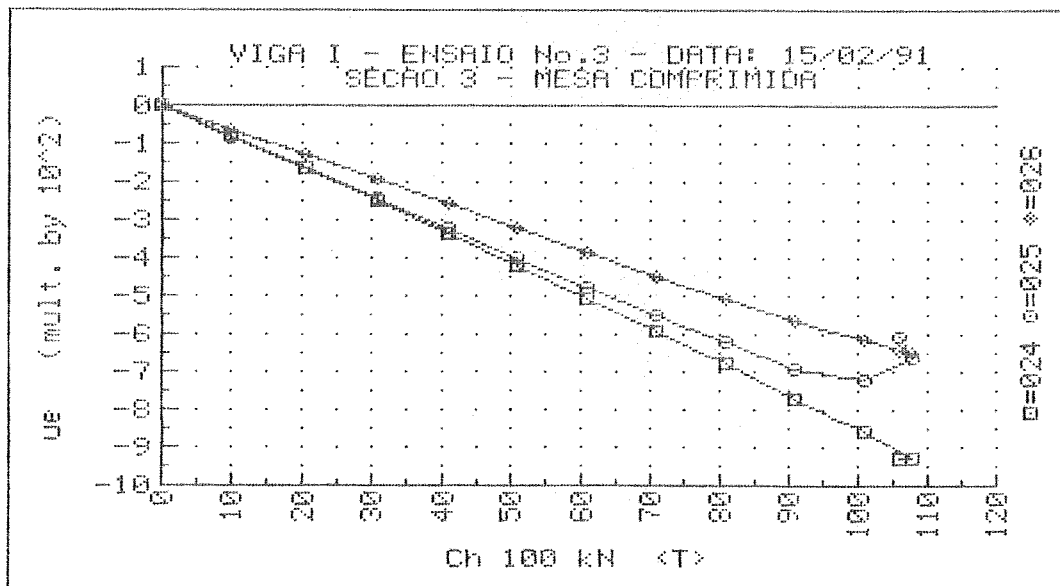
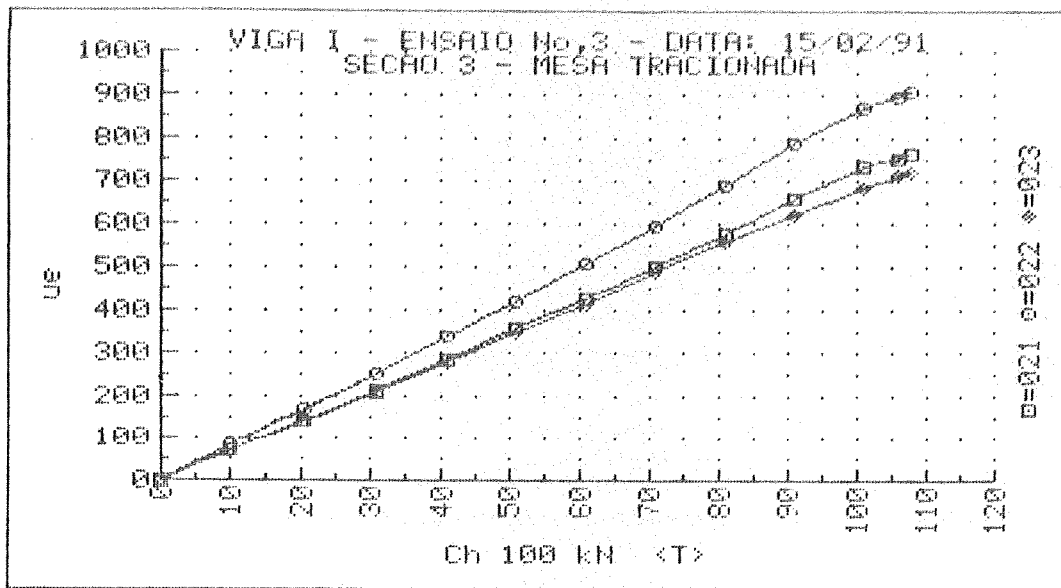
UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

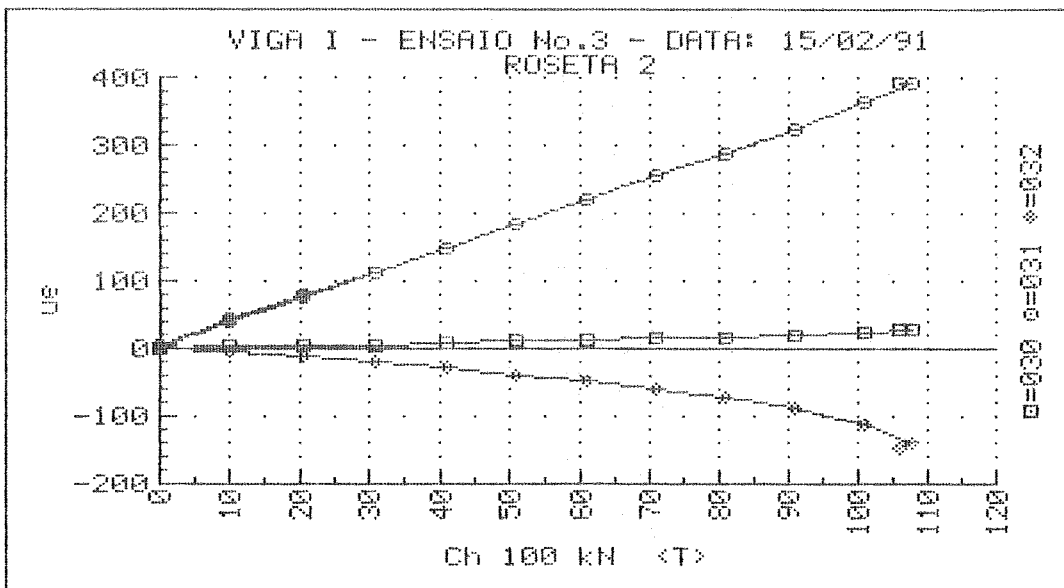
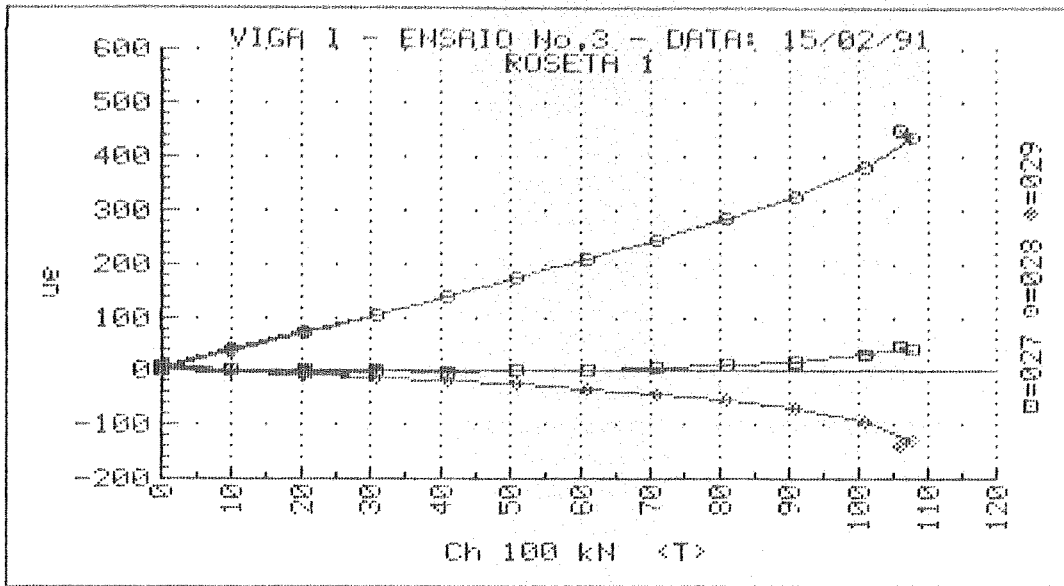
ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA I            ENSAIO No.3            DATA: 15/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 5

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(μE) | ε <sub>b</sub><br>(μE) | ε <sub>c</sub><br>(μE) | ε <sub>1</sub><br>(μE) | ε <sub>2</sub><br>(μE) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.0                    | +0.0                    | U/C      |
| 10.08                  | 9.87                   | +7.                    | -40.                   | -8.                    | +39.                   | -40.                   | +6.2                    | -6.4                    | -39.9    |
| 20.40                  | 19.51                  | +13.                   | -78.                   | -15.                   | +77.                   | -79.                   | +12.0                   | -12.6                   | -39.8    |
| 30.72                  | 29.38                  | +20.                   | -115.                  | -23.                   | +115.                  | -117.                  | +17.9                   | -18.7                   | -39.7    |
| 0.00                   | 0.00                   | +3.                    | +3.                    | +2.                    | +3.                    | +2.                    | +0.8                    | +0.6                    | U/C      |
| 10.20                  | 9.76                   | +9.                    | -39.                   | -6.                    | +42.                   | -39.                   | +6.9                    | -6.0                    | -40.0    |
| 20.52                  | 19.63                  | +15.                   | -77.                   | -13.                   | +80.                   | -78.                   | +12.7                   | -12.2                   | -39.8    |
| 30.72                  | 29.38                  | +21.                   | -114.                  | -22.                   | +115.                  | -116.                  | +18.1                   | -18.4                   | -39.7    |
| 40.80                  | 39.26                  | +26.                   | -152.                  | -30.                   | +150.                  | -155.                  | +23.4                   | -24.7                   | -39.7    |
| 50.88                  | 49.13                  | +31.                   | -191.                  | -39.                   | +187.                  | -194.                  | +28.9                   | -31.2                   | -39.7    |
| 61.08                  | 58.77                  | +36.                   | -231.                  | -48.                   | +222.                  | -235.                  | +34.2                   | -37.8                   | -39.7    |
| 71.04                  | 69.11                  | +42.                   | -272.                  | -60.                   | +259.                  | -277.                  | +39.7                   | -44.9                   | -39.6    |
| 81.01                  | 78.98                  | +46.                   | -312.                  | -70.                   | +294.                  | -318.                  | +44.8                   | -51.7                   | -39.5    |
| 91.09                  | 88.85                  | +50.                   | -354.                  | -83.                   | +327.                  | -360.                  | +49.4                   | -59.1                   | -39.4    |
| 100.94                 | 98.84                  | +55.                   | -396.                  | -97.                   | +361.                  | -404.                  | +54.1                   | -66.6                   | -39.3    |
| 107.74                 | 105.23                 | +60.                   | -426.                  | -110.                  | +384.                  | -435.                  | +57.2                   | -71.9                   | -39.0    |
| 105.98                 | 104.76                 | +60.                   | -425.                  | -113.                  | +381.                  | -434.                  | +56.5                   | -72.0                   | -38.9    |
| 0.12                   | 0.12                   | +6.                    | -5.                    | -2.                    | +10.                   | -6.                    | +1.8                    | -0.6                    | -30.1    |

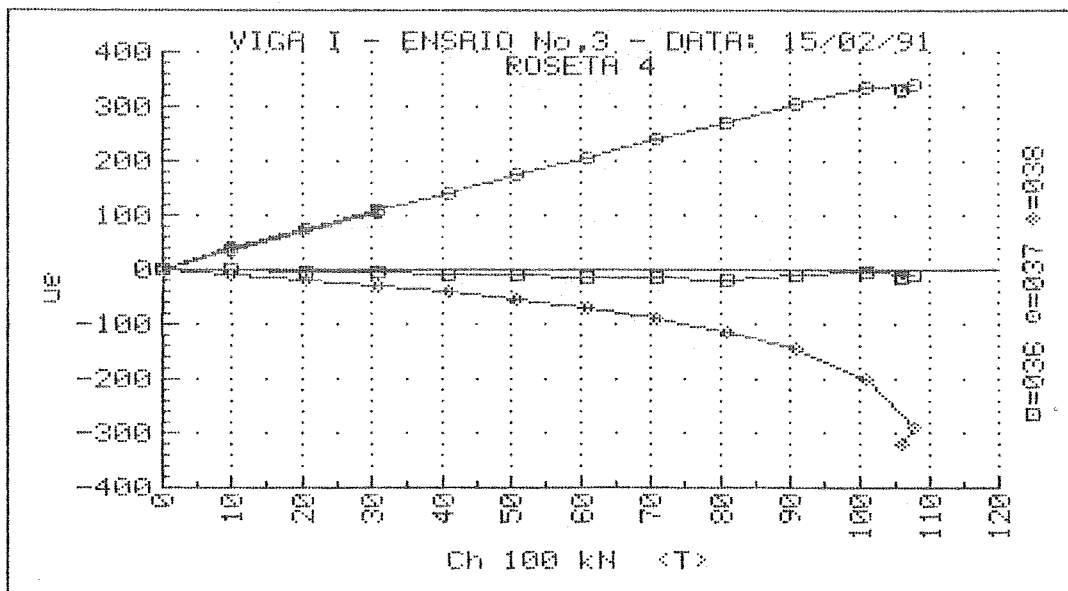
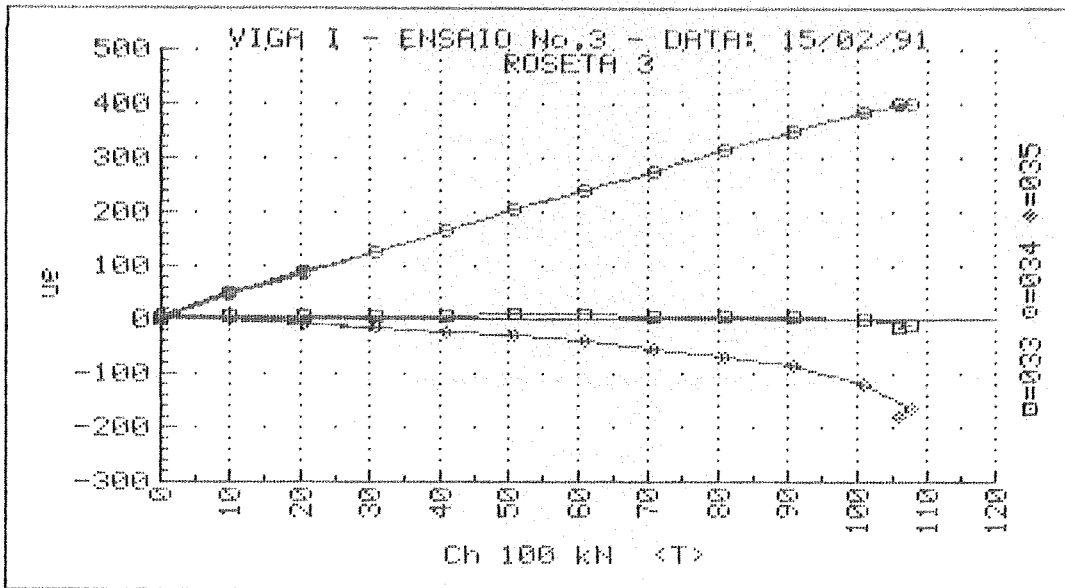


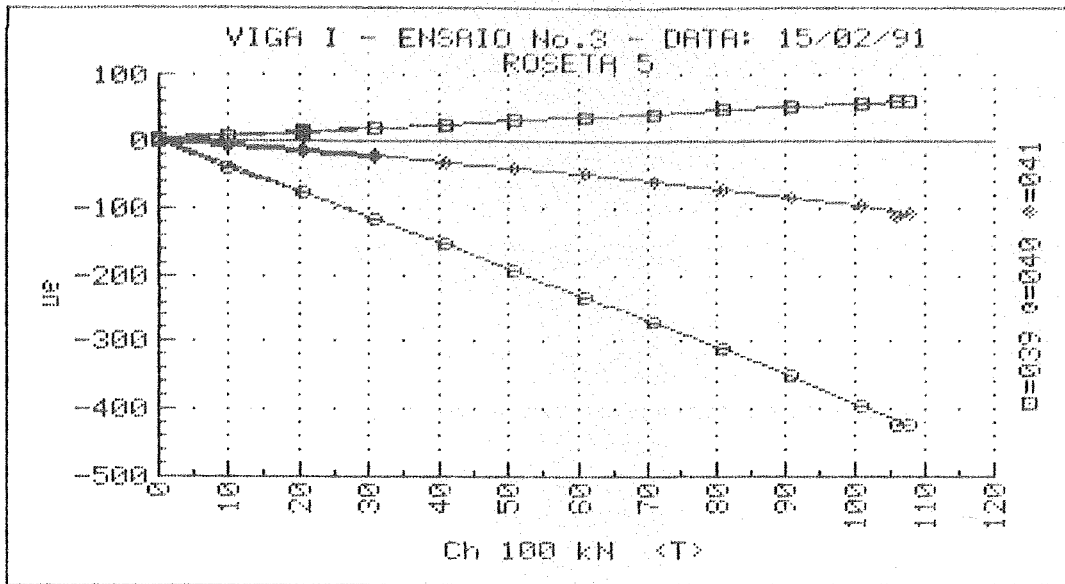












## MODELO - VIGA II

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

- . ENSAIO 1
- . ENSAIO 2

- DESLOCAMENTOS

- DEFORMAÇÕES

## MODELO - VIGA II

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### . ENSAIO 1

#### - DESLOCAMENTOS

#### .TABELAS

#### .GRÁFICOS

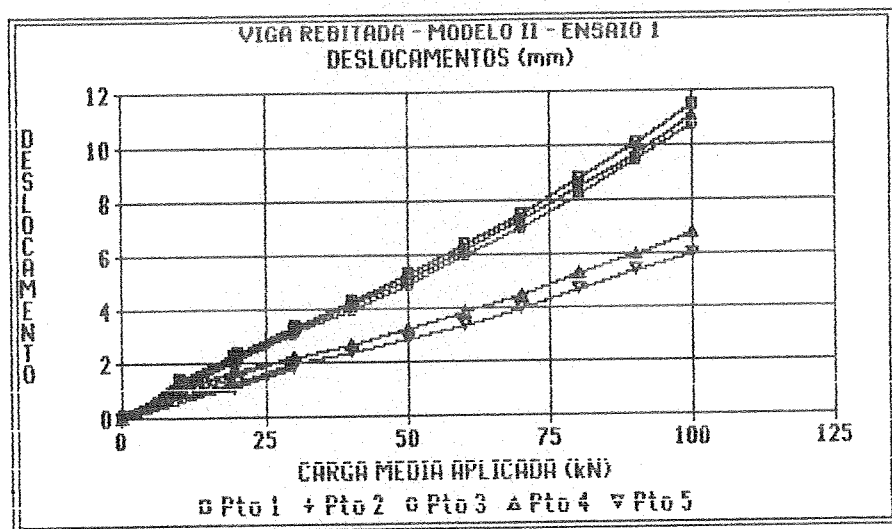
MODELO: VIGA REBITADA II

ENSAIO Nro:1

DATA: 19 DE FEVEREIRO DE 1991

HORARIO: 8:45 Hs

| ETAPA | CARGA APL<br>MEDIA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS<br>(mm) |       |       |      |       |
|-------|----------------------------|-----------------------|-------|-------|------|-------|
|       |                            | Pto 1                 | Pto 2 | Pto 3 | Pto4 | Pto 5 |
|       | 0.00                       | 0.00                  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 0.00  |
| 1     | 9.90                       | 1.35                  | 1.29  | 1.28  | 1.07 | .78   |
| 2     | 19.45                      | 2.25                  | 2.18  | 2.06  | 1.67 | 1.12  |
| 3     | 29.85                      | 3.29                  | 3.16  | 3.08  | 2.18 | 1.79  |
| 4     | .05                        | -.02                  | -.03  | .06   | .05  | -.11  |
| 5     | 9.95                       | 1.29                  | 1.26  | 1.15  | .96  | .76   |
| 6     | 20.00                      | 2.35                  | 2.29  | 2.10  | 1.66 | 1.31  |
| 7     | 30.00                      | 3.42                  | 3.28  | 3.15  | 2.20 | 2.03  |
| 8     | 40.05                      | 4.35                  | 4.20  | 4.02  | 2.73 | 2.43  |
| 9     | 49.95                      | 5.29                  | 5.13  | 4.91  | 3.27 | 2.86  |
| 10    | 59.95                      | 6.39                  | 6.17  | 5.97  | 3.91 | 3.40  |
| 11    | 70.05                      | 7.52                  | 7.26  | 7.02  | 4.53 | 3.99  |
| 12    | 80.05                      | 8.79                  | 8.49  | 8.23  | 5.27 | 4.67  |
| 13    | 89.95                      | 10.07                 | 9.72  | 9.45  | 6.00 | 5.35  |
| 14    | 100.05                     | 11.48                 | 11.08 | 10.79 | 6.78 | 6.04  |



MODELO - VIGA II

RESULTADOS DOS ENSAIOS

ENSAIO 1

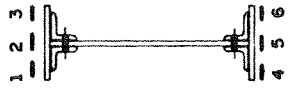
- DEFORMAÇÕES

EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA

.UNIAXIAIS

.ROSETAS

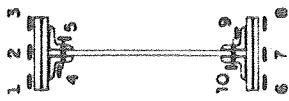
Seção 4



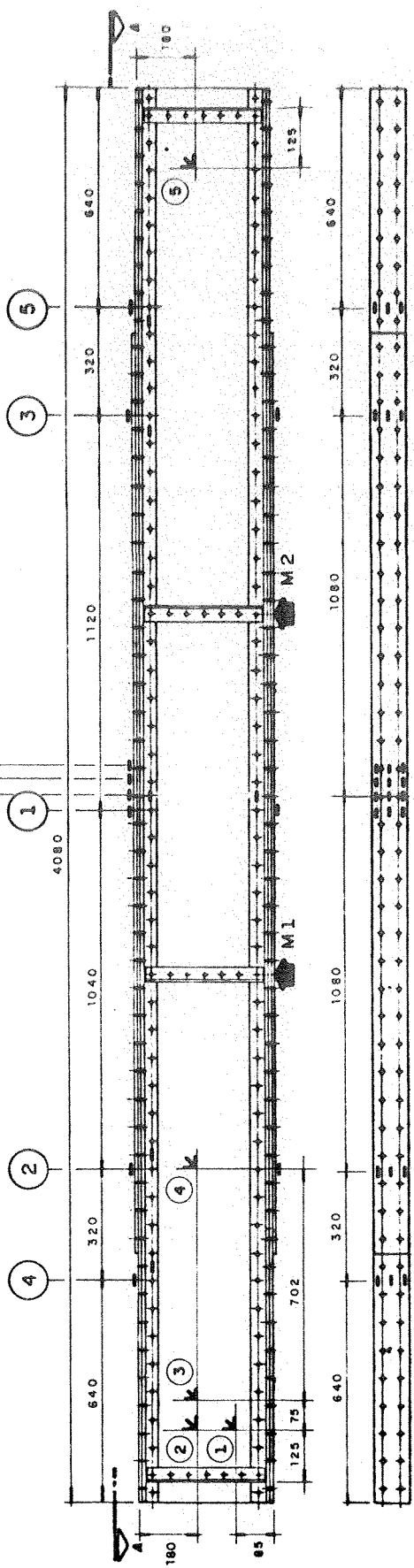
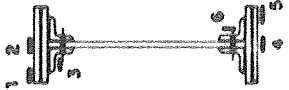
Seção 5



Seções 1 e 2



Seção 3



VISTA A

NOTA: AS SEÇÕES 6, 7 E 8 EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA SOMENTE NA MESA TRACIONADA E NUMERADOS DE MANEIRA IGUAL A SEÇÃO 1



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.1 DATA: 19/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECao 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>(μE) | 2<br>(μE) | 3<br>(μE) | 4<br>(μE) | 5<br>(μE) | 6<br>(μE) | 7<br>(μE) | 8<br>(μE) | 9<br>(μE) | 10<br>(μE) |
|------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 20.28                  | 19.28                  | +200.     | +185.     | +174.     | +161.     | +134.     | -189.     | -180.     | -183.     | -147.     | -133.      |
| 30.72                  | 29.15                  | +303.     | +280.     | +263.     | +243.     | +202.     | -287.     | -274.     | -280.     | -219.     | -202.      |
| 0.00                   | 0.00                   | +6.       | +4.       | +4.       | +3.       | +5.       | +0.       | +1.       | +0.       | +5.       | +1.        |
| 0.12                   | 0.00                   | +6.       | +4.       | +4.       | +3.       | +5.       | +0.       | +1.       | +0.       | +5.       | +1.        |
| 10.32                  | 9.76                   | +104.     | +97.      | +91.      | +83.      | +71.      | -96.      | -90.      | -92.      | -69.      | -66.       |
| 20.52                  | 19.40                  | +203.     | +189.     | +178.     | +164.     | +138.     | -191.     | -181.     | -184.     | -143.     | -132.      |
| 30.72                  | 29.15                  | +304.     | +282.     | +265.     | +244.     | +204.     | -286.     | -272.     | -278.     | -217.     | -200.      |
| 41.27                  | 38.79                  | +408.     | +378.     | +358.     | +324.     | +272.     | -381.     | -364.     | -372.     | -287.     | -264.      |
| 51.58                  | 48.32                  | +511.     | +471.     | +448.     | +401.     | +333.     | -476.     | -454.     | -465.     | -358.     | -327.      |
| 61.66                  | 58.19                  | +616.     | +564.     | +544.     | +480.     | +392.     | -572.     | -542.     | -563.     | -428.     | -391.      |
| 71.86                  | 68.18                  | +720.     | +659.     | +646.     | +562.     | +452.     | -671.     | -627.     | -662.     | -503.     | -455.      |
| 81.83                  | 78.28                  | +822.     | +755.     | +751.     | +652.     | +513.     | -772.     | -707.     | -765.     | -578.     | -521.      |
| 91.68                  | 88.04                  | +914.     | +849.     | +851.     | +743.     | +573.     | -870.     | -782.     | -869.     | -652.     | -586.      |
| 101.76                 | 98.14                  | +1002.    | +946.     | +956.     | +846.     | +637.     | -972.     | -850.     | -988.     | -736.     | -658.      |
| 0.12                   | 0.00                   | +39.      | +21.      | +55.      | +55.      | -29.      | -16.      | +70.      | -52.      | -11.      | +7.        |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.1 DATA: 19/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>(µε) | 2<br>(µε) | 3<br>(µε) | 4<br>(µε) | 5<br>(µε) | 6<br>(µε) | 7<br>(µε) | 8<br>(µε) | 9<br>(µε) | 10<br>(µε) |
|------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 20.28                  | 19.28                  | +118.     | +119.     | +121.     | +102.     | +98.      | -131.     | -118.     | -111.     | -92.      | -90.       |
| 30.72                  | 29.15                  | +179.     | +180.     | +183.     | +154.     | +151.     | -201.     | -180.     | -166.     | -139.     | -137.      |
| 0.00                   | 0.00                   | +4.       | +3.       | +4.       | +3.       | +7.       | +0.       | +2.       | +2.       | +2.       | -1.        |
| 0.12                   | 0.00                   | +4.       | +3.       | +4.       | +4.       | +7.       | +0.       | +2.       | +2.       | +2.       | -1.        |
| 10.32                  | 9.76                   | +60.      | +62.      | +65.      | +53.      | +56.      | -67.      | -59.      | -53.      | -44.      | -46.       |
| 20.52                  | 19.40                  | +119.     | +122.     | +127.     | +104.     | +105.     | -134.     | -118.     | -108.     | -89.      | -91.       |
| 30.72                  | 29.15                  | +177.     | +181.     | +188.     | +154.     | +154.     | -200.     | -178.     | -165.     | -137.     | -137.      |
| 41.27                  | 38.79                  | +240.     | +244.     | +249.     | +207.     | +209.     | -267.     | -238.     | -221.     | -183.     | -185.      |
| 51.58                  | 48.32                  | +296.     | +304.     | +308.     | +255.     | +264.     | -333.     | -296.     | -278.     | -230.     | -233.      |
| 61.66                  | 58.19                  | +355.     | +366.     | +368.     | +304.     | +322.     | -401.     | -358.     | -337.     | -281.     | -288.      |
| 71.86                  | 68.18                  | +414.     | +427.     | +432.     | +354.     | +384.     | -468.     | -419.     | -395.     | -331.     | -330.      |
| 81.83                  | 78.28                  | +473.     | +487.     | +498.     | +407.     | +447.     | -534.     | -479.     | -453.     | -377.     | -362.      |
| 91.68                  | 88.04                  | +532.     | +546.     | +568.     | +458.     | +505.     | -597.     | -539.     | -511.     | -423.     | -394.      |
| 101.76                 | 98.14                  | +595.     | +603.     | +637.     | +514.     | +562.     | -664.     | -598.     | -570.     | -471.     | -423.      |
| 0.12                   | 0.00                   | +15.      | +4.       | +21.      | +5.       | +55.      | +5.       | +1.       | -7.       | +1.       | +37.       |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II            ENSAIO No.1            DATA: 19/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 3

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 20.28                  | 19.28                  | +119.                  | +122.                  | +102.                  | -116.                  | -130.                  | -92.                   |
| 30.72                  | 29.15                  | +179.                  | +182.                  | +155.                  | -176.                  | -196.                  | -142.                  |
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +2.                    | +2.                    | +2.                    | -1.                    |
| 0.12                   | 0.00                   | +1.                    | +0.                    | +2.                    | +2.                    | +1.                    | +0.                    |
| 10.32                  | 9.76                   | +59.                   | +61.                   | +52.                   | -58.                   | -65.                   | -46.                   |
| 20.52                  | 19.40                  | +119.                  | +122.                  | +104.                  | -116.                  | -130.                  | -93.                   |
| 30.72                  | 29.15                  | +180.                  | +183.                  | +156.                  | -175.                  | -194.                  | -141.                  |
| 41.27                  | 38.79                  | +242.                  | +244.                  | +208.                  | -233.                  | -258.                  | -189.                  |
| 51.58                  | 48.32                  | +300.                  | +302.                  | +257.                  | -292.                  | -322.                  | -238.                  |
| 61.66                  | 58.19                  | +359.                  | +359.                  | +308.                  | -349.                  | -386.                  | -286.                  |
| 71.86                  | 68.18                  | +417.                  | +417.                  | +360.                  | -408.                  | -450.                  | -333.                  |
| 81.83                  | 78.28                  | +476.                  | +472.                  | +408.                  | -466.                  | -516.                  | -373.                  |
| 91.68                  | 88.04                  | +535.                  | +528.                  | +453.                  | -525.                  | -581.                  | -412.                  |
| 101.76                 | 98.14                  | +599.                  | +585.                  | +500.                  | -581.                  | -644.                  | -437.                  |
| 0.12                   | 0.00                   | +12.                   | -15.                   | -12.                   | +4.                    | +1.                    | +32.                   |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.1 DATA: 19/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAD 4

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 20.28                  | 19.28                  | +90.                   | +98.                   | +109.                  | +74.                   | +83.                   | -76.                   | -92.                   | -117.                  | -101.                  | -64.                    |
| 30.72                  | 29.15                  | +140.                  | +149.                  | +164.                  | +115.                  | +125.                  | -120.                  | -142.                  | -176.                  | -152.                  | -99.                    |
| 0.00                   | 0.00                   | +2.                    | +4.                    | +7.                    | +7.                    | +1.                    | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                     |
| 0.12                   | 0.00                   | +2.                    | +4.                    | +7.                    | +7.                    | +1.                    | +1.                    | -1.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                     |
| 10.32                  | 9.76                   | +46.                   | +51.                   | +63.                   | +45.                   | +41.                   | -35.                   | -47.                   | -61.                   | -51.                   | -32.                    |
| 20.52                  | 19.40                  | +93.                   | +100.                  | +115.                  | +82.                   | +83.                   | -77.                   | -94.                   | -118.                  | -101.                  | -64.                    |
| 30.72                  | 29.15                  | +142.                  | +150.                  | +166.                  | +118.                  | +125.                  | -119.                  | -141.                  | -175.                  | -150.                  | -98.                    |
| 41.27                  | 38.79                  | +192.                  | +202.                  | +228.                  | +161.                  | +165.                  | -161.                  | -190.                  | -230.                  | -199.                  | -130.                   |
| 51.58                  | 48.32                  | +240.                  | +252.                  | +288.                  | +205.                  | +201.                  | -204.                  | -238.                  | -287.                  | -249.                  | -164.                   |
| 61.66                  | 58.19                  | +285.                  | +300.                  | +350.                  | +253.                  | +235.                  | -251.                  | -281.                  | -346.                  | -300.                  | -198.                   |
| 71.86                  | 68.18                  | +331.                  | +349.                  | +412.                  | +296.                  | +269.                  | -299.                  | -322.                  | -405.                  | -352.                  | -230.                   |
| 81.83                  | 78.28                  | +374.                  | +398.                  | +477.                  | +340.                  | +303.                  | -348.                  | -361.                  | -467.                  | -404.                  | -262.                   |
| 91.68                  | 88.04                  | +421.                  | +449.                  | +546.                  | +390.                  | +339.                  | -396.                  | -400.                  | -528.                  | -456.                  | -297.                   |
| 101.76                 | 98.14                  | +473.                  | +502.                  | +625.                  | +450.                  | +378.                  | -447.                  | -439.                  | -594.                  | -514.                  | -332.                   |
| 0.12                   | 0.00                   | +8.                    | +7.                    | +86.                   | +80.                   | -25.                   | -37.                   | +40.                   | -27.                   | -22.                   | +6.                     |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II            ENSAIO No.1            DATA: 19/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAD 5

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 20.28         | 19.28         | +91.                   | +95.                   | +94.                   | -98.                   | -91.                   | -64.                   |
| 30.72         | 29.15         | +144.                  | +136.                  | +145.                  | -149.                  | -136.                  | -97.                   |
| 0.00          | 0.00          | +9.                    | -7.                    | +7.                    | +3.                    | +4.                    | +4.                    |
| 0.12          | 0.00          | +9.                    | -7.                    | +7.                    | +2.                    | +3.                    | +4.                    |
| 10.32         | 9.76          | +50.                   | +40.                   | +52.                   | -46.                   | -43.                   | -29.                   |
| 20.52         | 19.40         | +95.                   | +88.                   | +98.                   | -97.                   | -86.                   | -61.                   |
| 30.72         | 29.15         | +141.                  | +137.                  | +145.                  | -147.                  | -133.                  | -95.                   |
| 41.27         | 38.79         | +192.                  | +185.                  | +196.                  | -195.                  | -176.                  | -125.                  |
| 51.58         | 48.32         | +241.                  | +229.                  | +247.                  | -245.                  | -221.                  | -156.                  |
| 61.66         | 58.19         | +297.                  | +275.                  | +302.                  | -296.                  | -266.                  | -185.                  |
| 71.86         | 68.18         | +351.                  | +322.                  | +355.                  | -350.                  | -314.                  | -210.                  |
| 81.83         | 78.28         | +409.                  | +371.                  | +410.                  | -402.                  | -365.                  | -224.                  |
| 91.68         | 88.04         | +461.                  | +417.                  | +461.                  | -454.                  | -415.                  | -245.                  |
| 101.76        | 98.14         | +516.                  | +462.                  | +512.                  | -502.                  | -469.                  | -268.                  |
| 0.12          | 0.00          | +57.                   | -30.                   | +41.                   | +2.                    | -9.                    | +58.                   |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.1 DATA: 19/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 1

| F <sub>1</sub><br>(KN) | F <sub>2</sub><br>(KN) | ε <sub>a</sub><br>(μE) | ε <sub>b</sub><br>(μE) | ε <sub>c</sub><br>(μE) | ε <sub>1</sub><br>(μE) | ε <sub>2</sub><br>(μE) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 20.28                  | 19.28                  | -4.                    | +54.                   | -8.                    | +54.                   | -65.                   | +7.7                    | -11.1                   | +44.1    |
| 30.72                  | 29.15                  | -6.                    | +84.                   | -12.                   | +84.                   | -102.                  | +12.1                   | -17.3                   | +44.0    |
| 0.00                   | 0.00                   | +3.                    | +3.                    | +2.                    | +3.                    | +2.                    | +0.8                    | +0.6                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.00                   | +3.                    | +3.                    | +2.                    | +3.                    | +2.                    | +0.8                    | +0.6                    | U/C      |
| 10.32                  | 9.76                   | +1.                    | +28.                   | -1.                    | +28.                   | -28.                   | +4.5                    | -4.5                    | +44.0    |
| 20.52                  | 19.40                  | -2.                    | +58.                   | -6.                    | +58.                   | -65.                   | +8.6                    | -10.8                   | +44.1    |
| 30.72                  | 29.15                  | -5.                    | +87.                   | -10.                   | +87.                   | -102.                  | +12.7                   | -17.1                   | +44.1    |
| 41.27                  | 38.79                  | -4.                    | +119.                  | -13.                   | +119.                  | -136.                  | +17.7                   | -22.7                   | +43.9    |
| 51.58                  | 48.32                  | -6.                    | +151.                  | -19.                   | +152.                  | -176.                  | +22.2                   | -29.4                   | +43.8    |
| 61.66                  | 58.19                  | -4.                    | +186.                  | -25.                   | +186.                  | -214.                  | +27.4                   | -35.7                   | +43.5    |
| 71.86                  | 68.18                  | -1.                    | +220.                  | -31.                   | +220.                  | -252.                  | +32.5                   | -41.9                   | +43.2    |
| 81.83                  | 78.28                  | +5.                    | +254.                  | -40.                   | +255.                  | -290.                  | +37.8                   | -48.0                   | +42.7    |
| 91.68                  | 88.04                  | +9.                    | +286.                  | -48.                   | +287.                  | -326.                  | +42.7                   | -54.0                   | +42.3    |
| 101.76                 | 98.14                  | +22.                   | +325.                  | -58.                   | +327.                  | -363.                  | +49.1                   | -59.6                   | +41.7    |
| 0.12                   | 0.00                   | +42.                   | +29.                   | +8.                    | +42.                   | +7.                    | +10.0                   | +4.4                    | +7.8     |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.1 DATA: 19/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(μE) | ε <sub>b</sub><br>(μE) | ε <sub>c</sub><br>(μE) | ε <sub>1</sub><br>(μE) | ε <sub>2</sub><br>(μE) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 20.28                  | 19.28                  | +18.                   | +71.                   | -10.                   | +73.                   | -65.                   | +11.9                   | -9.7                    | +39.0    |
| 30.72                  | 29.15                  | +24.                   | +105.                  | -20.                   | +107.                  | -104.                  | +17.2                   | -16.1                   | +39.0    |
| 0.00                   | 0.00                   | +5.                    | +3.                    | +3.                    | +5.                    | +2.                    | +1.3                    | +0.9                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.00                   | +5.                    | +4.                    | +3.                    | +5.                    | +3.                    | +1.3                    | +1.0                    | U/C      |
| 10.32                  | 9.76                   | +14.                   | +40.                   | -1.                    | +41.                   | -27.                   | +7.3                    | -3.4                    | +38.6    |
| 20.52                  | 19.40                  | +20.                   | +74.                   | -9.                    | +75.                   | -64.                   | +12.6                   | -9.3                    | +39.1    |
| 30.72                  | 29.15                  | +26.                   | +107.                  | -17.                   | +109.                  | -101.                  | +17.8                   | -15.3                   | +39.1    |
| 41.27                  | 38.79                  | +33.                   | +144.                  | -25.                   | +147.                  | -138.                  | +23.7                   | -21.2                   | +39.2    |
| 51.58                  | 48.32                  | +41.                   | +179.                  | -33.                   | +183.                  | -175.                  | +29.3                   | -27.1                   | +39.1    |
| 61.66                  | 58.19                  | +51.                   | +217.                  | -41.                   | +222.                  | -211.                  | +35.7                   | -32.6                   | +38.9    |
| 71.86                  | 68.18                  | +61.                   | +256.                  | -51.                   | +262.                  | -252.                  | +41.9                   | -39.2                   | +38.7    |
| 81.83                  | 78.28                  | +69.                   | +292.                  | -65.                   | +299.                  | -296.                  | +47.5                   | -46.4                   | +38.5    |
| 91.68                  | 88.04                  | +74.                   | +325.                  | -79.                   | +334.                  | -338.                  | +52.3                   | -53.7                   | +38.4    |
| 101.76                 | 98.14                  | +82.                   | +363.                  | -93.                   | +373.                  | -383.                  | +58.1                   | -61.2                   | +38.3    |
| 0.12                   | 0.00                   | +29.                   | +16.                   | +3.                    | +29.                   | +3.                    | +6.8                    | +2.6                    | U/C      |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.1 DATA: 19/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 3

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 20.28         | 19.28         | +12.                              | +93.                              | +8.                               | +93.                              | -73.                              | +16.0               | -10.2               | +44.2                    |
| 30.72         | 29.15         | +13.                              | +133.                             | +4.                               | +133.                             | -116.                             | +22.1               | -17.1               | +43.9                    |
| 0.00          | 0.00          | +7.                               | +7.                               | +4.                               | +7.                               | +3.                               | +1.8                | +1.2                | U/C                      |
| 0.12          | 0.00          | +6.                               | +7.                               | +4.                               | +7.                               | +3.                               | +1.7                | +1.1                | U/C                      |
| 10.32         | 9.76          | +14.                              | +57.                              | +10.                              | +57.                              | -32.                              | +10.6               | -3.4                | +43.8                    |
| 20.52         | 19.40         | +15.                              | +97.                              | +9.                               | +97.                              | -73.                              | +16.8               | -9.9                | +43.9                    |
| 30.72         | 29.15         | +16.                              | +134.                             | +5.                               | +135.                             | -114.                             | +22.6               | -16.5               | +43.7                    |
| 41.27         | 38.79         | +19.                              | +177.                             | +2.                               | +177.                             | -156.                             | +29.4               | -23.3               | +43.5                    |
| 51.58         | 48.32         | +22.                              | +217.                             | -3.                               | +217.                             | -198.                             | +35.5               | -30.0               | +43.3                    |
| 61.66         | 58.19         | +29.                              | +261.                             | -8.                               | +262.                             | -240.                             | +42.8               | -36.4               | +42.9                    |
| 71.86         | 68.18         | +33.                              | +304.                             | -13.                              | +305.                             | -285.                             | +49.4               | -43.6               | +42.7                    |
| 81.83         | 78.28         | +33.                              | +345.                             | -22.                              | +346.                             | -334.                             | +55.3               | -51.9               | +42.7                    |
| 91.68         | 88.04         | +30.                              | +382.                             | -30.                              | +384.                             | -384.                             | +60.5               | -60.5               | +42.7                    |
| 101.76        | 98.14         | +30.                              | +424.                             | -38.                              | +425.                             | -433.                             | +66.6               | -60.8               | +42.7                    |
| 0.12          | 0.00          | +38.                              | +36.                              | +5.                               | +43.                              | -1.                               | +9.7                | +2.8                | U/C                      |



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

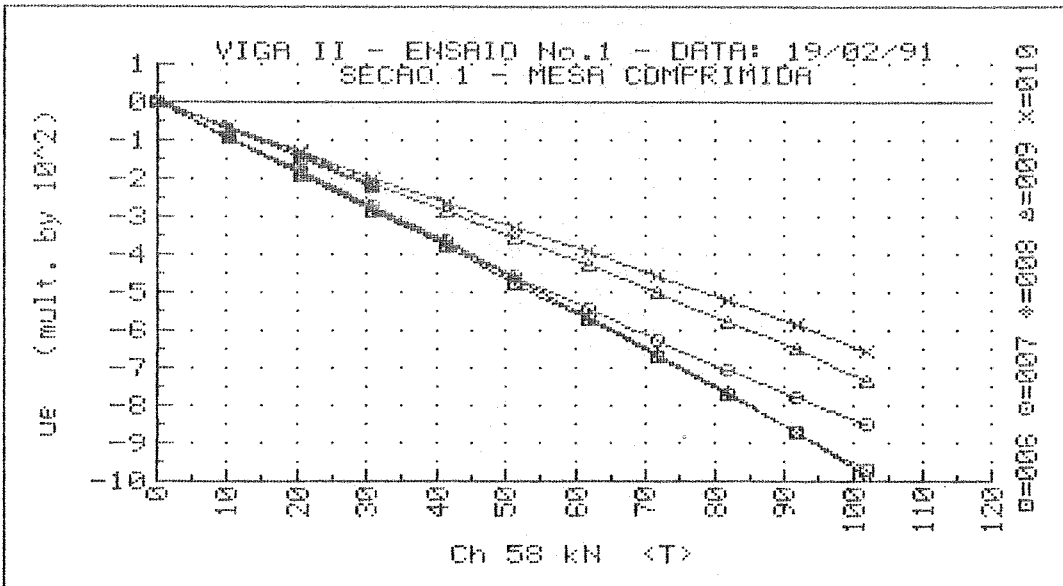
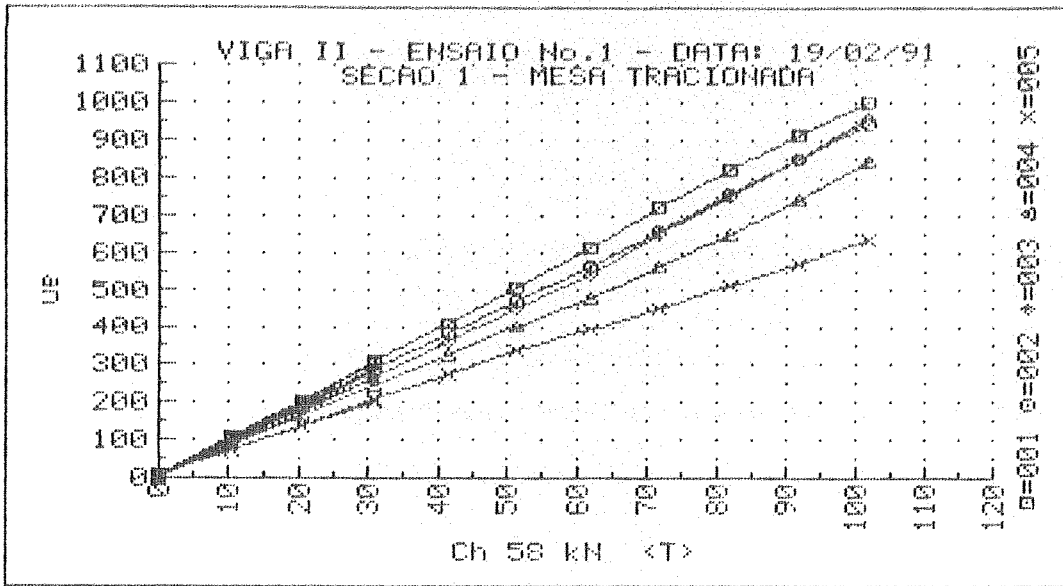
ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II      ENSAIO No.1      DATA: 19/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 4

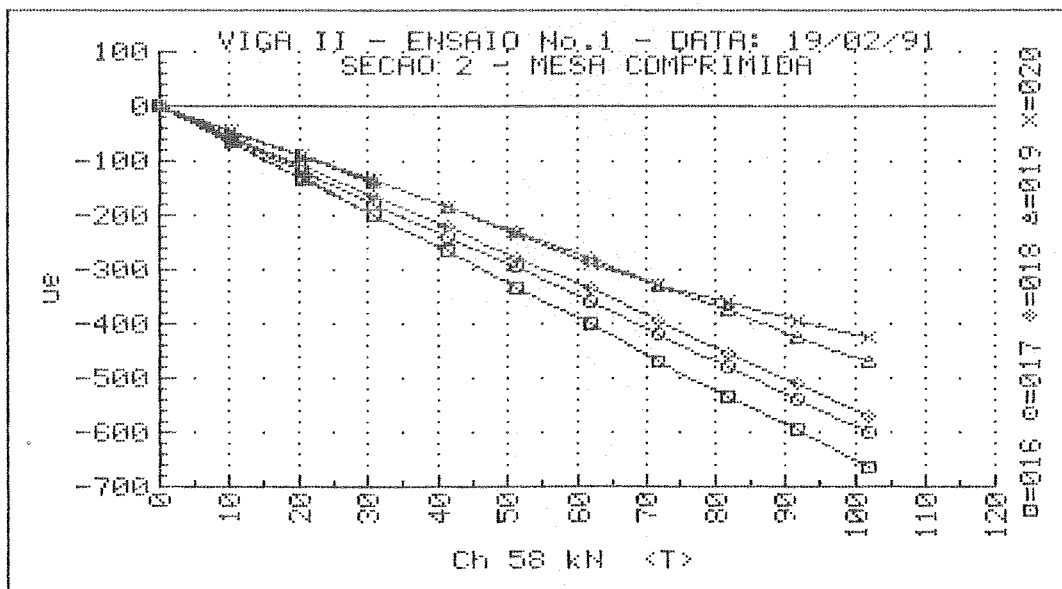
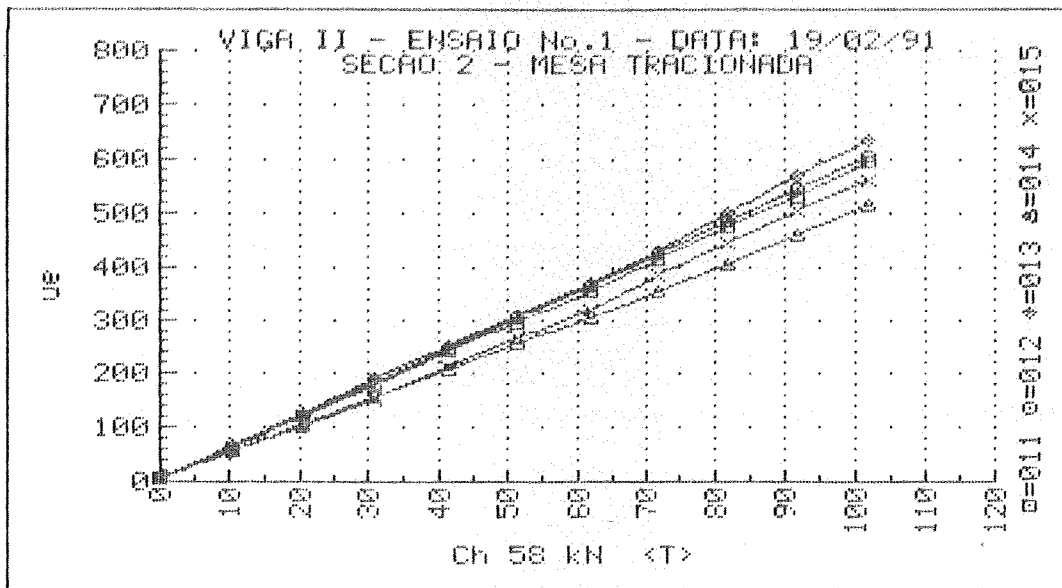
| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(μE) | ε <sub>b</sub><br>(μE) | ε <sub>c</sub><br>(μE) | ε <sub>1</sub><br>(μE) | ε <sub>2</sub><br>(μE) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 20.28                  | 19.28                  | -2.                    | +73.                   | -4.                    | +73.                   | -79.                   | +11.1                   | -12.8                   | +44.6    |
| 30.72                  | 29.15                  | -1.                    | +110.                  | -9.                    | +110.                  | -119.                  | +16.7                   | -19.5                   | +44.1    |
| 0.00                   | 0.00                   | +5.                    | +5.                    | +2.                    | +5.                    | +1.                    | +1.3                    | +0.7                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.00                   | +5.                    | +4.                    | +2.                    | +5.                    | +2.                    | +1.2                    | +0.7                    | U/C      |
| 10.32                  | 9.76                   | +3.                    | +41.                   | -1.                    | +41.                   | -39.                   | +6.6                    | -6.0                    | +43.6    |
| 20.52                  | 19.40                  | +2.                    | +77.                   | -4.                    | +77.                   | -79.                   | +12.0                   | -12.5                   | +44.0    |
| 30.72                  | 29.15                  | +1.                    | +112.                  | -7.                    | +112.                  | -117.                  | +17.2                   | -18.9                   | +44.1    |
| 41.27                  | 38.79                  | +4.                    | +150.                  | -9.                    | +151.                  | -156.                  | +23.4                   | -25.0                   | +43.8    |
| 51.58                  | 48.32                  | +7.                    | +187.                  | -15.                   | +188.                  | -196.                  | +29.0                   | -31.5                   | +43.4    |
| 61.66                  | 58.19                  | +11.                   | +224.                  | -21.                   | +225.                  | -234.                  | +34.8                   | -37.6                   | +43.0    |
| 71.86                  | 68.18                  | +17.                   | +263.                  | -27.                   | +264.                  | -274.                  | +40.9                   | -44.0                   | +42.6    |
| 81.83                  | 78.28                  | +27.                   | +303.                  | -34.                   | +304.                  | -311.                  | +47.6                   | -49.5                   | +42.1    |
| 91.68                  | 88.04                  | +37.                   | +342.                  | -40.                   | +344.                  | -347.                  | +54.0                   | -54.8                   | +41.8    |
| 101.76                 | 98.14                  | +46.                   | +380.                  | -48.                   | +383.                  | -385.                  | +60.3                   | -60.9                   | +41.5    |
| 0.12                   | 0.00                   | +60.                   | +27.                   | -16.                   | +60.                   | -17.                   | +12.4                   | +0.3                    | +4.3     |

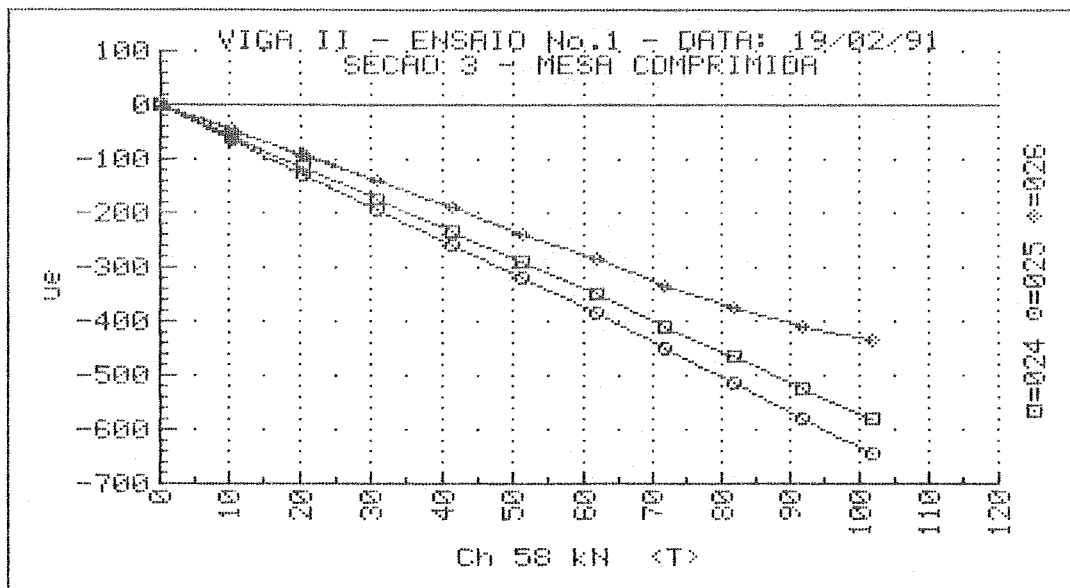
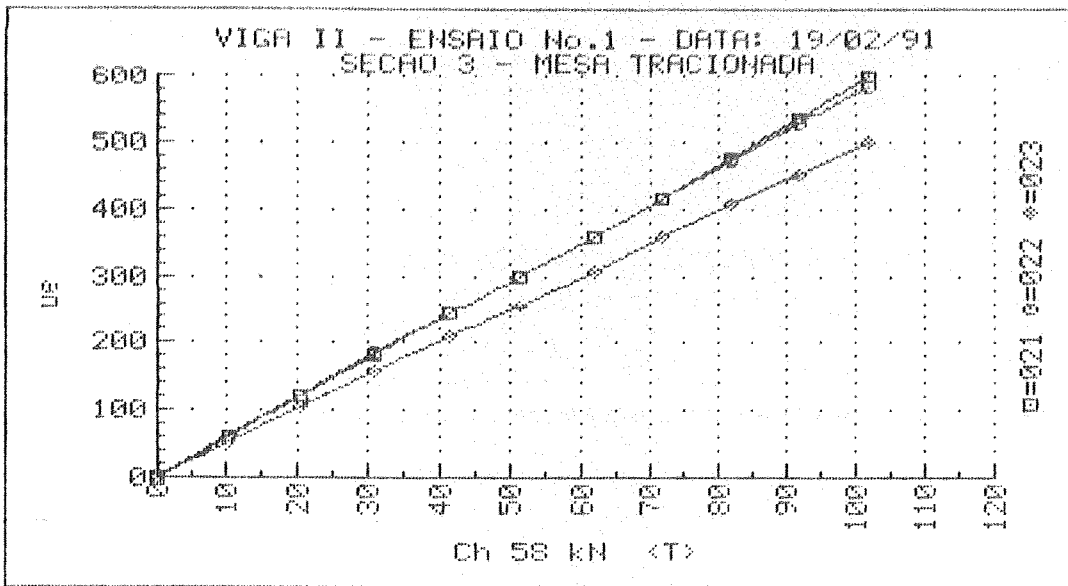
UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

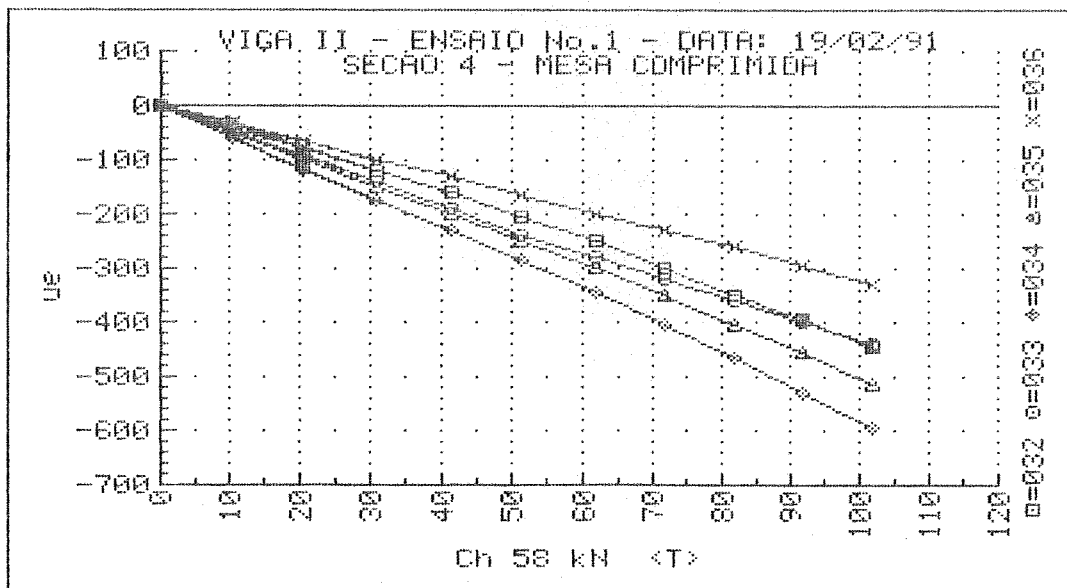
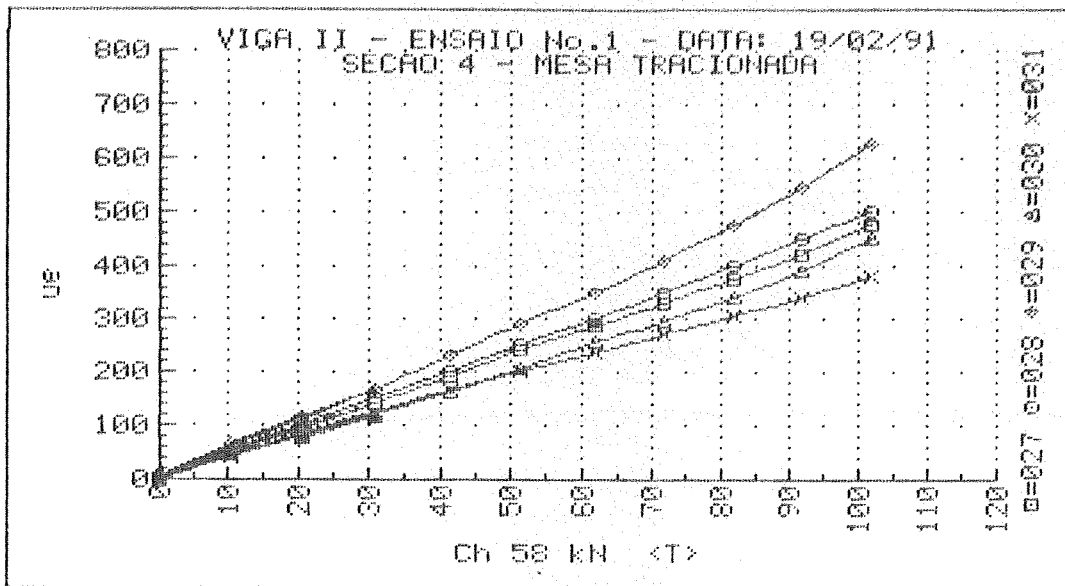
ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.1 DATA: 19/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 5

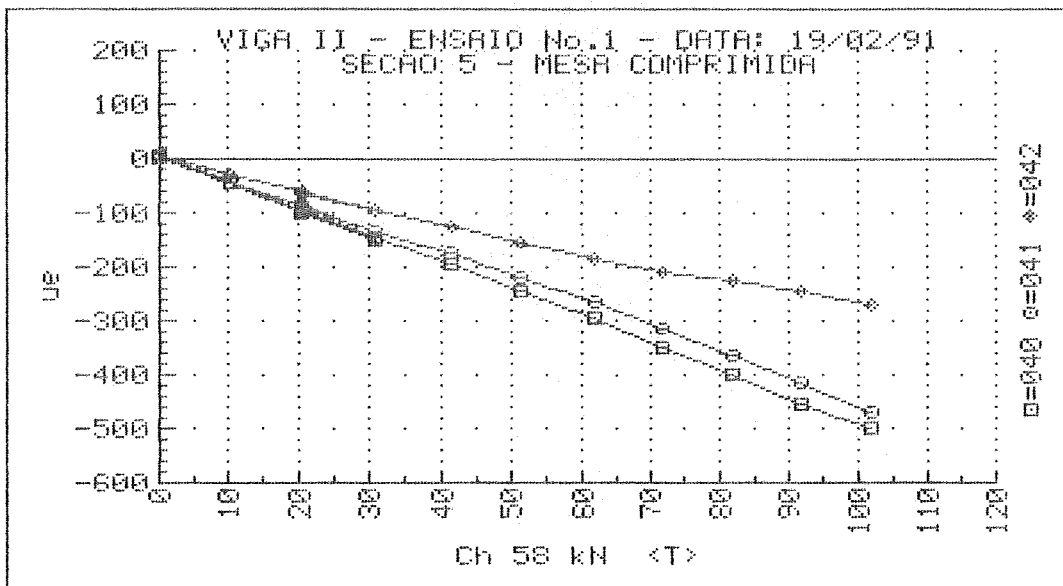
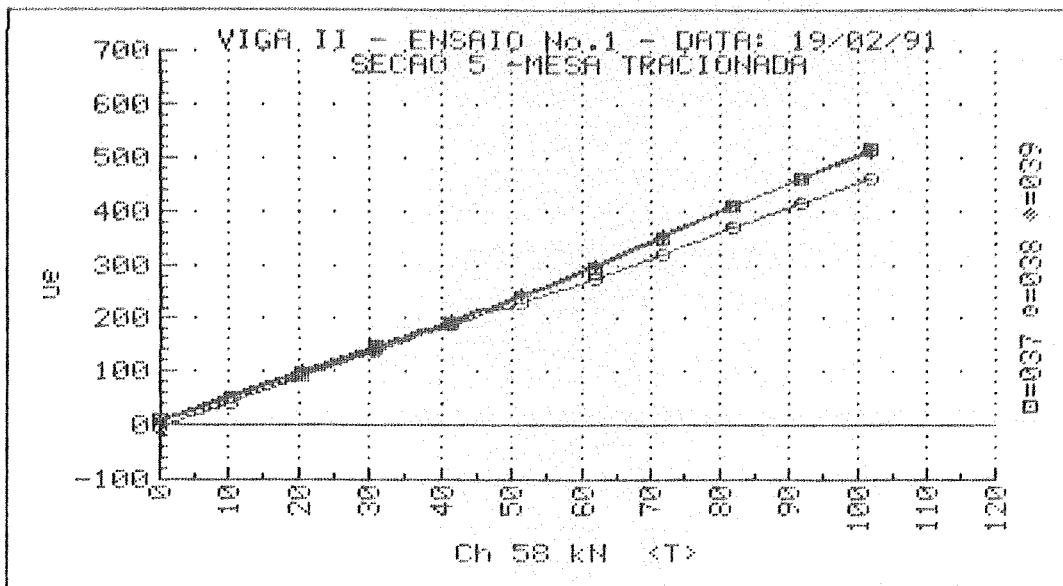
| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 20.28                  | 19.28                  | +7.                    | -69.                   | -9.                    | +67.                   | -70.                   | +10.3                   | -11.2                   | -41.6    |
| 30.72                  | 29.15                  | +9.                    | -106.                  | -14.                   | +101.                  | -107.                  | +15.5                   | -17.2                   | -41.9    |
| 0.00                   | 0.00                   | +4.                    | +4.                    | +3.                    | +4.                    | +3.                    | +1.1                    | +0.9                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.00                   | +4.                    | +4.                    | +4.                    | +4.                    | +4.                    | +1.1                    | +1.1                    | U/C      |
| 10.32                  | 9.76                   | +8.                    | -30.                   | -2.                    | +36.                   | -31.                   | +6.1                    | -4.4                    | -40.9    |
| 20.52                  | 19.40                  | +9.                    | -67.                   | -8.                    | +69.                   | -68.                   | +10.9                   | -10.6                   | -41.6    |
| 30.72                  | 29.15                  | +9.                    | -105.                  | -12.                   | +103.                  | -106.                  | +16.0                   | -16.8                   | -42.0    |
| 41.27                  | 38.79                  | +14.                   | -140.                  | -14.                   | +141.                  | -141.                  | +22.2                   | -22.2                   | -42.1    |
| 51.58                  | 48.32                  | +17.                   | -176.                  | -19.                   | +175.                  | -177.                  | +27.5                   | -28.0                   | -42.1    |
| 61.66                  | 58.19                  | +20.                   | -214.                  | -21.                   | +214.                  | -215.                  | +33.7                   | -33.9                   | -42.3    |
| 71.86                  | 68.18                  | +24.                   | -252.                  | -25.                   | +252.                  | -253.                  | +39.7                   | -39.9                   | -42.3    |
| 81.83                  | 78.28                  | +27.                   | -290.                  | -27.                   | +290.                  | -291.                  | +45.7                   | -45.9                   | -42.3    |
| 91.68                  | 88.04                  | +28.                   | -327.                  | -30.                   | +327.                  | -329.                  | +51.4                   | -52.0                   | -42.4    |
| 101.76                 | 98.14                  | +30.                   | -366.                  | -34.                   | +364.                  | -368.                  | +57.1                   | -58.2                   | -42.5    |
| 0.12                   | 0.00                   | +26.                   | +18.                   | +15.                   | +26.                   | +15.                   | +6.9                    | +5.1                    | -12.2    |

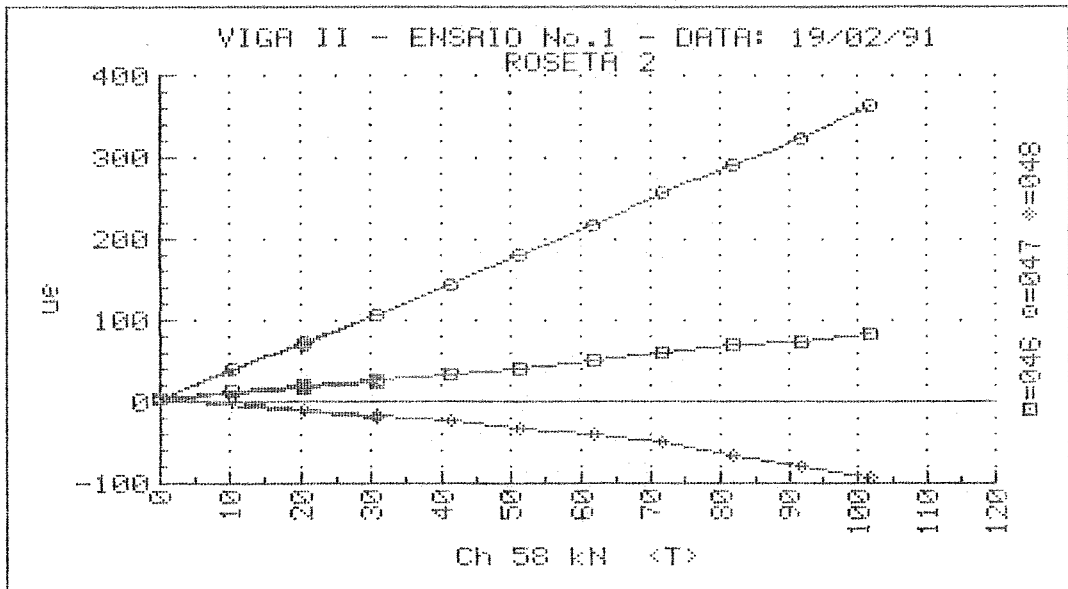
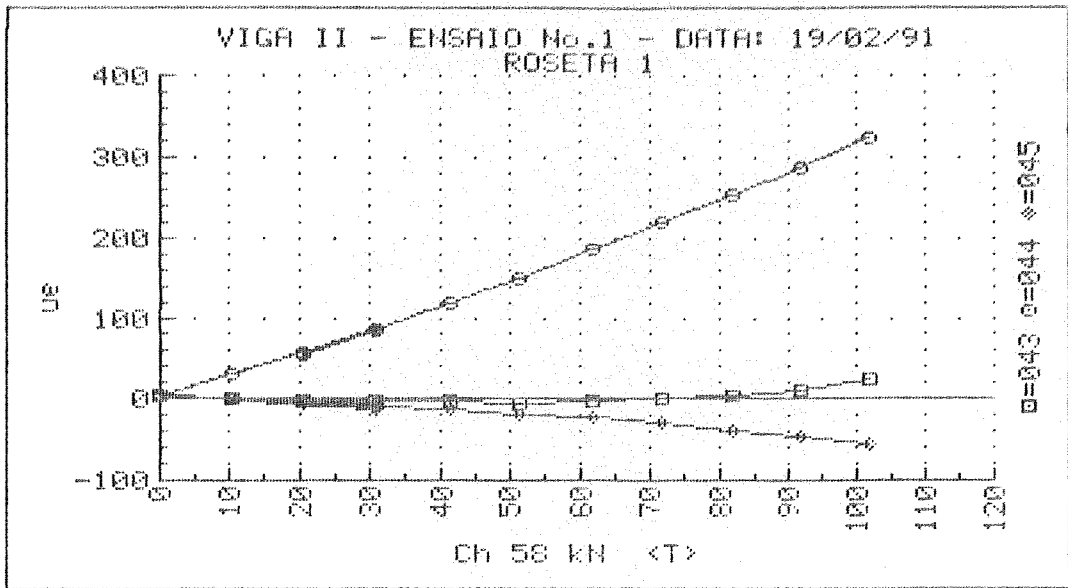




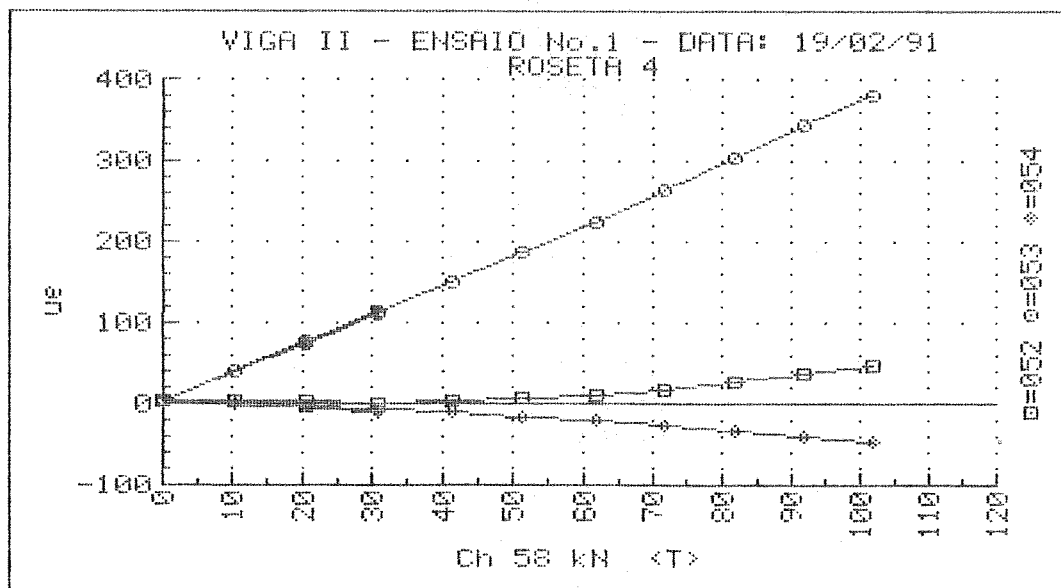
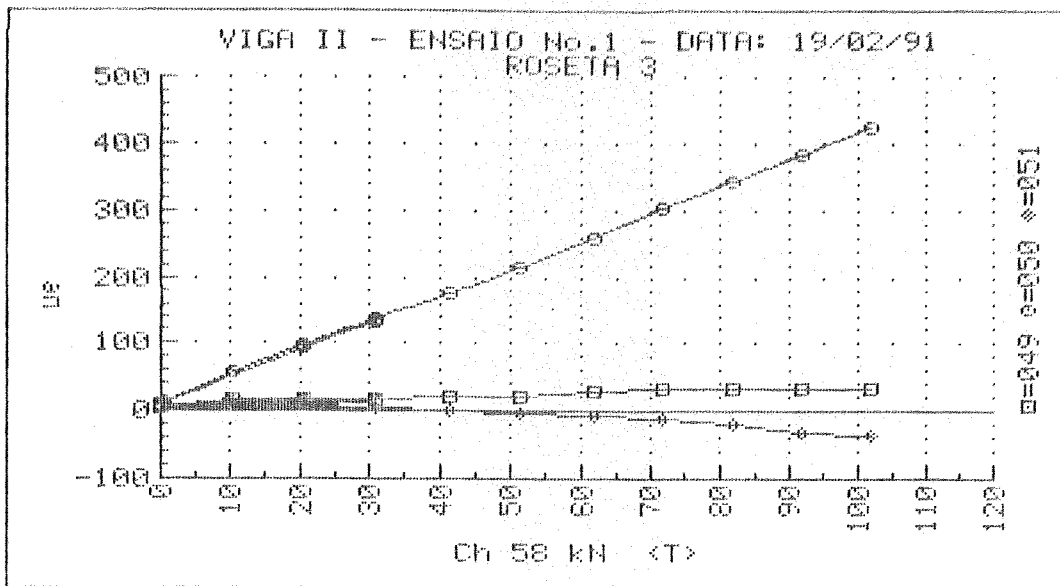




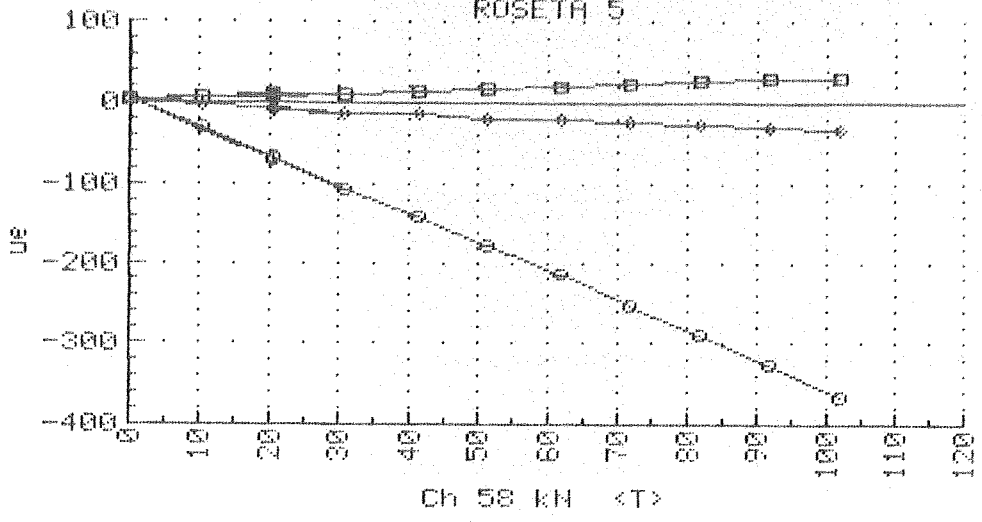








VIGA II - ENSAIO No.1 - DATA: 19/02/91  
ROSETA 5



E=055 e=056 e=057

## MODELO - VIGA II

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### ENSAIO 2

#### - DESLOCAMENTOS

TABELAS

GRÁFICOS

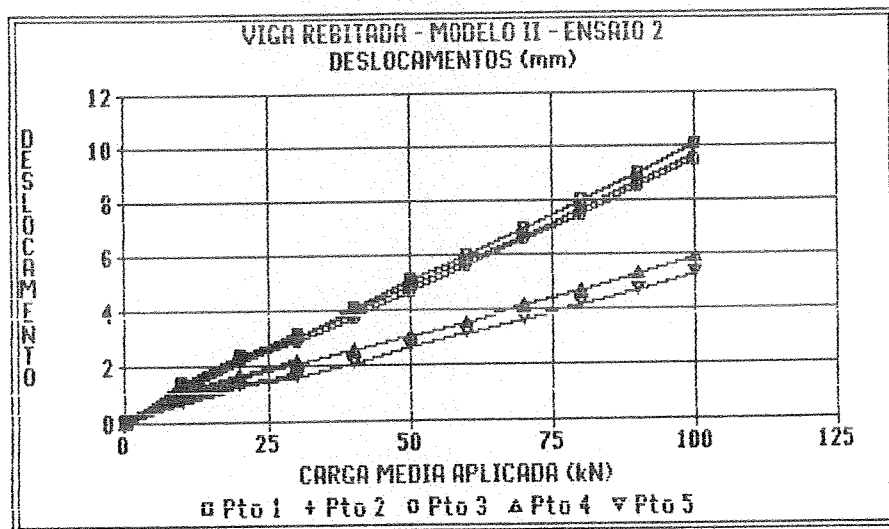
MODELO: VIGA REBITADA II

ENSAIO Nro:2

DATA:20 DE FEVEREIRO DE 1991

HORARIO: 8:45 Hs

| ETAPA | CARGA APL<br>MEDIA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS<br>(mm) |       |       |      |       |
|-------|----------------------------|-----------------------|-------|-------|------|-------|
|       |                            | Pto 1                 | Pto 2 | Pto 3 | Pto4 | Pto 5 |
|       | 0.00                       | 0.00                  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 0.00  |
| 1     | 9.85                       | 1.38                  | 1.33  | 1.24  | 1.11 | .78   |
| 2     | 19.90                      | 2.38                  | 2.28  | 2.19  | 1.66 | 1.35  |
| 3     | 29.95                      | 3.22                  | 3.13  | 2.95  | 2.15 | 1.67  |
| 4     | .25                        | .12                   | .09   | .08   | .11  | .07   |
| 5     | 9.90                       | 1.27                  | 1.24  | 1.21  | 1.00 | .70   |
| 6     | 20.00                      | 2.30                  | 2.21  | 2.15  | 1.55 | 1.32  |
| 7     | 30.00                      | 3.12                  | 3.06  | 2.89  | 2.08 | 1.60  |
| 8     | 39.95                      | 4.06                  | 3.95  | 3.80  | 2.56 | 2.14  |
| 9     | 50.00                      | 5.05                  | 4.89  | 4.74  | 3.10 | 2.65  |
| 10    | 60.00                      | 6.00                  | 5.80  | 5.65  | 3.62 | 3.18  |
| 11    | 69.95                      | 6.98                  | 6.74  | 6.57  | 4.16 | 3.70  |
| 12    | 80.00                      | 7.99                  | 7.69  | 7.53  | 4.73 | 4.21  |
| 13    | 89.95                      | 9.00                  | 8.67  | 8.49  | 5.30 | 4.75  |
| 14    | 99.95                      | 10.08                 | 9.71  | 9.51  | 5.93 | 5.34  |



MODELO - VIGA II

RESULTADOS DOS ENSAIOS

. ENSAIO 2

- DEFORMAÇÕES

EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA

.UNIAXIAIS

.ROSETAS

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.2 DATA: 21/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 1

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00          | 0.00          | -1.                    | +0.                    | -1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                     |
| 10.43         | 9.41          | +96.                   | +91.                   | +87.                   | +79.                   | +66.                   | -91.                   | -90.                   | -95.                   | -75.                   | -65.                    |
| 20.63         | 19.16         | +196.                  | +184.                  | +175.                  | +162.                  | +134.                  | -185.                  | -182.                  | -190.                  | -150.                  | -132.                   |
| 30.95         | 29.04         | +296.                  | +279.                  | +264.                  | +244.                  | +202.                  | -279.                  | -274.                  | -285.                  | -223.                  | -200.                   |
| 0.47          | 0.00          | +3.                    | +4.                    | +5.                    | +3.                    | +4.                    | -3.                    | -1.                    | +0.                    | +0.                    | -1.                     |
| 10.43         | 9.41          | +97.                   | +93.                   | +89.                   | +81.                   | +68.                   | -92.                   | -89.                   | -94.                   | -73.                   | -65.                    |
| 20.63         | 19.40         | +197.                  | +187.                  | +177.                  | +163.                  | +136.                  | -186.                  | -182.                  | -189.                  | -149.                  | -132.                   |
| 30.83         | 29.15         | +296.                  | +279.                  | +266.                  | +244.                  | +202.                  | -279.                  | -273.                  | -283.                  | -222.                  | -199.                   |
| 41.15         | 38.79         | +394.                  | +370.                  | +354.                  | +327.                  | +269.                  | -374.                  | -364.                  | -377.                  | -295.                  | -266.                   |
| 51.58         | 48.43         | +493.                  | +465.                  | +444.                  | +412.                  | +339.                  | -469.                  | -455.                  | -470.                  | -367.                  | -334.                   |
| 61.90         | 58.07         | +589.                  | +558.                  | +533.                  | +493.                  | +407.                  | -564.                  | -547.                  | -562.                  | -438.                  | -401.                   |
| 72.10         | 67.71         | +687.                  | +651.                  | +623.                  | +574.                  | +474.                  | -659.                  | -636.                  | -652.                  | -509.                  | -467.                   |
| 81.83         | 78.16         | +786.                  | +745.                  | +714.                  | +656.                  | +541.                  | -758.                  | -729.                  | -746.                  | -580.                  | -533.                   |
| 92.61         | 87.22         | +883.                  | +837.                  | +804.                  | +735.                  | +607.                  | -854.                  | -820.                  | -838.                  | -648.                  | -598.                   |
| 101.99        | 97.91         | +982.                  | +932.                  | +896.                  | +816.                  | +673.                  | -954.                  | -910.                  | -932.                  | -718.                  | -664.                   |
| 0.59          | 0.00          | +10.                   | +11.                   | +13.                   | +12.                   | +10.                   | -5.                    | +4.                    | +1.                    | +5.                    | +0.                     |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.2 DATA: 21/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAD 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | -1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                     |
| 10.43                  | 9.41                   | +56.                   | +59.                   | +60.                   | +49.                   | +49.                   | -59.                   | -59.                   | -62.                   | -49.                   | -45.                    |
| 20.63                  | 19.16                  | +116.                  | +118.                  | +120.                  | +101.                  | +99.                   | -122.                  | -121.                  | -123.                  | -98.                   | -90.                    |
| 30.95                  | 29.04                  | +176.                  | +178.                  | +180.                  | +153.                  | +151.                  | -186.                  | -182.                  | -182.                  | -147.                  | -137.                   |
| 0.47                   | 0.00                   | +2.                    | +3.                    | +3.                    | +2.                    | +4.                    | -3.                    | -1.                    | +1.                    | +0.                    | -1.                     |
| 10.43                  | 9.41                   | +57.                   | +59.                   | +61.                   | +50.                   | +51.                   | -60.                   | -59.                   | -59.                   | -47.                   | -45.                    |
| 20.63                  | 19.40                  | +117.                  | +120.                  | +122.                  | +102.                  | +101.                  | -124.                  | -121.                  | -121.                  | -98.                   | -91.                    |
| 30.83                  | 29.15                  | +176.                  | +179.                  | +181.                  | +154.                  | +151.                  | -186.                  | -182.                  | -181.                  | -147.                  | -137.                   |
| 41.15                  | 38.79                  | +236.                  | +239.                  | +241.                  | +206.                  | +203.                  | -251.                  | -242.                  | -240.                  | -196.                  | -184.                   |
| 51.58                  | 48.43                  | +297.                  | +301.                  | +302.                  | +260.                  | +254.                  | -315.                  | -301.                  | -296.                  | -244.                  | -231.                   |
| 61.90                  | 58.07                  | +357.                  | +360.                  | +362.                  | +311.                  | +304.                  | -380.                  | -360.                  | -354.                  | -294.                  | -278.                   |
| 72.10                  | 67.71                  | +417.                  | +421.                  | +422.                  | +364.                  | +354.                  | -446.                  | -418.                  | -411.                  | -341.                  | -325.                   |
| 81.83                  | 78.16                  | +480.                  | +483.                  | +484.                  | +418.                  | +407.                  | -514.                  | -479.                  | -467.                  | -389.                  | -372.                   |
| 92.61                  | 87.22                  | +540.                  | +542.                  | +543.                  | +470.                  | +457.                  | -579.                  | -537.                  | -521.                  | -437.                  | -415.                   |
| 101.99                 | 97.91                  | +604.                  | +605.                  | +605.                  | +524.                  | +509.                  | -647.                  | -596.                  | -578.                  | -485.                  | -457.                   |
| 0.59                   | 0.00                   | +7.                    | +7.                    | +6.                    | +9.                    | +7.                    | -3.                    | +3.                    | +6.                    | +1.                    | +2.                     |



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.2 DATA: 21/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 3

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.00          | 0.00          | -1.                    | -1.                    | -1.                    | +0.                    | -1.                    | +0.                    |
| 10.43         | 9.41          | +58.                   | +59.                   | +50.                   | -59.                   | -65.                   | -46.                   |
| 20.63         | 19.16         | +121.                  | +121.                  | +103.                  | -118.                  | -128.                  | -92.                   |
| 30.95         | 29.04         | +184.                  | +182.                  | +156.                  | -177.                  | -191.                  | -138.                  |
| 0.47          | 0.00          | +2.                    | +3.                    | +2.                    | -1.                    | +1.                    | -1.                    |
| 10.43         | 9.41          | +59.                   | +61.                   | +51.                   | -58.                   | -63.                   | -45.                   |
| 20.63         | 19.40         | +121.                  | +121.                  | +104.                  | -117.                  | -126.                  | -92.                   |
| 30.83         | 29.15         | +184.                  | +182.                  | +157.                  | -175.                  | -187.                  | -136.                  |
| 41.15         | 38.79         | +244.                  | +242.                  | +208.                  | -234.                  | -250.                  | -184.                  |
| 51.58         | 48.43         | +306.                  | +304.                  | +262.                  | -291.                  | -312.                  | -228.                  |
| 61.90         | 58.07         | +365.                  | +364.                  | +313.                  | -349.                  | -373.                  | -275.                  |
| 72.10         | 67.71         | +425.                  | +422.                  | +364.                  | -405.                  | -435.                  | -320.                  |
| 81.83         | 78.16         | +484.                  | +481.                  | +415.                  | -463.                  | -498.                  | -365.                  |
| 92.61         | 87.22         | +543.                  | +542.                  | +467.                  | -521.                  | -560.                  | -409.                  |
| 101.99        | 97.91         | +604.                  | +600.                  | +518.                  | -577.                  | -622.                  | -448.                  |
| 0.59          | 0.00          | +6.                    | +4.                    | +5.                    | +5.                    | +6.                    | +10.                   |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.2 DATA: 21/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 4

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                     |
| 10.43         | 9.41          | +43.                   | +49.                   | +55.                   | +37.                   | +40.                   | -36.                   | -46.                   | -60.                   | -51.                   | -32.                    |
| 20.63         | 19.16         | +94.                   | +100.                  | +106.                  | +74.                   | +84.                   | -80.                   | -95.                   | -116.                  | -100.                  | -65.                    |
| 30.95         | 29.04         | +145.                  | +150.                  | +156.                  | +111.                  | +127.                  | -124.                  | -145.                  | -172.                  | -150.                  | -98.                    |
| 0.47          | 0.00          | +2.                    | +3.                    | +4.                    | +2.                    | +1.                    | +1.                    | -1.                    | -1.                    | -1.                    | +0.                     |
| 10.43         | 9.41          | +45.                   | +50.                   | +58.                   | +39.                   | +41.                   | -34.                   | -46.                   | -60.                   | -51.                   | -32.                    |
| 20.63         | 19.40         | +95.                   | +100.                  | +108.                  | +76.                   | +84.                   | -79.                   | -95.                   | -117.                  | -100.                  | -65.                    |
| 30.83         | 29.15         | +145.                  | +150.                  | +158.                  | +112.                  | +128.                  | -123.                  | -143.                  | -171.                  | -148.                  | -97.                    |
| 41.15         | 38.79         | +193.                  | +200.                  | +209.                  | +149.                  | +169.                  | -167.                  | -193.                  | -227.                  | -196.                  | -133.                   |
| 51.58         | 48.43         | +243.                  | +251.                  | +264.                  | +188.                  | +213.                  | -210.                  | -240.                  | -281.                  | -243.                  | -165.                   |
| 61.90         | 58.07         | +292.                  | +301.                  | +316.                  | +227.                  | +253.                  | -254.                  | -288.                  | -336.                  | -292.                  | -201.                   |
| 72.10         | 67.71         | +339.                  | +350.                  | +370.                  | +265.                  | +294.                  | -296.                  | -336.                  | -390.                  | -340.                  | -234.                   |
| 81.83         | 78.16         | +386.                  | +400.                  | +423.                  | +305.                  | +335.                  | -339.                  | -383.                  | -446.                  | -389.                  | -268.                   |
| 92.61         | 87.22         | +436.                  | +451.                  | +478.                  | +346.                  | +376.                  | -381.                  | -432.                  | -503.                  | -440.                  | -302.                   |
| 101.99        | 97.91         | +483.                  | +501.                  | +533.                  | +382.                  | +416.                  | -423.                  | -481.                  | -561.                  | -491.                  | -333.                   |
| 0.59          | 0.00          | +7.                    | +6.                    | +11.                   | +9.                    | +6.                    | -1.                    | +2.                    | -3.                    | -1.                    | +4.                     |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
VIGA II ENSAIO No.2 DATA: 21/02/91  
DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
SECAD 5

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.00          | 0.00          | -1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | -1.                    |
| 10.43         | 9.41          | +41.                   | +46.                   | +45.                   | -48.                   | -54.                   | -35.                   |
| 20.63         | 19.16         | +87.                   | +96.                   | +93.                   | -98.                   | -103.                  | -69.                   |
| 30.95         | 29.04         | +135.                  | +145.                  | +141.                  | -148.                  | -152.                  | -102.                  |
| 0.47          | 0.00          | +2.                    | +3.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    |
| 10.43         | 9.41          | +43.                   | +48.                   | +45.                   | -48.                   | -50.                   | -33.                   |
| 20.63         | 19.40         | +89.                   | +97.                   | +94.                   | -97.                   | -101.                  | -68.                   |
| 30.83         | 29.15         | +136.                  | +147.                  | +142.                  | -147.                  | -150.                  | -102.                  |
| 41.15         | 38.79         | +184.                  | +195.                  | +189.                  | -197.                  | -198.                  | -134.                  |
| 51.58         | 48.43         | +234.                  | +247.                  | +240.                  | -246.                  | -245.                  | -166.                  |
| 61.90         | 58.07         | +283.                  | +298.                  | +290.                  | -294.                  | -290.                  | -197.                  |
| 72.10         | 67.71         | +333.                  | +348.                  | +339.                  | -343.                  | -336.                  | -229.                  |
| 81.83         | 78.16         | +384.                  | +401.                  | +389.                  | -395.                  | -383.                  | -260.                  |
| 92.61         | 87.22         | +434.                  | +451.                  | +437.                  | -444.                  | -428.                  | -291.                  |
| 101.99        | 97.91         | +486.                  | +503.                  | +486.                  | -497.                  | -476.                  | -317.                  |
| 0.59          | 0.00          | +12.                   | +12.                   | +6.                    | +3.                    | +8.                    | +12.                   |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.2 DATA: 21/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 1

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 10.43         | 9.41          | -2.                               | +24.                              | -5.                               | +24.                              | -30.                              | +3.3                | -5.2                | +43.5                    |
| 20.63         | 19.16         | -4.                               | +52.                              | -9.                               | +52.                              | -65.                              | +7.3                | -11.2               | +43.6                    |
| 30.95         | 29.04         | -6.                               | +81.                              | -15.                              | +81.                              | -102.                             | +11.4               | -17.5               | +43.5                    |
| 0.47          | 0.00          | +1.                               | +1.                               | +1.                               | +1.                               | +1.                               | +0.3                | +0.3                | U/C                      |
| 10.43         | 9.41          | -1.                               | +25.                              | -4.                               | +25.                              | -29.                              | +3.6                | -4.9                | +43.5                    |
| 20.63         | 19.40         | -3.                               | +53.                              | -9.                               | +53.                              | -64.                              | +7.6                | -10.9               | +43.6                    |
| 30.83         | 29.15         | -5.                               | +82.                              | -14.                              | +82.                              | -101.                             | +11.7               | -17.2               | +43.5                    |
| 41.15         | 38.79         | -7.                               | +111.                             | -20.                              | +111.                             | -137.                             | +15.7               | -23.4               | +43.5                    |
| 51.58         | 48.43         | -6.                               | +142.                             | -25.                              | +142.                             | -172.                             | +20.4               | -29.2               | +43.3                    |
| 61.90         | 58.07         | -7.                               | +172.                             | -30.                              | +172.                             | -209.                             | +24.7               | -35.5               | +43.2                    |
| 72.10         | 67.71         | -7.                               | +202.                             | -37.                              | +203.                             | -246.                             | +29.0               | -41.8               | +43.1                    |
| 81.83         | 78.16         | -7.                               | +233.                             | -43.                              | +234.                             | -284.                             | +33.5               | -48.2               | +43.0                    |
| 92.61         | 87.22         | -7.                               | +265.                             | -50.                              | +265.                             | -322.                             | +38.0               | -54.6               | +42.9                    |
| 101.99        | 97.91         | -4.                               | +297.                             | -57.                              | +298.                             | -358.                             | +42.9               | -60.6               | +42.7                    |
| 0.59          | 0.00          | +14.                              | +9.                               | +5.                               | +14.                              | +5.                               | +3.5                | +2.0                | U/C                      |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.2 DATA: 21/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | α<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.0                    | +0.0                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.41                   | +12.                   | +36.                   | -2.                    | +37.                   | -26.                   | +6.5                    | -3.4                    | +38.5    |
| 20.63                  | 19.16                  | +19.                   | +71.                   | -10.                   | +72.                   | -64.                   | +12.0                   | -9.5                    | +38.8    |
| 30.95                  | 29.04                  | +25.                   | +105.                  | -20.                   | +107.                  | -103.                  | +17.2                   | -15.9                   | +38.9    |
| 0.47                   | 0.00                   | +3.                    | +2.                    | +2.                    | +3.                    | +2.                    | +0.8                    | +0.6                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.41                   | +14.                   | +38.                   | -1.                    | +39.                   | -25.                   | +7.0                    | -3.1                    | +38.2    |
| 20.63                  | 19.40                  | +20.                   | +72.                   | -9.                    | +73.                   | -63.                   | +12.3                   | -9.2                    | +38.8    |
| 30.83                  | 29.15                  | +26.                   | +106.                  | -18.                   | +108.                  | -101.                  | +17.6                   | -15.3                   | +39.0    |
| 41.15                  | 38.79                  | +31.                   | +141.                  | -28.                   | +144.                  | -141.                  | +22.9                   | -22.1                   | +39.0    |
| 51.58                  | 48.43                  | +39.                   | +178.                  | -36.                   | +182.                  | -179.                  | +28.8                   | -28.0                   | +39.0    |
| 61.90                  | 58.07                  | +43.                   | +213.                  | -45.                   | +217.                  | -219.                  | +34.1                   | -34.7                   | +39.1    |
| 72.10                  | 67.71                  | +49.                   | +247.                  | -56.                   | +252.                  | -259.                  | +39.3                   | -41.2                   | +39.1    |
| 81.83                  | 78.16                  | +55.                   | +282.                  | -65.                   | +288.                  | -298.                  | +44.7                   | -47.7                   | +39.1    |
| 92.61                  | 87.22                  | +60.                   | +318.                  | -76.                   | +324.                  | -341.                  | +50.1                   | -54.8                   | +39.1    |
| 101.99                 | 97.91                  | +65.                   | +352.                  | -85.                   | +360.                  | -380.                  | +55.5                   | -61.3                   | +39.1    |
| 0.59                   | 0.00                   | +11.                   | +9.                    | +5.                    | +12.                   | +4.                    | +2.9                    | +1.8                    | U/C      |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.2 DATA: 21/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 3

| F <sub>1</sub><br>(KN) | F <sub>2</sub><br>(KN) | ε <sub>a</sub><br>(μE) | ε <sub>b</sub><br>(μE) | ε <sub>c</sub><br>(μE) | ε <sub>1</sub><br>(μE) | ε <sub>2</sub><br>(μE) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.0                    | +0.0                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.41                   | +10.                   | +53.                   | +10.                   | +53.                   | -32.                   | +9.8                    | -3.7                    | +45.0    |
| 20.63                  | 19.16                  | +11.                   | +94.                   | +9.                    | +94.                   | -74.                   | +16.1                   | -10.3                   | +44.5    |
| 30.95                  | 29.04                  | +12.                   | +133.                  | +6.                    | +133.                  | -115.                  | +22.3                   | -17.0                   | +44.2    |
| 0.47                   | 0.00                   | +3.                    | +5.                    | +3.                    | +5.                    | +1.                    | +1.1                    | +0.5                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.41                   | +12.                   | +55.                   | +11.                   | +55.                   | -31.                   | +10.2                   | -3.3                    | +44.7    |
| 20.63                  | 19.40                  | +13.                   | +95.                   | +9.                    | +95.                   | -73.                   | +16.4                   | -10.0                   | +44.2    |
| 30.83                  | 29.15                  | +13.                   | +134.                  | +6.                    | +134.                  | -115.                  | +22.5                   | -16.9                   | +44.1    |
| 41.15                  | 38.79                  | +13.                   | +172.                  | +2.                    | +172.                  | -157.                  | +28.2                   | -23.8                   | +44.0    |
| 51.58                  | 48.43                  | +14.                   | +214.                  | -2.                    | +214.                  | -202.                  | +34.6                   | -31.0                   | +43.9    |
| 61.90                  | 58.07                  | +13.                   | +253.                  | -7.                    | +253.                  | -246.                  | +40.3                   | -38.4                   | +43.9    |
| 72.10                  | 67.71                  | +12.                   | +290.                  | -11.                   | +291.                  | -290.                  | +45.9                   | -45.6                   | +43.8    |
| 81.83                  | 78.16                  | +10.                   | +329.                  | -15.                   | +329.                  | -334.                  | +51.6                   | -53.0                   | +43.9    |
| 92.61                  | 87.22                  | +9.                    | +368.                  | -21.                   | +368.                  | -381.                  | +57.2                   | -60.8                   | +43.9    |
| 101.99                 | 97.91                  | +9.                    | +407.                  | -26.                   | +407.                  | -424.                  | +63.0                   | -68.0                   | +43.8    |
| 0.59                   | 0.00                   | +10.                   | +15.                   | +7.                    | +15.                   | +2.                    | +3.6                    | +1.4                    | U/C      |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.2 DATA: 21/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 4

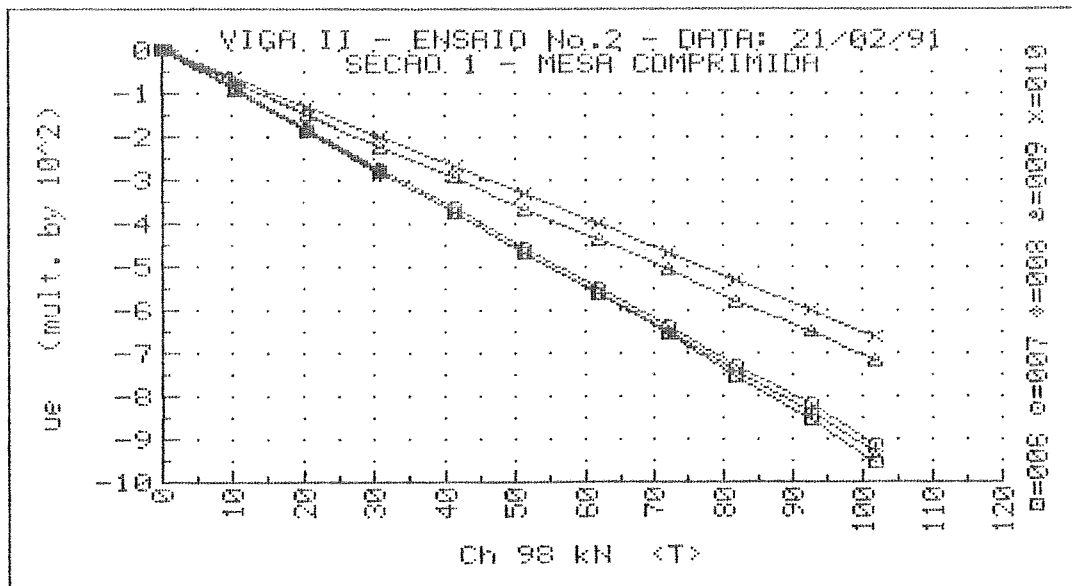
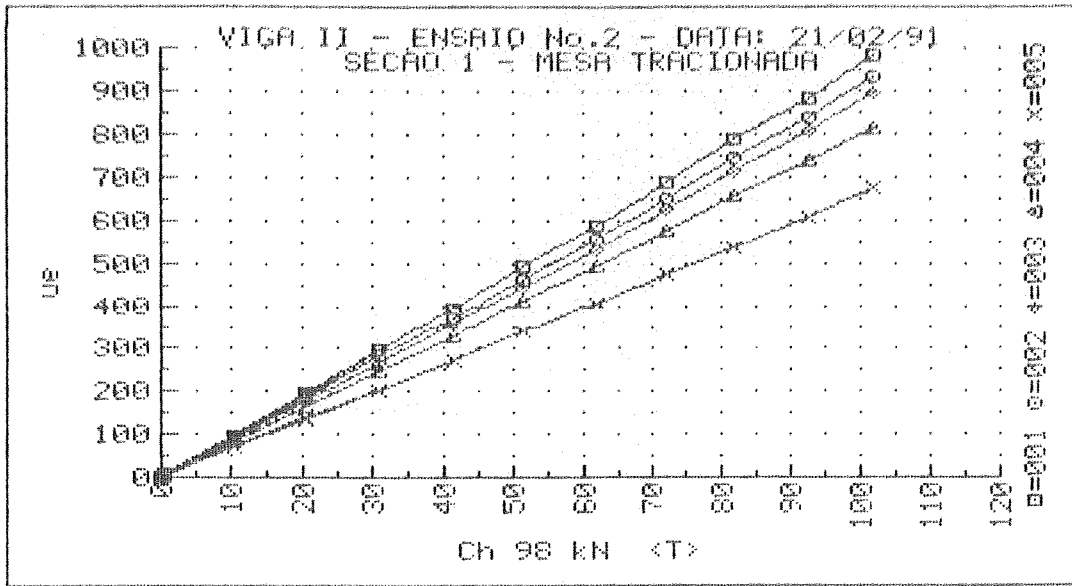
| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 10.43         | 9.41          | -1.                               | +37.                              | +0.                               | +37.                              | -38.                              | +5.8                | -6.0                | +45.4                    |
| 20.63         | 19.16         | -3.                               | +74.                              | -1.                               | +74.                              | -78.                              | +11.4               | -12.5               | +45.4                    |
| 30.95         | 29.04         | -4.                               | +111.                             | -3.                               | +111.                             | -117.                             | +17.0               | -19.0               | +45.1                    |
| 0.47          | 0.00          | +1.                               | +2.                               | +3.                               | +3.                               | +1.                               | +0.7                | +0.4                | U/C                      |
| 10.43         | 9.41          | -1.                               | +38.                              | +2.                               | +38.                              | -37.                              | +6.0                | -5.8                | +46.1                    |
| 20.63         | 19.40         | -2.                               | +75.                              | +0.                               | +75.                              | -77.                              | +11.7               | -12.2               | +45.4                    |
| 30.83         | 29.15         | -3.                               | +112.                             | -2.                               | +112.                             | -116.                             | +17.3               | -18.7               | +45.1                    |
| 41.15         | 38.79         | -5.                               | +147.                             | -5.                               | +147.                             | -156.                             | +22.5               | -25.3               | +45.0                    |
| 51.58         | 48.43         | -5.                               | +184.                             | -6.                               | +184.                             | -194.                             | +28.3               | -31.3               | +44.9                    |
| 61.90         | 58.07         | -6.                               | +219.                             | -9.                               | +219.                             | -233.                             | +33.5               | -37.7               | +44.8                    |
| 72.10         | 67.71         | -8.                               | +253.                             | -11.                              | +253.                             | -272.                             | +38.6               | -44.1               | +44.8                    |
| 81.83         | 78.16         | -9.                               | +288.                             | -15.                              | +288.                             | -312.                             | +43.8               | -50.7               | +44.7                    |
| 92.61         | 87.22         | -9.                               | +322.                             | -18.                              | +322.                             | -348.                             | +49.0               | -56.7               | +44.6                    |
| 101.99        | 97.91         | -9.                               | +357.                             | -22.                              | +357.                             | -388.                             | +54.2               | -63.3               | +44.5                    |
| 0.59          | 0.00          | +5.                               | +4.                               | +4.                               | +5.                               | +4.                               | +1.4                | +1.1                | U/C                      |

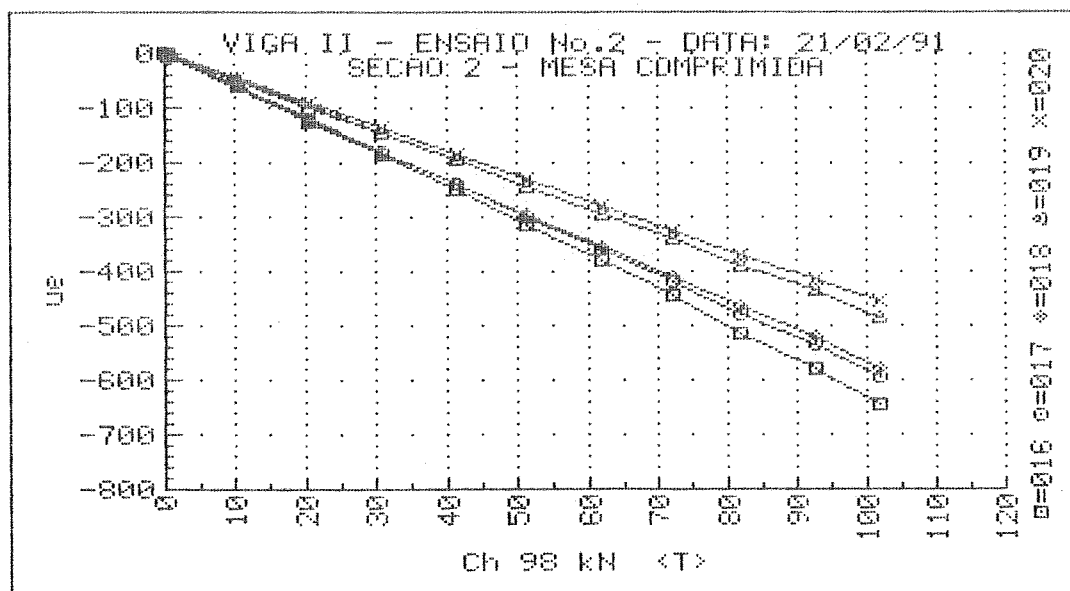
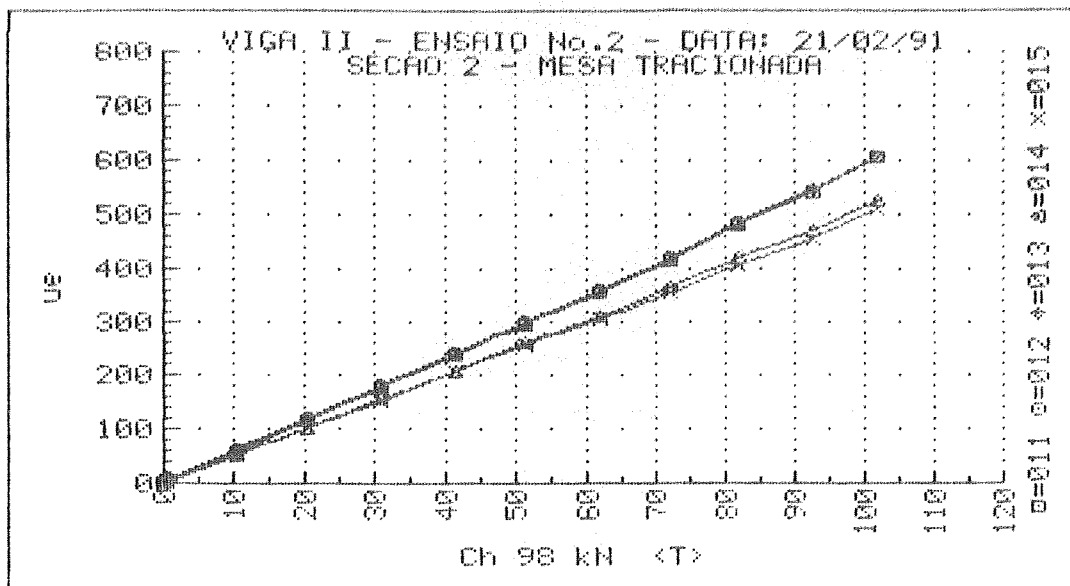
UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

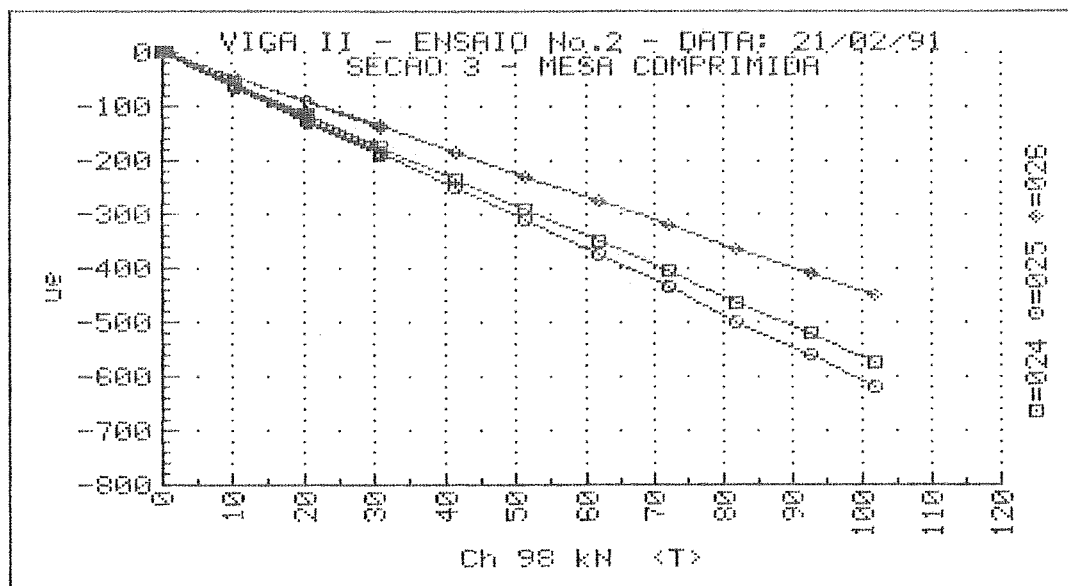
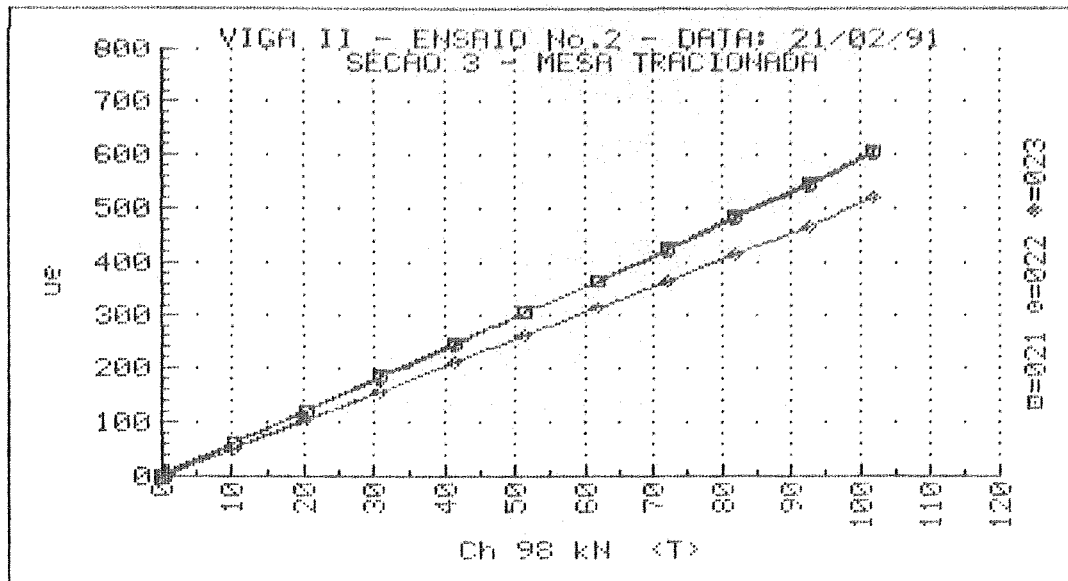
ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA II ENSAIO No.2 DATA: 21/02/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 5

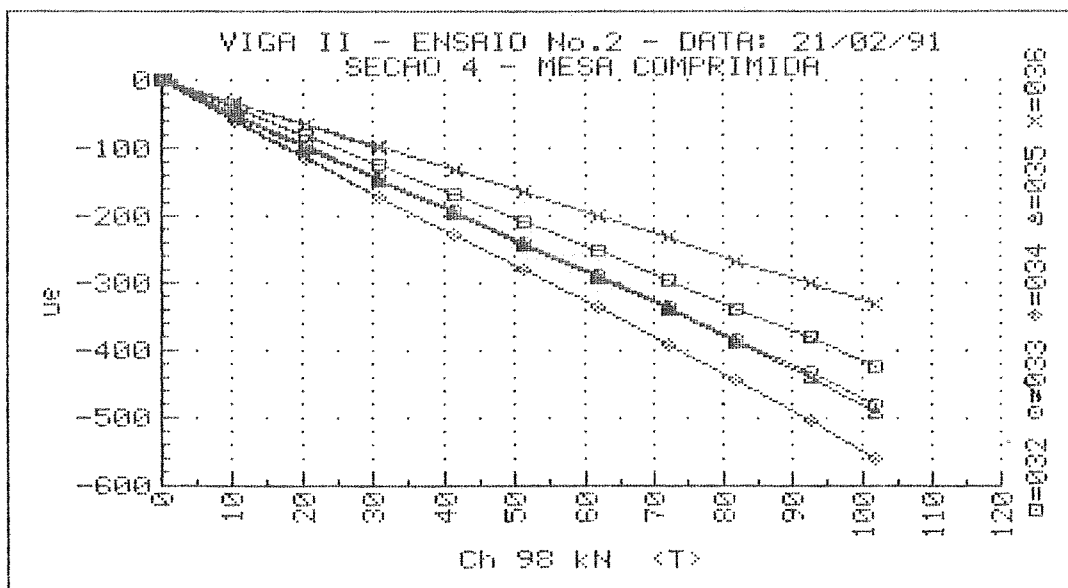
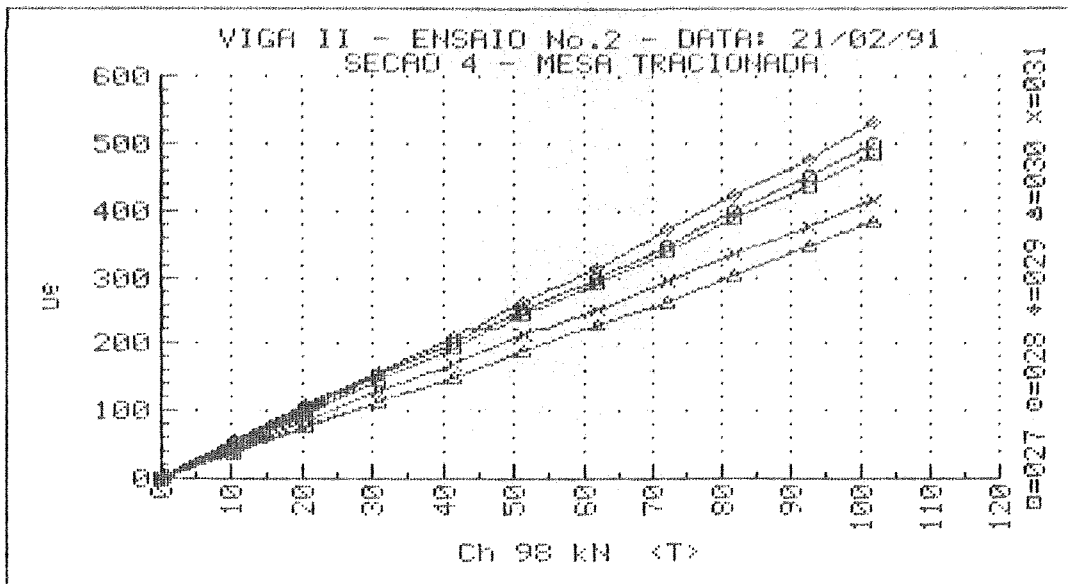
| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.0                    | +0.0                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.41                   | +4.                    | -37.                   | -6.                    | +35.                   | -37.                   | +5.4                    | -6.0                    | -41.3    |
| 20.63                  | 19.16                  | +5.                    | -76.                   | -11.                   | +70.                   | -76.                   | +10.5                   | -12.5                   | -41.8    |
| 30.95                  | 29.04                  | +6.                    | -114.                  | -16.                   | +104.                  | -114.                  | +15.6                   | -18.7                   | -42.1    |
| 0.47                   | 0.00                   | +2.                    | +0.                    | +1.                    | +3.                    | -0.                    | +0.7                    | +0.2                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.41                   | +5.                    | -36.                   | -5.                    | +36.                   | -36.                   | +5.7                    | -5.7                    | -41.3    |
| 20.63                  | 19.40                  | +6.                    | -75.                   | -10.                   | +70.                   | -75.                   | +10.8                   | -12.2                   | -41.8    |
| 30.83                  | 29.15                  | +7.                    | -114.                  | -15.                   | +106.                  | -114.                  | +16.1                   | -18.6                   | -42.2    |
| 41.15                  | 38.79                  | +7.                    | -152.                  | -20.                   | +140.                  | -153.                  | +21.1                   | -25.0                   | -42.4    |
| 51.58                  | 48.43                  | +9.                    | -189.                  | -23.                   | +176.                  | -190.                  | +26.7                   | -30.9                   | -42.6    |
| 61.90                  | 58.07                  | +9.                    | -227.                  | -25.                   | +212.                  | -228.                  | +32.3                   | -37.0                   | -42.8    |
| 72.10                  | 67.71                  | +9.                    | -264.                  | -28.                   | +246.                  | -265.                  | +37.5                   | -43.0                   | -42.9    |
| 81.83                  | 78.16                  | +10.                   | -303.                  | -31.                   | +283.                  | -303.                  | +43.2                   | -49.3                   | -43.0    |
| 92.61                  | 87.22                  | +10.                   | -340.                  | -34.                   | +317.                  | -340.                  | +48.3                   | -55.3                   | -43.1    |
| 101.99                 | 97.91                  | +13.                   | -378.                  | -38.                   | +355.                  | -379.                  | +54.3                   | -61.5                   | -43.0    |
| 0.59                   | 0.00                   | +8.                    | +3.                    | +8.                    | +12.                   | +3.                    | +3.0                    | +1.5                    | U/C      |

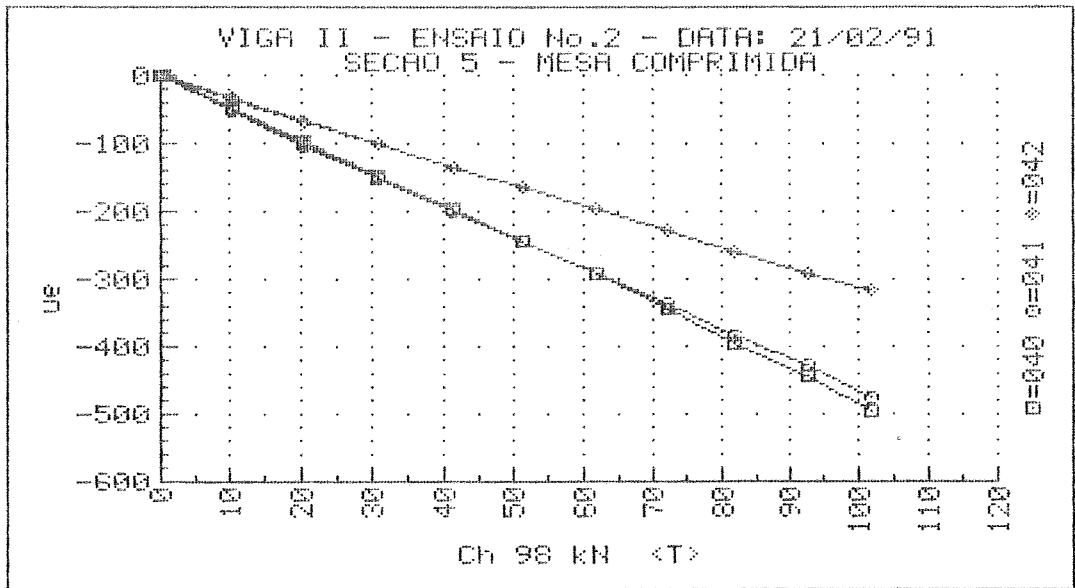
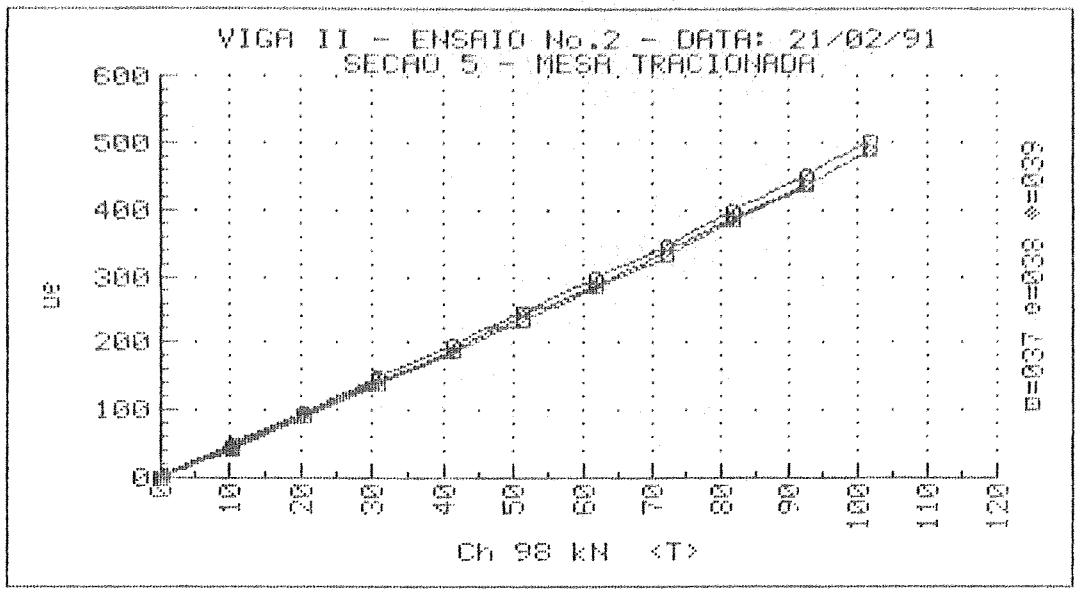


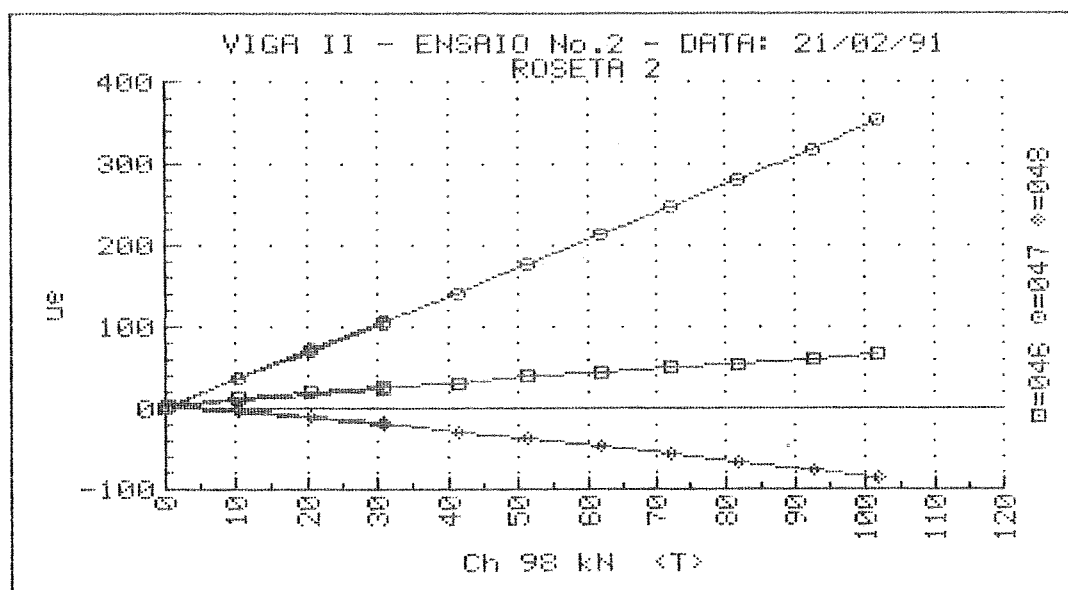
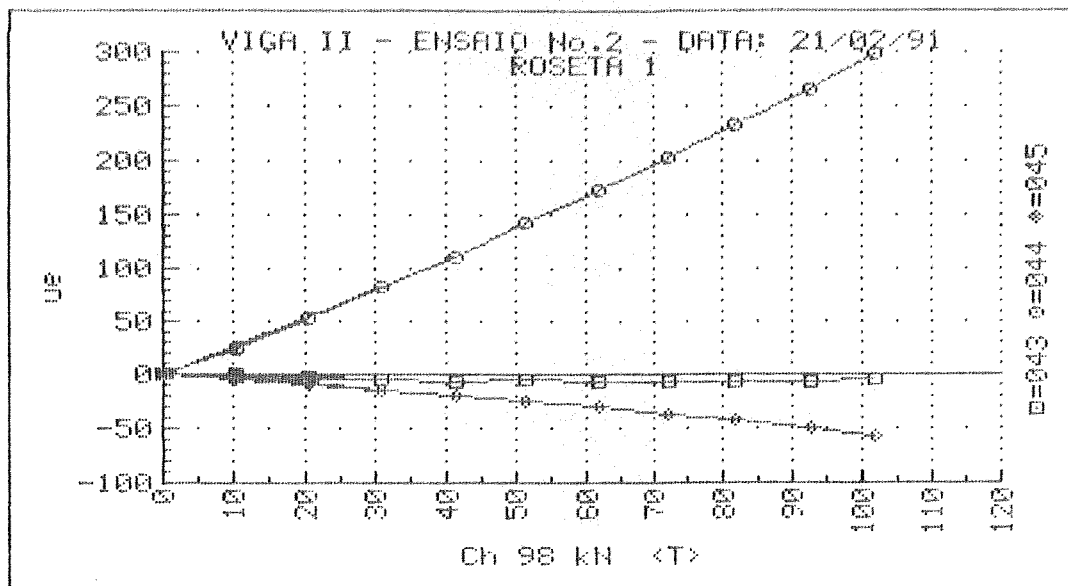


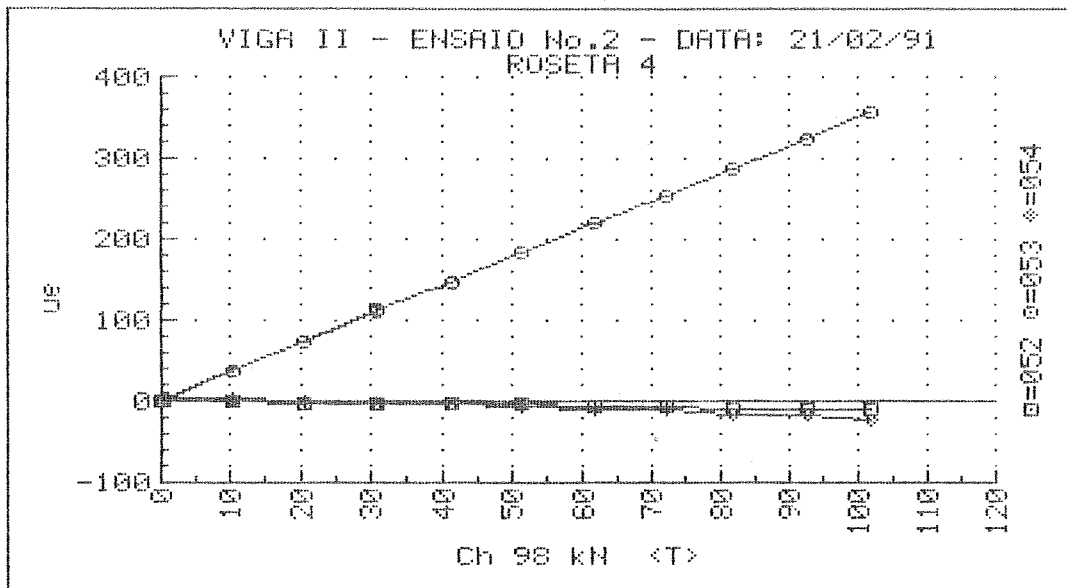
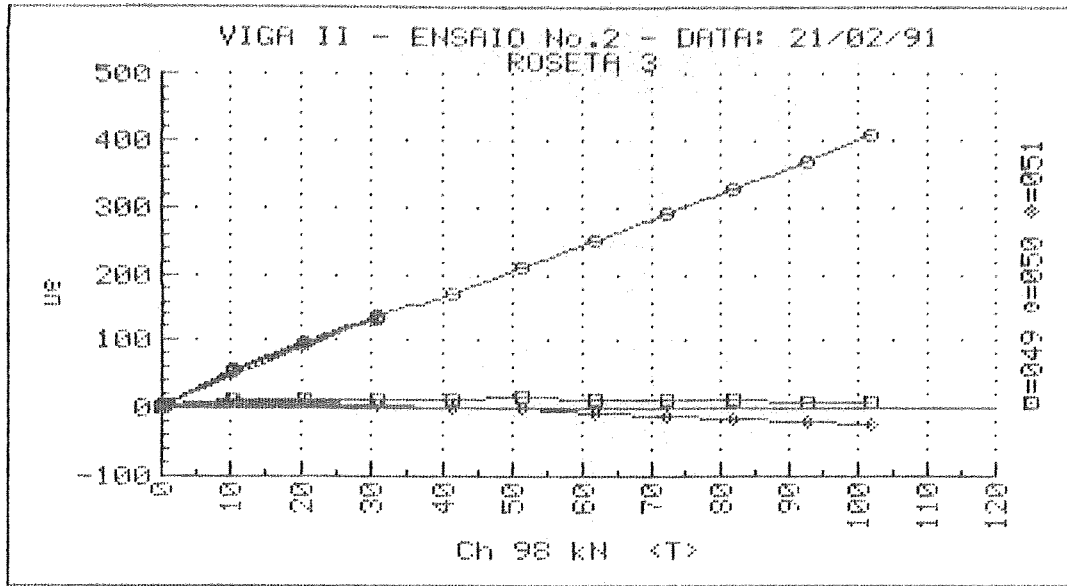




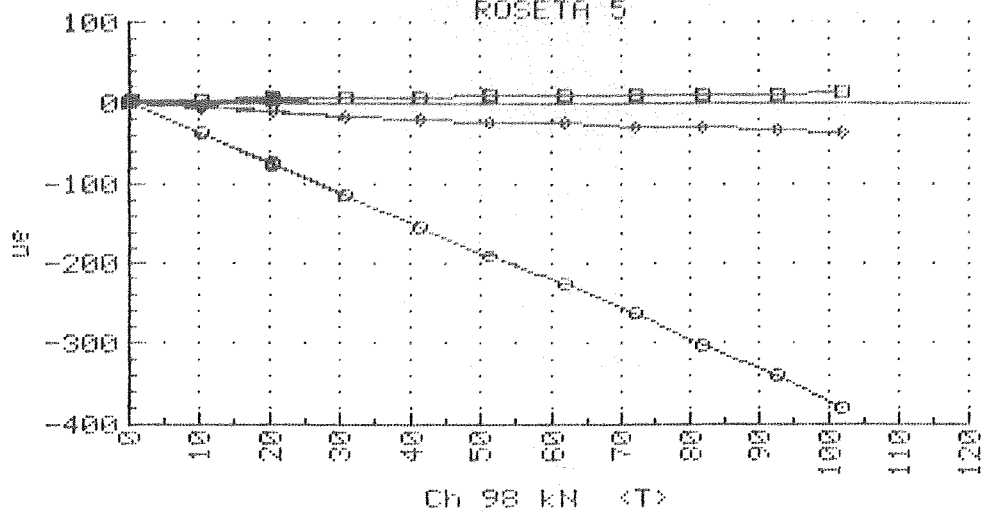








VIGA II - ENSAIO No.2 - DATA: 21/02/91  
ROSETA 5



B=055 a=056 d=057



## MODELO - VIGA III

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

- . ENSAIO 1
- . ENSAIO 2

- DESLOCAMENTOS

- DEFORMAÇÕES

## MODELO - VIGA III

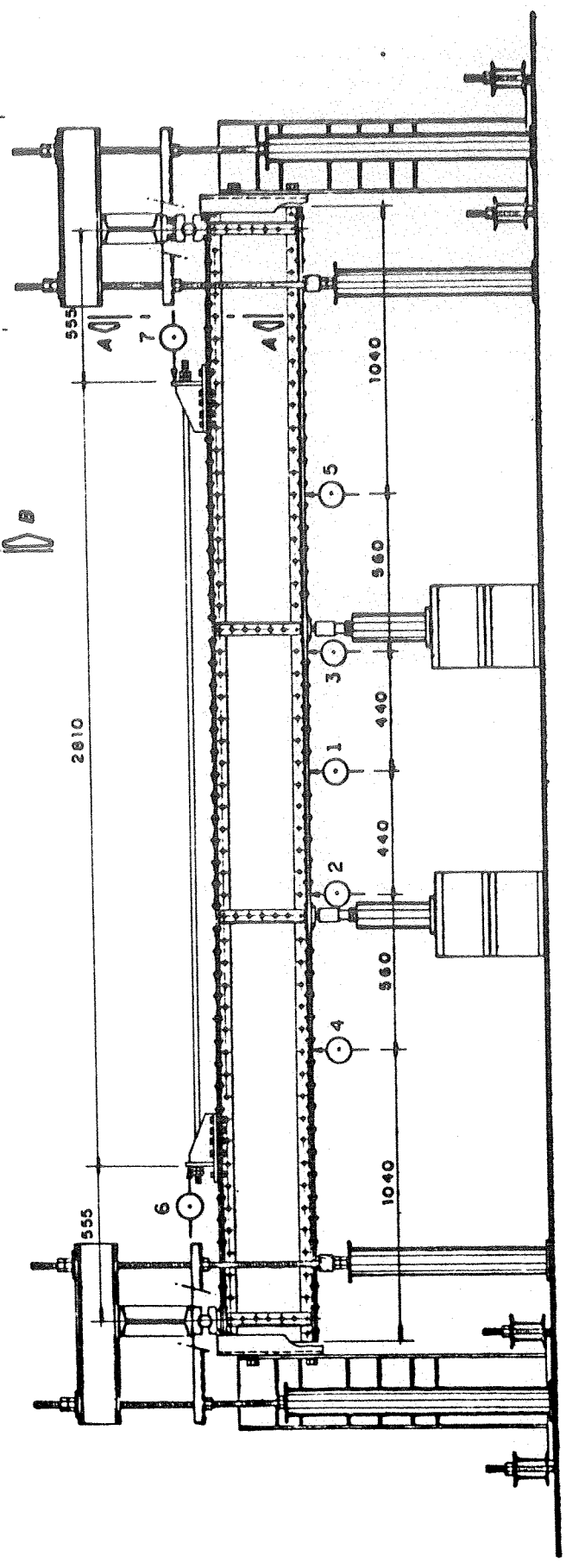
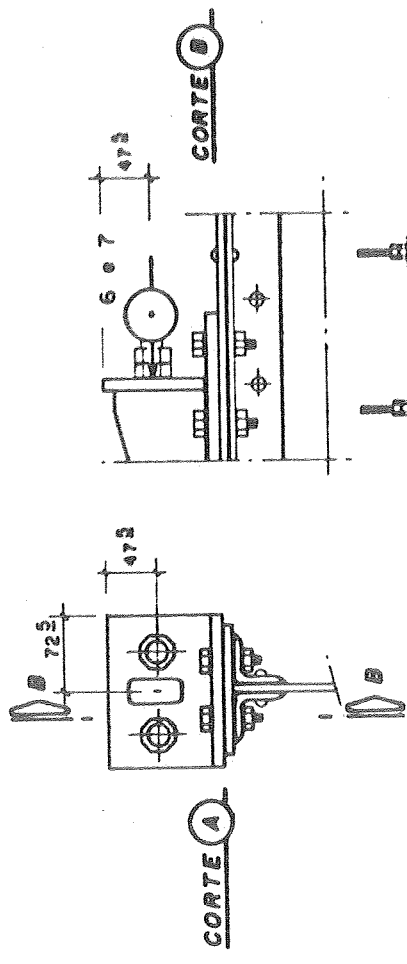
### RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### . ENSAIO 1

#### - DESLOCAMENTOS

#### .TABELAS

#### .GRÁFICOS



MODELO: VIGA REBITADA III

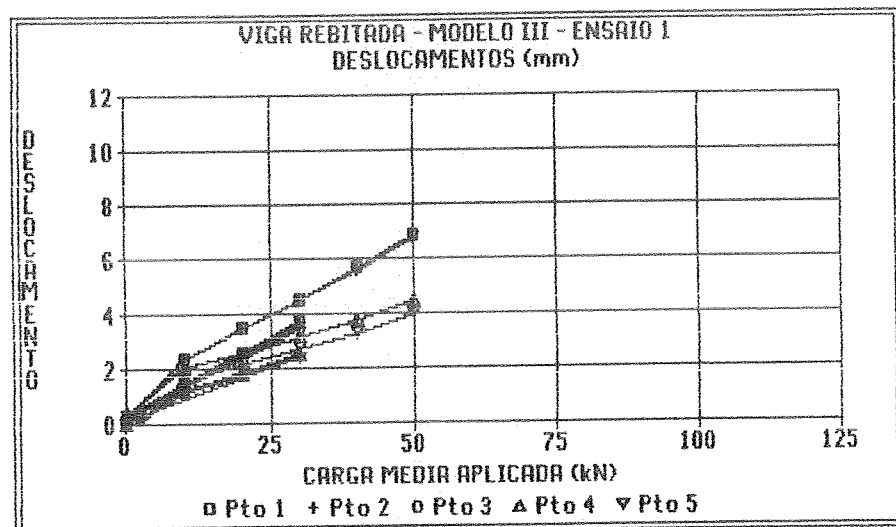
ENSAIO Nro:1

PROTENSÃO

DATA:13 DE MARÇO DE 1991

HORARIO: 8:45 Hs VIGA ARMADA

| ETAPA | CARGA APL<br>MEDIA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS<br>(mm) |       |       |      |       |
|-------|----------------------------|-----------------------|-------|-------|------|-------|
|       |                            | Pto 1                 | Pto 2 | Pto 3 | Pto4 | Pto 5 |
|       | 0.00                       | 0.00                  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 0.00  |
| 1     | .35                        | -.23                  | -.28  | -.13  | -.12 | .28   |
| 2     | 9.98                       | 1.46                  | 1.40  | 1.40  | 1.24 | 1.26  |
| 3     | 20.02                      | 2.58                  | 2.49  | 2.42  | 1.85 | 1.86  |
| 4     | 29.93                      | 3.69                  | 3.60  | 3.47  | 2.48 | 2.42  |
| 5     | .29                        | .26                   | .31   | .23   | .39  | .13   |
| 6     | 10.04                      | 2.40                  | 2.39  | 2.20  | 2.06 | 1.62  |
| 7     | 20.02                      | 3.49                  | 3.46  | 3.23  | 2.65 | 2.21  |
| 8     | 29.93                      | 4.54                  | 4.51  | 4.24  | 3.21 | 2.76  |
| 9     | 40.03                      | 5.66                  | 5.59  | 5.27  | 3.82 | 3.29  |
| 10    | 50.00                      | 6.90                  | 6.80  | 6.44  | 4.51 | 3.98  |
| 11    | .29                        | 1.16                  | 1.16  | 1.10  | 1.12 | .97   |



MODELO - VIGA III

RESULTADOS DOS ENSAIOS

. ENSAIO 1

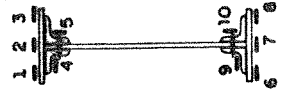
- DEFORMAÇÕES

EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA

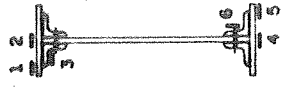
.UNIAXIAIS

.ROSETAS

Seções 1 e 2



Seção 3



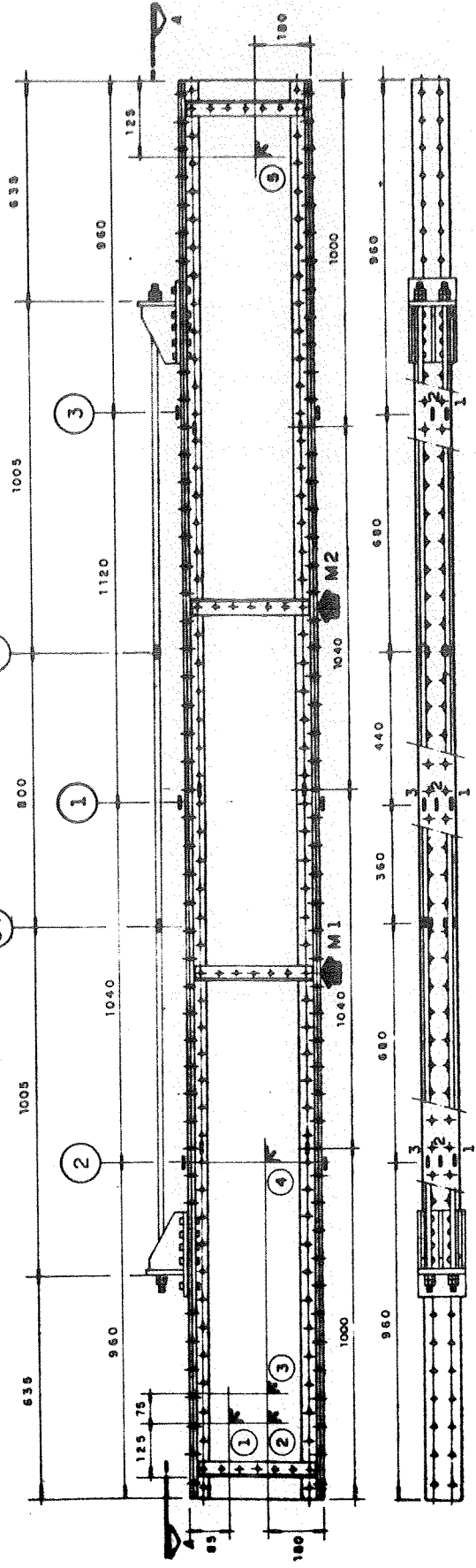
Seção 4



Seção 5



NUMERAÇÃO TÍPICA  
DAS ROSETAS



VISTA A

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.1 DATA: 13/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00                   | 0.12                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | -1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                     |
| 0.12                   | 0.12                   | -111.                  | -119.                  | -122.                  | -94.                   | -116.                  | +45.                   | +42.                   | +42.                   | +41.                   | +25.                    |
| 0.12                   | 0.12                   | +1.                    | +3.                    | +7.                    | +2.                    | +4.                    | -2.                    | +0.                    | +3.                    | -1.                    | +1.                     |
| 0.12                   | 0.12                   | -132.                  | -147.                  | -155.                  | -114.                  | -145.                  | +57.                   | +51.                   | +49.                   | +51.                   | +32.                    |
| 0.12                   | 0.12                   | +0.                    | +3.                    | +9.                    | +2.                    | +6.                    | -1.                    | +1.                    | +4.                    | +0.                    | +2.                     |
| 0.12                   | 0.12                   | -129.                  | -150.                  | -164.                  | -116.                  | -150.                  | +59.                   | +54.                   | +54.                   | +53.                   | +33.                    |
| 0.12                   | 0.12                   | +2.                    | +6.                    | +12.                   | +4.                    | +8.                    | +0.                    | +3.                    | +6.                    | +1.                    | +4.                     |
| 0.23                   | 0.23                   | -104.                  | -134.                  | -157.                  | -102.                  | -140.                  | +57.                   | +50.                   | +48.                   | +51.                   | +32.                    |
| 0.23                   | 0.12                   | +3.                    | +7.                    | +12.                   | +5.                    | +8.                    | +0.                    | +4.                    | +7.                    | +1.                    | +5.                     |
| 0.23                   | 0.23                   | +4.                    | +7.                    | +12.                   | +6.                    | +9.                    | +1.                    | +4.                    | +7.                    | +2.                    | +5.                     |
| 0.23                   | 0.23                   | -136.                  | -147.                  | -151.                  | -115.                  | -142.                  | +61.                   | +60.                   | +64.                   | +57.                   | +40.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -136.                  | -148.                  | -151.                  | -115.                  | -141.                  | +61.                   | +60.                   | +64.                   | +57.                   | +40.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -138.                  | -150.                  | -156.                  | -117.                  | -144.                  | +65.                   | +63.                   | +67.                   | +60.                   | +43.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -142.                  | -154.                  | -163.                  | -120.                  | -149.                  | +68.                   | +66.                   | +70.                   | +63.                   | +46.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -148.                  | -161.                  | -167.                  | -124.                  | -154.                  | +72.                   | +70.                   | +73.                   | +67.                   | +47.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -154.                  | -168.                  | -174.                  | -130.                  | -162.                  | +75.                   | +72.                   | +76.                   | +70.                   | +50.                    |
| 0.47                   | 0.23                   | -164.                  | -179.                  | -187.                  | -139.                  | -172.                  | +80.                   | +78.                   | +81.                   | +74.                   | +53.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -174.                  | -189.                  | -198.                  | -148.                  | -182.                  | +85.                   | +82.                   | +85.                   | +78.                   | +56.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -127.                  | -137.                  | -141.                  | -107.                  | -129.                  | +66.                   | +65.                   | +70.                   | +61.                   | +46.                    |
| 0.35                   | 0.12                   | +11.                   | +17.                   | +23.                   | +13.                   | +21.                   | +8.                    | +13.                   | +20.                   | +10.                   | +15.                    |
| -0.12                  | 0.00                   | +1.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                     |
| 0.35                   | 0.35                   | -96.                   | -107.                  | -116.                  | -85.                   | -108.                  | +36.                   | +35.                   | +34.                   | +33.                   | +20.                    |
| 10.20                  | 9.76                   | +18.                   | -9.                    | -34.                   | -10.                   | -27.                   | -93.                   | -72.                   | -56.                   | -85.                   | -61.                    |
| 20.52                  | 19.51                  | +127.                  | +96.                   | +60.                   | +67.                   | +61.                   | -217.                  | -185.                  | -164.                  | -200.                  | -149.                   |
| 30.72                  | 29.15                  | +235.                  | +201.                  | +159.                  | +144.                  | +148.                  | -340.                  | -297.                  | -273.                  | -308.                  | -234.                   |
| 0.35                   | 0.23                   | -89.                   | -101.                  | -110.                  | -80.                   | -103.                  | +30.                   | +32.                   | +37.                   | +39.                   | +20.                    |
| 10.43                  | 9.64                   | +25.                   | -2.                    | -29.                   | -5.                    | -22.                   | -102.                  | -75.                   | -54.                   | -82.                   | -61.                    |
| 20.63                  | 19.40                  | +131.                  | +99.                   | +65.                   | +70.                   | +63.                   | -222.                  | -187.                  | -164.                  | -195.                  | -148.                   |
| 30.72                  | 29.15                  | +236.                  | +204.                  | +163.                  | +146.                  | +150.                  | -340.                  | -297.                  | -274.                  | -307.                  | -235.                   |
| 41.03                  | 39.02                  | +348.                  | +319.                  | +269.                  | +215.                  | +242.                  | -464.                  | -412.                  | -387.                  | -417.                  | -321.                   |
| 51.11                  | 48.90                  | +463.                  | +440.                  | +375.                  | +280.                  | +332.                  | -592.                  | -526.                  | -497.                  | -528.                  | -404.                   |
| 0.35                   | 0.23                   | -68.                   | -67.                   | -94.                   | -97.                   | -88.                   | +18.                   | +28.                   | +36.                   | +39.                   | +24.                    |
| -0.23                  | -0.35                  | +24.                   | +32.                   | +8.                    | -19.                   | +8.                    | -7.                    | -1.                    | +0.                    | +14.                   | +8.                     |



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.1 DATA: 13/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAD 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00                   | 0.12                   | -1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                     |
| 0.12                   | 0.12                   | -115.                  | -117.                  | -120.                  | -98.                   | -105.                  | +36.                   | +43.                   | +50.                   | +33.                   | +27.                    |
| 0.12                   | 0.12                   | +2.                    | +1.                    | +6.                    | +3.                    | +5.                    | +0.                    | +1.                    | +2.                    | +0.                    | +1.                     |
| 0.12                   | 0.12                   | -135.                  | -144.                  | -154.                  | -120.                  | -130.                  | +43.                   | +54.                   | +65.                   | +41.                   | +33.                    |
| 0.12                   | 0.12                   | +2.                    | +1.                    | +7.                    | +4.                    | +7.                    | +1.                    | +2.                    | +3.                    | +1.                    | +3.                     |
| 0.12                   | 0.12                   | -126.                  | -147.                  | -168.                  | -120.                  | -137.                  | +43.                   | +58.                   | +72.                   | +42.                   | +37.                    |
| 0.12                   | 0.12                   | +5.                    | +2.                    | +9.                    | +6.                    | +8.                    | +3.                    | +3.                    | +5.                    | +3.                    | +5.                     |
| 0.23                   | 0.23                   | -101.                  | -132.                  | -160.                  | -106.                  | -126.                  | +42.                   | +54.                   | +65.                   | +40.                   | +34.                    |
| 0.23                   | 0.12                   | +6.                    | +3.                    | +10.                   | +7.                    | +9.                    | +3.                    | +4.                    | +6.                    | +3.                    | +5.                     |
| 0.23                   | 0.23                   | +7.                    | +4.                    | +10.                   | +7.                    | +9.                    | +5.                    | +6.                    | +7.                    | +5.                    | +7.                     |
| 0.23                   | 0.23                   | -137.                  | -146.                  | -151.                  | -118.                  | -127.                  | +49.                   | +63.                   | +78.                   | +47.                   | +43.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -137.                  | -145.                  | -151.                  | -118.                  | -126.                  | +49.                   | +63.                   | +78.                   | +47.                   | +43.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -143.                  | -148.                  | -150.                  | -121.                  | -127.                  | +55.                   | +66.                   | +80.                   | +52.                   | +46.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -148.                  | -152.                  | -153.                  | -124.                  | -131.                  | +58.                   | +69.                   | +83.                   | +54.                   | +47.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -153.                  | -160.                  | -161.                  | -129.                  | -138.                  | +61.                   | +73.                   | +86.                   | +58.                   | +50.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -163.                  | -166.                  | -166.                  | -136.                  | -143.                  | +65.                   | +76.                   | +90.                   | +60.                   | +52.                    |
| 0.47                   | 0.23                   | -175.                  | -178.                  | -176.                  | -145.                  | -153.                  | +70.                   | +80.                   | +94.                   | +64.                   | +55.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -185.                  | -189.                  | -188.                  | -153.                  | -163.                  | +73.                   | +85.                   | +99.                   | +69.                   | +58.                    |
| 0.35                   | 0.23                   | -132.                  | -137.                  | -137.                  | -111.                  | -115.                  | +57.                   | +68.                   | +82.                   | +53.                   | +48.                    |
| 0.35                   | 0.12                   | +16.                   | +13.                   | +21.                   | +17.                   | +20.                   | +13.                   | +15.                   | +19.                   | +12.                   | +16.                    |
| -0.12                  | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                     |
| 0.35                   | 0.35                   | -104.                  | -108.                  | -113.                  | -91.                   | -96.                   | +27.                   | +36.                   | +47.                   | +26.                   | +23.                    |
| 10.20                  | 9.76                   | -45.                   | -50.                   | -56.                   | -52.                   | -50.                   | -58.                   | -34.                   | -12.                   | -50.                   | -30.                    |
| 20.52                  | 19.51                  | +16.                   | +12.                   | +7.                    | -10.                   | -1.                    | -136.                  | -109.                  | -84.                   | -123.                  | -87.                    |
| 30.72                  | 29.15                  | +77.                   | +73.                   | +68.                   | +33.                   | +47.                   | -215.                  | -182.                  | -155.                  | -194.                  | -143.                   |
| 0.35                   | 0.23                   | -101.                  | -103.                  | -109.                  | -86.                   | -91.                   | +21.                   | +34.                   | +48.                   | +24.                   | +20.                    |
| 10.43                  | 9.64                   | -40.                   | -46.                   | -52.                   | -46.                   | -46.                   | -62.                   | -35.                   | -10.                   | -52.                   | -32.                    |
| 20.63                  | 19.40                  | +20.                   | +14.                   | +8.                    | -7.                    | +1.                    | -138.                  | -109.                  | -83.                   | -124.                  | -87.                    |
| 30.72                  | 29.15                  | +79.                   | +75.                   | +70.                   | +33.                   | +50.                   | -216.                  | -183.                  | -154.                  | -196.                  | -144.                   |
| 41.03                  | 39.02                  | +142.                  | +136.                  | +130.                  | +74.                   | +99.                   | -298.                  | -260.                  | -226.                  | -269.                  | -201.                   |
| 51.11                  | 48.90                  | +205.                  | +197.                  | +189.                  | +111.                  | +148.                  | -381.                  | -336.                  | -296.                  | -342.                  | -255.                   |
| 0.35                   | 0.23                   | -96.                   | -99.                   | -108.                  | -89.                   | -86.                   | +12.                   | +27.                   | +46.                   | +20.                   | +20.                    |
| -0.23                  | -0.35                  | +7.                    | +1.                    | -4.                    | -6.                    | +3.                    | -5.                    | -5.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                     |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.1 DATA: 13/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 3

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>(μE) | 2<br>(μE) | 3<br>(μE) | 4<br>(μE) | 5<br>(μE) | 6<br>(μE) |
|------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.00                   | 0.12                   | +0.       | +1.       | +0.       | +0.       | +0.       | +0.       |
| 0.12                   | 0.12                   | -118.     | -119.     | -94.      | +43.      | +53.      | +43.      |
| 0.12                   | 0.12                   | +3.       | +6.       | +3.       | -1.       | -3.       | +0.       |
| 0.12                   | 0.12                   | -145.     | -150.     | -115.     | +56.      | +71.      | +54.      |
| 0.12                   | 0.12                   | +3.       | +8.       | +4.       | +0.       | -4.       | +1.       |
| 0.12                   | 0.12                   | -148.     | -156.     | -118.     | +59.      | +75.      | +56.      |
| 0.12                   | 0.12                   | +6.       | +10.      | +7.       | +2.       | -3.       | +2.       |
| 0.23                   | 0.23                   | -133.     | -152.     | -107.     | +57.      | +70.      | +52.      |
| 0.23                   | 0.12                   | +6.       | +10.      | +7.       | +3.       | -4.       | +2.       |
| 0.23                   | 0.23                   | +7.       | +10.      | +7.       | +3.       | -4.       | +3.       |
| 0.23                   | 0.23                   | -146.     | -149.     | -114.     | +62.      | +72.      | +61.      |
| 0.35                   | 0.23                   | -146.     | -148.     | -114.     | +62.      | +72.      | +61.      |
| 0.35                   | 0.23                   | -149.     | -153.     | -117.     | +64.      | +73.      | +64.      |
| 0.35                   | 0.23                   | -153.     | -159.     | -121.     | +68.      | +76.      | +67.      |
| 0.35                   | 0.23                   | -160.     | -167.     | -126.     | +71.      | +81.      | +71.      |
| 0.35                   | 0.23                   | -167.     | -176.     | -132.     | +74.      | +85.      | +74.      |
| 0.47                   | 0.23                   | -178.     | -189.     | -141.     | +78.      | +89.      | +79.      |
| 0.35                   | 0.23                   | -189.     | -201.     | -150.     | +82.      | +94.      | +83.      |
| 0.35                   | 0.23                   | -137.     | -140.     | -107.     | +66.      | +74.      | +65.      |
| 0.35                   | 0.12                   | +16.      | +21.      | +17.      | +12.      | +3.       | +12.      |
| -0.12                  | 0.00                   | +0.       | +0.       | +0.       | +0.       | +0.       | +1.       |
| 0.35                   | 0.35                   | -109.     | -116.     | -88.      | +37.      | +44.      | +37.      |
| 10.20                  | 9.76                   | -54.      | -76.      | -47.      | -33.      | -35.      | -33.      |
| 20.52                  | 19.51                  | +6.       | -31.      | -4.       | -100.     | -111.     | -106.     |
| 30.72                  | 29.15                  | +64.      | +16.      | +41.      | -164.     | -184.     | -180.     |
| 0.35                   | 0.23                   | -107.     | -111.     | -86.      | +36.      | +44.      | +35.      |
| 10.43                  | 9.64                   | -51.      | -73.      | -46.      | -34.      | -39.      | -35.      |
| 20.63                  | 19.40                  | +7.       | -28.      | -2.       | -100.     | -113.     | -108.     |
| 30.72                  | 29.15                  | +65.      | +20.      | +42.      | -164.     | -185.     | -181.     |
| 41.03                  | 39.02                  | +125.     | +71.      | +87.      | -228.     | -257.     | -256.     |
| 51.11                  | 48.90                  | +186.     | +118.     | +129.     | -292.     | -331.     | -333.     |
| 0.35                   | 0.23                   | -103.     | -109.     | -86.      | +33.      | +35.      | +30.      |
| -0.23                  | -0.35                  | -1.       | -2.       | -7.       | +1.       | -9.       | -4.       |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.1 DATA: 13/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 TIRANTE 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | S1.1<br>(µε) | S1.2<br>(µε) | S1.3<br>(µε) | S1.4<br>(µε) | S2.1<br>(µε) | S2.2<br>(µε) |
|------------------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.00                   | 0.12                   | +1.          | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          |
| 0.12                   | 0.12                   | +366.        | +530.        | +489.        | +342.        | +503.        | +374.        |
| 0.12                   | 0.12                   | +5.          | -5.          | -11.         | -2.          | -6.          | +0.          |
| 0.12                   | 0.12                   | +458.        | +640.        | +578.        | +419.        | +613.        | +454.        |
| 0.12                   | 0.12                   | +58.         | +85.         | -70.         | -84.         | +92.         | -85.         |
| 0.12                   | 0.12                   | +433.        | +638.        | +605.        | +424.        | +625.        | +445.        |
| 0.12                   | 0.12                   | +43.         | +160.        | -70.         | -162.        | +167.        | -164.        |
| 0.23                   | 0.23                   | +378.        | +580.        | +526.        | +348.        | +555.        | +381.        |
| 0.23                   | 0.12                   | +37.         | +178.        | -66.         | -179.        | +187.        | -181.        |
| 0.23                   | 0.23                   | +51.         | +102.        | -68.         | -102.        | +99.         | -96.         |
| 0.23                   | 0.23                   | +5450.       | +688.        | +631.        | +459.        | +662.        | +493.        |
| 0.35                   | 0.23                   | +492.        | +686.        | +631.        | +459.        | +662.        | +493.        |
| 0.35                   | 0.23                   | +529.        | +711.        | +626.        | +469.        | +688.        | +501.        |
| 0.35                   | 0.23                   | +565.        | +737.        | +633.        | +485.        | +718.        | +513.        |
| 0.35                   | 0.23                   | +606.        | +772.        | +651.        | +509.        | +758.        | +533.        |
| 0.35                   | 0.23                   | +642.        | +805.        | +672.        | +534.        | +792.        | +555.        |
| 0.47                   | 0.23                   | +696.        | +854.        | +710.        | +577.        | +842.        | +592.        |
| 0.35                   | 0.23                   | +738.        | +896.        | +745.        | +615.        | +892.        | +632.        |
| 0.35                   | 0.23                   | +487.        | +685.        | +633.        | +459.        | +661.        | +491.        |
| 0.35                   | 0.12                   | -58.         | +210.        | +54.         | -182.        | +208.        | -173.        |
| -0.12                  | 0.00                   | +0.          | +0.          | +1.          | +0.          | +0.          | +0.          |
| 0.35                   | 0.35                   | +207.        | +333.        | +619.        | +482.        | +295.        | +527.        |
| 10.20                  | 9.76                   | +302.        | +425.        | +711.        | +570.        | +388.        | +624.        |
| 20.52                  | 19.51                  | +390.        | +510.        | +805.        | +675.        | +482.        | +720.        |
| 30.72                  | 29.15                  | +489.        | +610.        | +898.        | +769.        | +574.        | +813.        |
| 0.35                   | 0.23                   | +199.        | +327.        | +610.        | +473.        | +288.        | +520.        |
| 10.43                  | 9.64                   | +298.        | +421.        | +707.        | +573.        | +384.        | +620.        |
| 20.63                  | 19.40                  | +394.        | +515.        | +802.        | +672.        | +478.        | +716.        |
| 30.72                  | 29.15                  | +489.        | +608.        | +895.        | +767.        | +572.        | +811.        |
| 41.03                  | 39.02                  | +581.        | +699.        | +989.        | +861.        | +666.        | +906.        |
| 51.11                  | 48.90                  | +676.        | +792.        | +1084.       | +956.        | +760.        | +1001.       |
| 0.35                   | 0.23                   | +193.        | +321.        | +604.        | +467.        | +282.        | +515.        |
| -0.23                  | -0.35                  | +19.         | -17.         | -3.          | +29.         | -17.         | +33.         |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.1 DATA: 13/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 TIRANTE 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | S1.1<br>( $\mu\epsilon$ ) | S1.2<br>( $\mu\epsilon$ ) | S2.1<br>( $\mu\epsilon$ ) | S2.2<br>( $\mu\epsilon$ ) | S2.3<br>( $\mu\epsilon$ ) | S2.4<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0.00                   | 0.12                   | +1.                       | +0.                       | -1.                       | +0.                       | +1.                       | +1.                       |
| 0.12                   | 0.12                   | +314.                     | +556.                     | +325.                     | +419.                     | +544.                     | +461.                     |
| 0.12                   | 0.12                   | -31.                      | +26.                      | -71.                      | +87.                      | +59.                      | -92.                      |
| 0.12                   | 0.12                   | +419.                     | +675.                     | +432.                     | +527.                     | +661.                     | +575.                     |
| 0.12                   | 0.12                   | +7.                       | -13.                      | -20.                      | +57.                      | +11.                      | -63.                      |
| 0.12                   | 0.12                   | +458.                     | +710.                     | +497.                     | +550.                     | +673.                     | +624.                     |
| 0.12                   | 0.12                   | -32.                      | +36.                      | -69.                      | +92.                      | +68.                      | -86.                      |
| 0.23                   | 0.23                   | +421.                     | +685.                     | +440.                     | +525.                     | +665.                     | +587.                     |
| 0.23                   | 0.12                   | -162.                     | +169.                     | -196.                     | +74.                      | +198.                     | -50.                      |
| 0.23                   | 0.23                   | -112.                     | +123.                     | -161.                     | +94.                      | +163.                     | -73.                      |
| 0.23                   | 0.23                   | +449.                     | +707.                     | +463.                     | +556.                     | +692.                     | +607.                     |
| 0.35                   | 0.23                   | +449.                     | +710.                     | +463.                     | +556.                     | +692.                     | +607.                     |
| 0.35                   | 0.23                   | +449.                     | +741.                     | +464.                     | +558.                     | +726.                     | +643.                     |
| 0.35                   | 0.23                   | +456.                     | +775.                     | +469.                     | +566.                     | +763.                     | +678.                     |
| 0.35                   | 0.23                   | +476.                     | +820.                     | +485.                     | +588.                     | +811.                     | +721.                     |
| 0.35                   | 0.23                   | +497.                     | +855.                     | +504.                     | +611.                     | +849.                     | +759.                     |
| 0.47                   | 0.23                   | +533.                     | +907.                     | +542.                     | +650.                     | +904.                     | +814.                     |
| 0.35                   | 0.23                   | +573.                     | +955.                     | +576.                     | +683.                     | +949.                     | +861.                     |
| 0.35                   | 0.23                   | +453.                     | +698.                     | +466.                     | +553.                     | +685.                     | +605.                     |
| 0.35                   | 0.12                   | -153.                     | +186.                     | -171.                     | +21.                      | +200.                     | +28.                      |
| -0.12                  | 0.00                   | +1.                       | +0.                       | +0.                       | +0.                       | +0.                       | +0.                       |
| 0.35                   | 0.35                   | +461.                     | +363.                     | +516.                     | +317.                     | +314.                     | +499.                     |
| 10.20                  | 9.76                   | +543.                     | +442.                     | +600.                     | +399.                     | +394.                     | +579.                     |
| 20.52                  | 19.51                  | +633.                     | +529.                     | +688.                     | +487.                     | +479.                     | +665.                     |
| 30.72                  | 29.15                  | +720.                     | +614.                     | +776.                     | +574.                     | +565.                     | +751.                     |
| 0.35                   | 0.23                   | +453.                     | +356.                     | +509.                     | +309.                     | +306.                     | +490.                     |
| 10.43                  | 9.64                   | +538.                     | +437.                     | +594.                     | +393.                     | +387.                     | +572.                     |
| 20.63                  | 19.40                  | +630.                     | +525.                     | +685.                     | +483.                     | +476.                     | +662.                     |
| 30.72                  | 29.15                  | +721.                     | +615.                     | +776.                     | +574.                     | +565.                     | +752.                     |
| 41.03                  | 39.02                  | +812.                     | +703.                     | +867.                     | +666.                     | +655.                     | +840.                     |
| 51.11                  | 48.90                  | +902.                     | +792.                     | +957.                     | +756.                     | +744.                     | +929.                     |
| 0.35                   | 0.23                   | +449.                     | +350.                     | +504.                     | +305.                     | +301.                     | +485.                     |
| -0.23                  | -0.35                  | +114.                     | -96.                      | +107.                     | +55.                      | -89.                      | -51.                      |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.1 DATA: 13/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.12                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.0                    | +0.0                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | +2.                    | +3.                    | -6.                    | +4.                    | -8.                    | +0.4                    | -1.5                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | +0.                    | -1.                    | +1.                    | +2.                    | -1.                    | +0.4                    | -0.1                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | +4.                    | +6.                    | -10.                   | +8.                    | -15.                   | +0.8                    | -2.8                    | +25.9    |
| 0.12                   | 0.12                   | +1.                    | -1.                    | +2.                    | +4.                    | -1.                    | +0.8                    | +0.0                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | +7.                    | +9.                    | -13.                   | +13.                   | -19.                   | +1.6                    | -3.5                    | +26.1    |
| 0.12                   | 0.12                   | +2.                    | +0.                    | +4.                    | +6.                    | -0.                    | +1.3                    | +0.4                    | U/C      |
| 0.23                   | 0.23                   | +8.                    | +11.                   | -10.                   | +14.                   | -17.                   | +2.0                    | -2.9                    | +27.4    |
| 0.23                   | 0.12                   | +3.                    | +2.                    | +5.                    | +6.                    | +2.                    | +1.4                    | +0.8                    | U/C      |
| 0.23                   | 0.23                   | +5.                    | +3.                    | +7.                    | +9.                    | +3.                    | +2.1                    | +1.2                    | U/C      |
| 0.23                   | 0.23                   | +10.                   | +12.                   | -3.                    | +15.                   | -7.                    | +2.8                    | -0.6                    | +26.1    |
| 0.35                   | 0.23                   | +10.                   | +12.                   | -3.                    | +15.                   | -7.                    | +2.8                    | -0.6                    | +26.1    |
| 0.35                   | 0.23                   | +12.                   | +14.                   | +2.                    | +16.                   | -2.                    | +3.5                    | +0.7                    | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | +13.                   | +15.                   | +3.                    | +17.                   | -1.                    | +3.7                    | +1.0                    | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | +14.                   | +16.                   | +4.                    | +18.                   | +0.                    | +4.0                    | +1.2                    | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | +15.                   | +16.                   | +5.                    | +18.                   | +2.                    | +4.2                    | +1.6                    | U/C      |
| 0.47                   | 0.23                   | +15.                   | +17.                   | +6.                    | +19.                   | +2.                    | +4.3                    | +1.8                    | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | +16.                   | +18.                   | +6.                    | +20.                   | +2.                    | +4.6                    | +1.8                    | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | +17.                   | +18.                   | +7.                    | +20.                   | +4.                    | +4.7                    | +2.2                    | U/C      |
| 0.35                   | 0.12                   | +14.                   | +13.                   | +19.                   | +21.                   | +12.                   | +5.5                    | +4.2                    | -62.8    |
| -0.12                  | 0.00                   | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | -0.                    | +0.2                    | +0.0                    | U/C      |
| 0.35                   | 0.35                   | +2.                    | +2.                    | -10.                   | +4.                    | -13.                   | +0.1                    | -2.6                    | U/C      |
| 10.20                  | 9.76                   | +1.                    | -39.                   | -41.                   | +8.                    | -48.                   | -1.4                    | -10.3                   | -21.1    |
| 20.52                  | 19.51                  | +18.                   | -75.                   | -37.                   | +61.                   | -80.                   | +8.4                    | -13.9                   | -33.6    |
| 30.72                  | 29.15                  | +31.                   | -114.                  | -41.                   | +110.                  | -119.                  | +16.7                   | -19.5                   | -35.9    |
| 0.35                   | 0.23                   | +5.                    | +4.                    | -5.                    | +6.                    | -6.                    | +1.0                    | -1.0                    | +19.3    |
| 10.43                  | 9.64                   | +19.                   | -29.                   | -12.                   | +40.                   | -33.                   | +6.7                    | -4.7                    | -32.2    |
| 20.63                  | 19.40                  | +26.                   | -70.                   | -26.                   | +75.                   | -75.                   | +11.8                   | -11.8                   | -35.0    |
| 30.72                  | 29.15                  | +31.                   | -113.                  | -39.                   | +111.                  | -118.                  | +16.9                   | -19.1                   | -36.1    |
| 41.03                  | 39.02                  | +35.                   | -157.                  | -57.                   | +142.                  | -164.                  | +21.0                   | -27.4                   | -36.3    |
| 51.11                  | 48.90                  | +35.                   | -200.                  | -71.                   | +171.                  | -207.                  | +24.6                   | -35.1                   | -36.9    |
| 0.35                   | 0.23                   | -7.                    | +5.                    | -12.                   | +5.                    | -24.                   | -0.5                    | -5.1                    | +39.3    |
| -0.23                  | -0.35                  | -10.                   | +2.                    | -7.                    | +2.                    | -19.                   | -0.8                    | -4.2                    | U/C      |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.1 DATA: 13/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 2

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.12          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 0.12          | 0.12          | +3.                               | -1.                               | +0.                               | +4.                               | -1.                               | +0.9                | -0.0                | U/C                      |
| 0.12          | 0.12          | +1.                               | +0.                               | +1.                               | +2.                               | +0.                               | +0.4                | +0.1                | U/C                      |
| 0.12          | 0.12          | +5.                               | +0.                               | -1.                               | +5.                               | -2.                               | +1.1                | +0.0                | U/C                      |
| 0.12          | 0.12          | +2.                               | +0.                               | +2.                               | +4.                               | +0.                               | +0.9                | +0.3                | U/C                      |
| 0.12          | 0.12          | +7.                               | +2.                               | +0.                               | +7.                               | -0.                               | +1.5                | +0.4                | U/C                      |
| 0.12          | 0.12          | +4.                               | +2.                               | +4.                               | +6.                               | +2.                               | +1.4                | +0.8                | U/C                      |
| 0.23          | 0.23          | +8.                               | +5.                               | +2.                               | +8.                               | +2.                               | +1.8                | +0.9                | U/C                      |
| 0.23          | 0.12          | +4.                               | +3.                               | +5.                               | +6.                               | +3.                               | +1.5                | +1.0                | U/C                      |
| 0.23          | 0.23          | +6.                               | +5.                               | +7.                               | +8.                               | +5.                               | +2.0                | +1.6                | U/C                      |
| 0.23          | 0.23          | +12.                              | +8.                               | +7.                               | +13.                              | +6.                               | +3.3                | +2.2                | -16.8                    |
| 0.35          | 0.23          | +12.                              | +7.                               | +7.                               | +13.                              | +5.                               | +3.4                | +2.1                | -22.5                    |
| 0.35          | 0.23          | +13.                              | +9.                               | +9.                               | +14.                              | +8.                               | +3.6                | +2.8                | -15.5                    |
| 0.35          | 0.23          | +14.                              | +10.                              | +9.                               | +15.                              | +9.                               | +3.9                | +3.0                | -15.4                    |
| 0.35          | 0.23          | +15.                              | +11.                              | +10.                              | +16.                              | +10.                              | +4.2                | +3.3                | -15.4                    |
| 0.35          | 0.23          | +16.                              | +11.                              | +10.                              | +17.                              | +10.                              | +4.4                | +3.3                | -16.8                    |
| 0.47          | 0.23          | +17.                              | +12.                              | +11.                              | +18.                              | +11.                              | +4.7                | +3.6                | -16.8                    |
| 0.35          | 0.23          | +17.                              | +12.                              | +12.                              | +18.                              | +11.                              | +4.8                | +3.8                | -22.5                    |
| 0.35          | 0.23          | +18.                              | +13.                              | +13.                              | +19.                              | +12.                              | +5.1                | +4.0                | -22.5                    |
| 0.35          | 0.12          | +16.                              | +14.                              | +17.                              | +19.                              | +14.                              | +5.2                | +4.5                | -50.6                    |
| -0.12         | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 0.35          | 0.35          | +3.                               | -3.                               | -3.                               | +4.                               | -4.                               | +0.6                | -0.6                | U/C                      |
| 10.20         | 9.76          | +3.                               | -39.                              | -11.                              | +31.                              | -40.                              | +4.3                | -6.8                | -39.2                    |
| 20.52         | 19.51         | +10.                              | -72.                              | -17.                              | +67.                              | -73.                              | +10.1               | -12.0               | -39.3                    |
| 30.72         | 29.15         | +16.                              | -105.                             | -23.                              | +100.                             | -107.                             | +15.4               | -17.3               | -39.6                    |
| 0.35          | 0.23          | +6.                               | +1.                               | +1.                               | +7.                               | -0.                               | +1.5                | +0.4                | U/C                      |
| 10.43         | 9.64          | +10.                              | -29.                              | -7.                               | +34.                              | -30.                              | +5.7                | -4.6                | -37.4                    |
| 20.63         | 19.40         | +14.                              | -66.                              | -13.                              | +69.                              | -68.                              | +10.9               | -10.6               | -39.2                    |
| 30.72         | 29.15         | +17.                              | -105.                             | -22.                              | +102.                             | -107.                             | +15.8               | -17.2               | -39.7                    |
| 41.03         | 39.02         | +21.                              | -143.                             | -27.                              | +138.                             | -145.                             | +21.4               | -23.3               | -40.1                    |
| 51.11         | 48.90         | +24.                              | -180.                             | -33.                              | +173.                             | -182.                             | +26.6               | -29.4               | -40.4                    |
| 0.35          | 0.23          | +7.                               | +2.                               | +5.                               | +10.                              | +2.                               | +2.3                | +1.0                | U/C                      |
| -0.23         | -0.35         | +3.                               | +3.                               | +6.                               | +6.                               | +2.                               | +1.6                | +0.9                | U/C                      |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.1 DATA: 13/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 3

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>d</sub><br>(με) | ε <sub>e</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.12                   | +1.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                    | -0.                    | +0.2                    | +0.0                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | +3.                    | -1.                    | -3.                    | +3.                    | -3.                    | +0.5                    | -0.5                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | +2.                    | +2.                    | +2.                    | +2.                    | +2.                    | +0.6                    | +0.6                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | +4.                    | -2.                    | -5.                    | +4.                    | -5.                    | +0.6                    | -0.8                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | +4.                    | +3.                    | +4.                    | +5.                    | +3.                    | +1.3                    | +1.0                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | +6.                    | +0.                    | -6.                    | +6.                    | -6.                    | +0.9                    | -0.9                    | -0.0     |
| 0.12                   | 0.12                   | +6.                    | +6.                    | +6.                    | +6.                    | +6.                    | +1.7                    | +1.7                    | -22.5    |
| 0.23                   | 0.23                   | +8.                    | +3.                    | -4.                    | +8.                    | -4.                    | +1.5                    | -0.4                    | U/C      |
| 0.23                   | 0.12                   | +7.                    | +7.                    | +7.                    | +7.                    | +7.                    | +1.9                    | +1.9                    | -22.5    |
| 0.23                   | 0.23                   | +9.                    | +9.                    | +8.                    | +9.                    | +7.                    | +2.5                    | +2.3                    | +22.4    |
| 0.23                   | 0.23                   | +11.                   | +6.                    | +2.                    | +11.                   | +2.                    | +2.7                    | +1.2                    | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | +11.                   | +6.                    | +2.                    | +11.                   | +2.                    | +2.7                    | +1.2                    | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | +13.                   | +9.                    | +5.                    | +13.                   | +5.                    | +3.3                    | +2.0                    | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | +14.                   | +9.                    | +6.                    | +14.                   | +6.                    | +3.6                    | +2.2                    | -3.2     |
| 0.35                   | 0.23                   | +15.                   | +10.                   | +7.                    | +15.                   | +7.                    | +3.9                    | +2.5                    | -3.2     |
| 0.35                   | 0.23                   | +16.                   | +10.                   | +7.                    | +16.                   | +7.                    | +4.1                    | +2.6                    | -5.7     |
| 0.47                   | 0.23                   | +17.                   | +11.                   | +8.                    | +17.                   | +7.                    | +4.4                    | +2.8                    | -5.7     |
| 0.35                   | 0.23                   | +18.                   | +12.                   | +9.                    | +18.                   | +8.                    | +4.6                    | +3.1                    | -5.7     |
| 0.35                   | 0.23                   | +18.                   | +12.                   | +9.                    | +18.                   | +8.                    | +4.6                    | +3.1                    | -5.7     |
| 0.35                   | 0.12                   | +18.                   | +18.                   | +17.                   | +18.                   | +17.                   | +5.2                    | +5.0                    | +22.2    |
| -0.12                  | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | -0.                    | +0.2                    | +0.0                    | U/C      |
| 0.35                   | 0.35                   | +0.                    | -7.                    | -6.                    | +2.                    | -8.                    | -0.1                    | -1.6                    | U/C      |
| 10.20                  | 9.76                   | -4.                    | -43.                   | -10.                   | +29.                   | -43.                   | +3.5                    | -7.7                    | -42.3    |
| 20.52                  | 19.51                  | +0.                    | -78.                   | -6.                    | +72.                   | -78.                   | +11.0                   | -12.6                   | -43.9    |
| 30.72                  | 29.15                  | +1.                    | -114.                  | -3.                    | +112.                  | -114.                  | +17.5                   | -18.0                   | -44.5    |
| 0.35                   | 0.23                   | +1.                    | -5.                    | -3.                    | +3.                    | -5.                    | +0.4                    | -0.9                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.64                   | +3.                    | -37.                   | -2.                    | +38.                   | -37.                   | +6.0                    | -5.8                    | -43.2    |
| 20.63                  | 19.40                  | +3.                    | -74.                   | -2.                    | +75.                   | -74.                   | +11.9                   | -11.6                   | -44.1    |
| 30.72                  | 29.15                  | +2.                    | -113.                  | -2.                    | +113.                  | -113.                  | +17.8                   | -17.8                   | -44.5    |
| 41.03                  | 39.02                  | +2.                    | -150.                  | -1.                    | +151.                  | -150.                  | +23.9                   | -23.7                   | -44.7    |
| 51.11                  | 48.90                  | +2.                    | -187.                  | +1.                    | +190.                  | -187.                  | +30.2                   | -29.4                   | -44.9    |
| 0.35                   | 0.23                   | +0.                    | -5.                    | -2.                    | +3.                    | -5.                    | +0.3                    | -0.9                    | U/C      |
| -0.23                  | -0.35                  | -1.                    | +0.                    | +2.                    | +2.                    | -1.                    | +0.4                    | -0.1                    | U/C      |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.1 DATA: 13/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 4

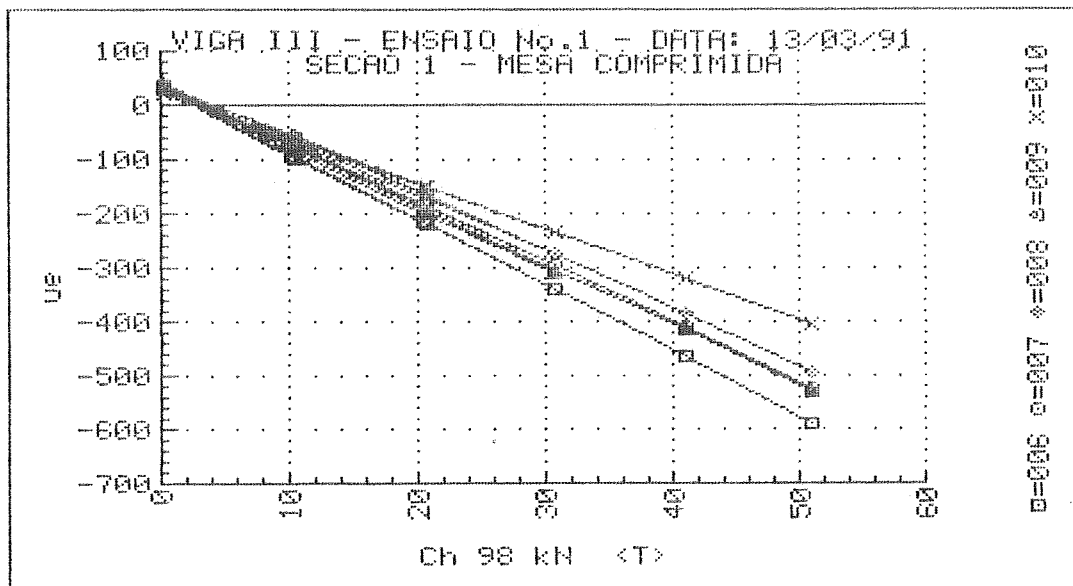
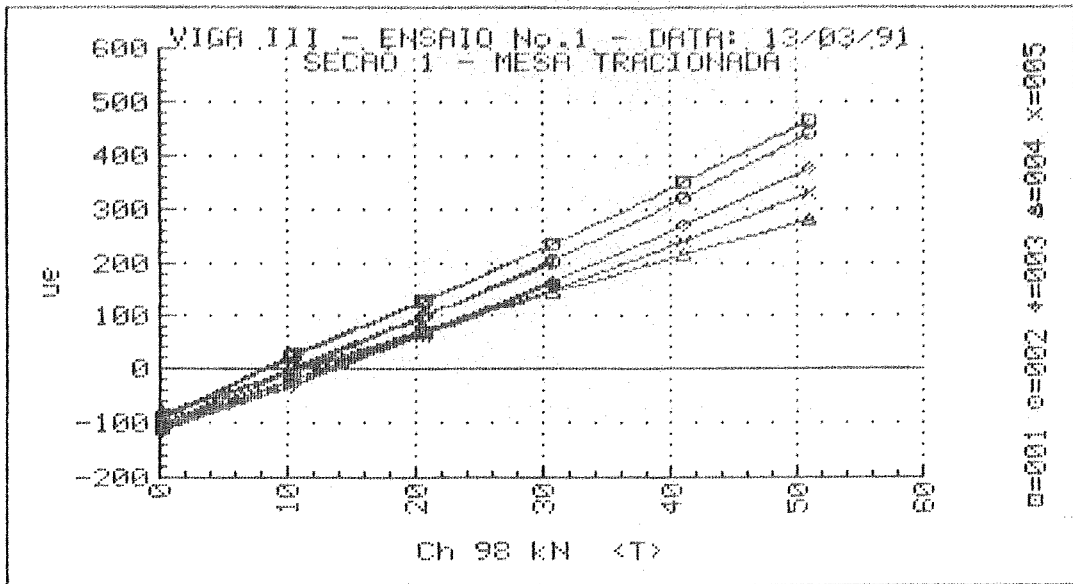
| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.12                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.0                    | +0.0                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | -39.                   | -22.                   | -3.                    | -3.                    | -39.                   | -3.3                    | -8.9                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | -0.                    | +0.2                    | +0.0                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | -47.                   | -28.                   | -9.                    | -9.                    | -47.                   | -5.1                    | -11.2                   | -89.3    |
| 0.12                   | 0.12                   | +1.                    | +1.                    | +2.                    | +2.                    | +1.                    | +0.5                    | +0.3                    | U/C      |
| 0.12                   | 0.12                   | -47.                   | -28.                   | -12.                   | -12.                   | -47.                   | -6.0                    | -11.5                   | +87.7    |
| 0.12                   | 0.12                   | +2.                    | +2.                    | +4.                    | +4.                    | +2.                    | +1.0                    | +0.6                    | U/C      |
| 0.23                   | 0.23                   | -42.                   | -23.                   | -9.                    | -8.                    | -42.                   | -4.7                    | -10.0                   | +85.9    |
| 0.23                   | 0.12                   | +3.                    | +3.                    | +4.                    | +4.                    | +3.                    | +1.1                    | +0.9                    | U/C      |
| 0.23                   | 0.23                   | +4.                    | +4.                    | +4.                    | +4.                    | +4.                    | +1.1                    | +1.1                    | U/C      |
| 0.23                   | 0.23                   | -44.                   | -25.                   | -5.                    | -5.                    | -44.                   | -4.1                    | -10.3                   | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | -44.                   | -25.                   | -5.                    | -5.                    | -44.                   | -4.1                    | -10.3                   | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | -44.                   | -22.                   | +1.                    | +1.                    | -44.                   | -2.8                    | -10.0                   | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | -46.                   | -22.                   | +3.                    | +3.                    | -46.                   | -2.5                    | -10.3                   | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | -47.                   | -22.                   | +4.                    | +4.                    | -47.                   | -2.3                    | -10.4                   | U/C      |
| 0.35                   | 0.23                   | -50.                   | -23.                   | +5.                    | +5.                    | -50.                   | -2.3                    | -11.0                   | U/C      |
| 0.47                   | 0.23                   | -53.                   | -24.                   | +7.                    | +7.                    | -53.                   | -2.1                    | -11.5                   | -89.5    |
| 0.35                   | 0.23                   | -57.                   | -24.                   | +8.                    | +8.                    | -57.                   | -2.1                    | -12.3                   | +89.2    |
| 0.35                   | 0.23                   | -40.                   | -16.                   | +7.                    | +7.                    | -40.                   | -1.2                    | -8.5                    | +89.4    |
| 0.35                   | 0.12                   | +10.                   | +13.                   | +14.                   | +14.                   | +10.                   | +3.9                    | +3.3                    | +76.7    |
| -0.12                  | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.0                    | +0.0                    | U/C      |
| 0.35                   | 0.35                   | -38.                   | -25.                   | -8.                    | -7.                    | -38.                   | -4.2                    | -9.1                    | -86.4    |
| 10.20                  | 9.76                   | -48.                   | -63.                   | -8.                    | +13.                   | -69.                   | -1.7                    | -14.6                   | -59.9    |
| 20.52                  | 19.51                  | -59.                   | -103.                  | -5.                    | +45.                   | -108.                  | +2.0                    | -21.3                   | -55.3    |
| 30.72                  | 29.15                  | -68.                   | -144.                  | -2.                    | +79.                   | -149.                  | +7.7                    | -28.2                   | -53.5    |
| 0.35                   | 0.23                   | -34.                   | -23.                   | -9.                    | -8.                    | -34.                   | -4.2                    | -8.3                    | -86.8    |
| 10.43                  | 9.64                   | -45.                   | -61.                   | -6.                    | +15.                   | -66.                   | -1.1                    | -13.8                   | -59.8    |
| 20.63                  | 19.40                  | -57.                   | -102.                  | -4.                    | +46.                   | -107.                  | +3.2                    | -21.0                   | -55.1    |
| 30.72                  | 29.15                  | -68.                   | -144.                  | -3.                    | +78.                   | -149.                  | +7.5                    | -28.2                   | -53.4    |
| 41.03                  | 39.02                  | -78.                   | -186.                  | -2.                    | +111.                  | -190.                  | +12.1                   | -35.4                   | -52.3    |
| 51.11                  | 48.90                  | -84.                   | -225.                  | -1.                    | +145.                  | -230.                  | +17.1                   | -42.0                   | -51.4    |
| 0.35                   | 0.23                   | -27.                   | -21.                   | -11.                   | -11.                   | -27.                   | -4.3                    | -6.8                    | -83.0    |
| -0.23                  | -0.35                  | +6.                    | +0.                    | -4.                    | +6.                    | -4.                    | +1.0                    | -0.5                    | U/C      |

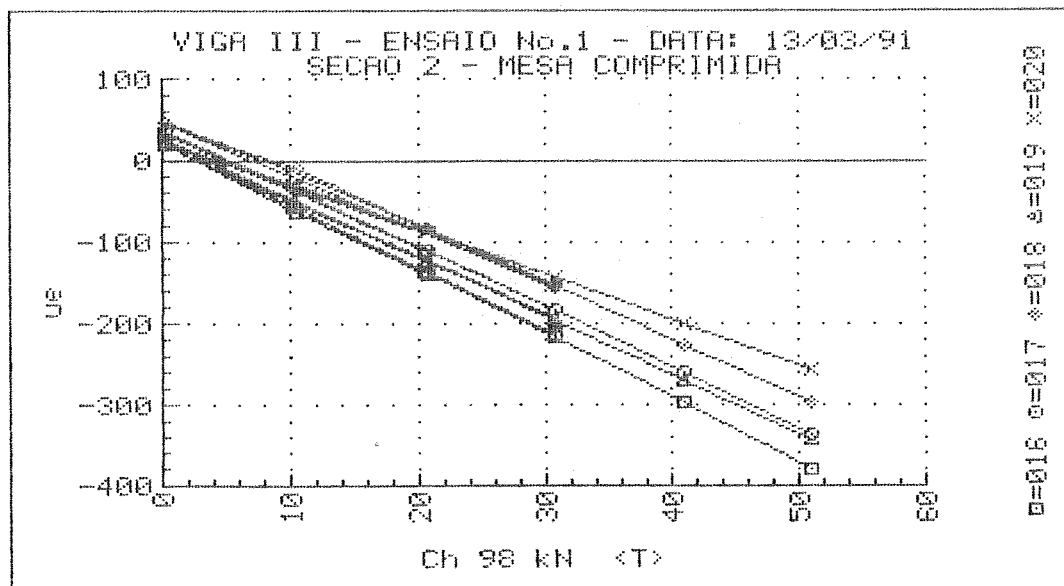
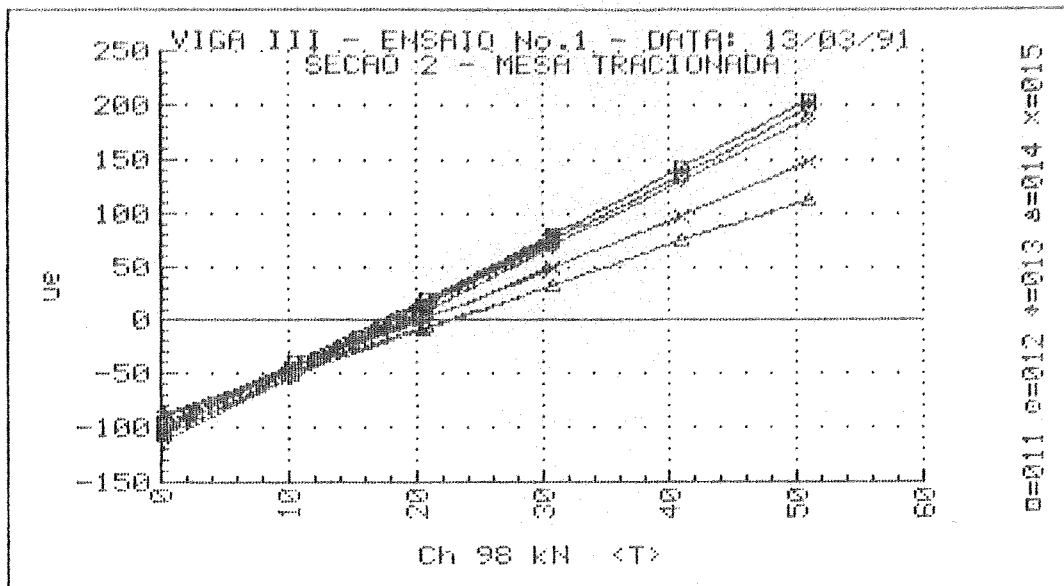


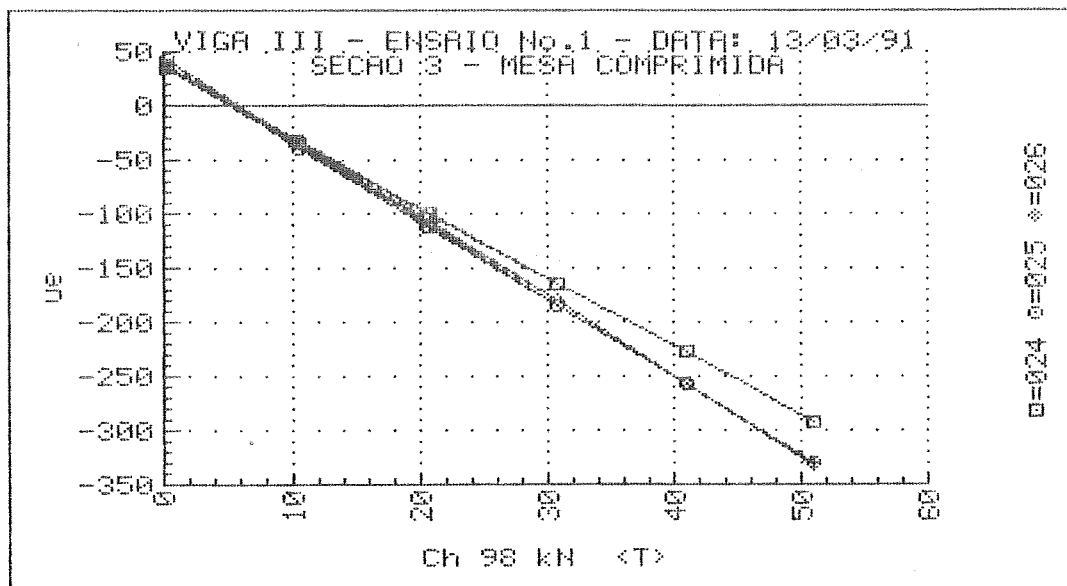
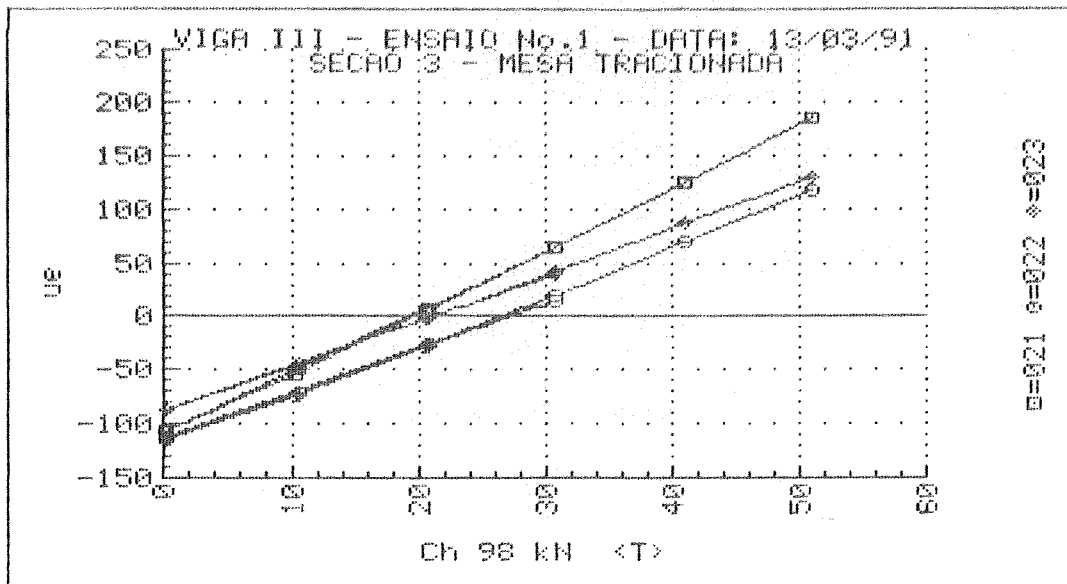
UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

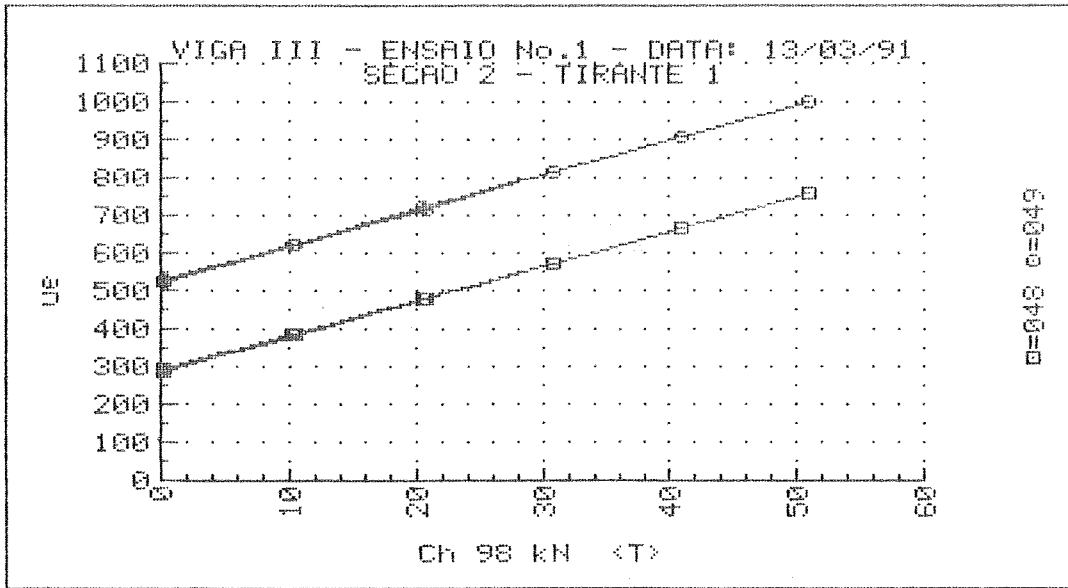
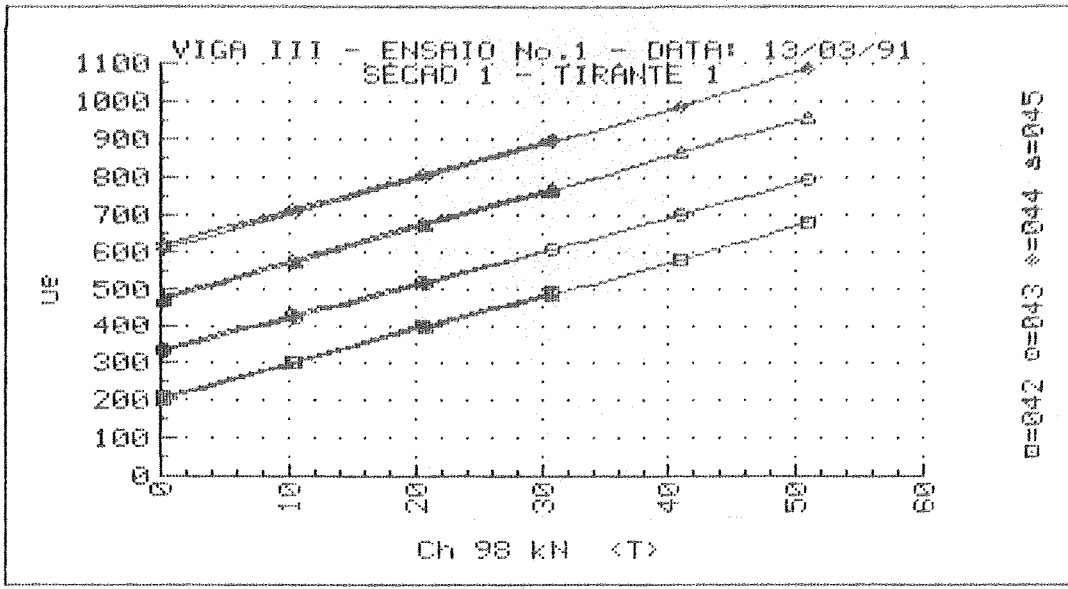
ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.1 DATA: 13/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 5

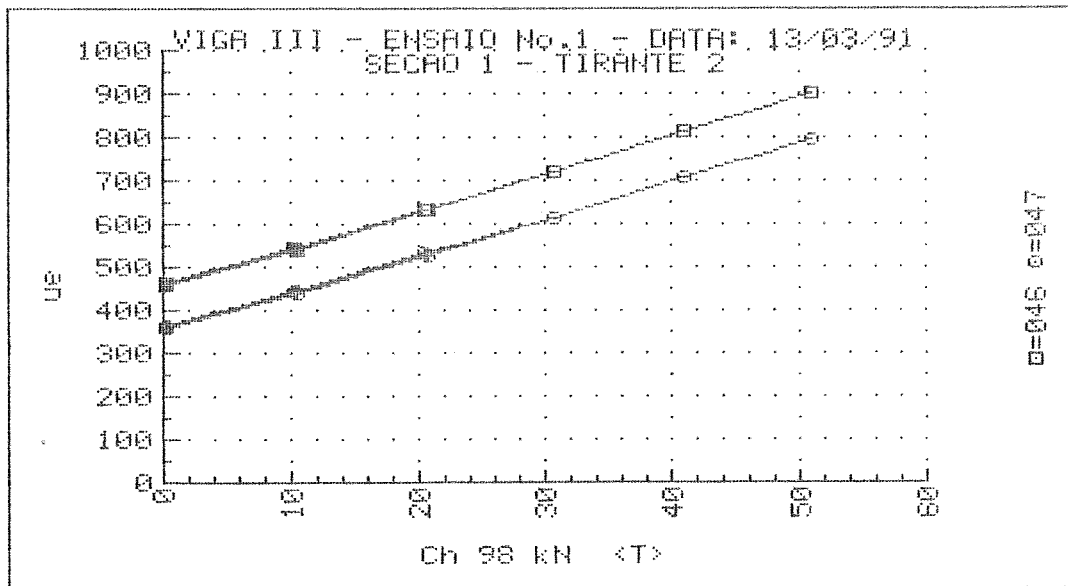
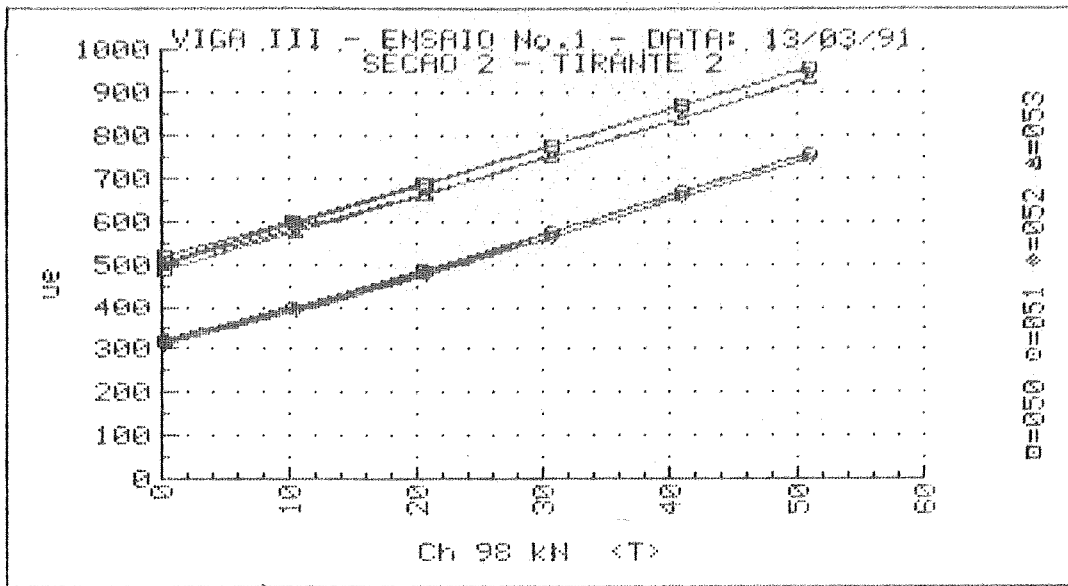
| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.12          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 0.12          | 0.12          | -1.                               | +1.                               | +3.                               | +3.                               | -1.                               | +0.6                | -0.0                | U/C                      |
| 0.12          | 0.12          | +0.                               | +2.                               | +1.                               | +2.                               | -1.                               | +0.4                | -0.1                | U/C                      |
| 0.12          | 0.12          | -2.                               | +1.                               | +6.                               | +6.                               | -2.                               | +1.2                | -0.1                | U/C                      |
| 0.12          | 0.12          | +1.                               | +3.                               | +3.                               | +3.                               | +1.                               | +0.8                | +0.3                | U/C                      |
| 0.12          | 0.12          | -1.                               | +2.                               | +9.                               | +9.                               | -1.                               | +1.9                | +0.3                | U/C                      |
| 0.12          | 0.12          | +3.                               | +5.                               | +5.                               | +5.                               | +2.                               | +1.3                | +0.9                | U/C                      |
| 0.23          | 0.23          | +0.                               | +2.                               | +9.                               | +10.                              | -1.                               | +2.3                | +0.5                | U/C                      |
| 0.23          | 0.12          | +3.                               | +5.                               | +6.                               | +6.                               | +3.                               | +1.5                | +1.0                | U/C                      |
| 0.23          | 0.23          | +4.                               | +6.                               | +6.                               | +6.                               | +3.                               | +1.6                | +1.2                | U/C                      |
| 0.23          | 0.23          | +4.                               | +7.                               | +8.                               | +8.                               | +4.                               | +2.0                | +1.3                | U/C                      |
| 0.35          | 0.23          | +4.                               | +9.                               | +14.                              | +14.                              | +4.                               | +3.5                | +1.8                | U/C                      |
| 0.35          | 0.23          | +6.                               | +10.                              | +15.                              | +15.                              | +6.                               | +3.8                | +2.3                | +90.0                    |
| 0.35          | 0.23          | +7.                               | +10.                              | +16.                              | +16.                              | +7.                               | +4.1                | +2.6                | -84.3                    |
| 0.35          | 0.23          | +8.                               | +12.                              | +17.                              | +17.                              | +8.                               | +4.3                | +2.9                | +90.0                    |
| 0.35          | 0.23          | +9.                               | +12.                              | +18.                              | +18.                              | +8.                               | +4.6                | +3.1                | -84.3                    |
| 0.47          | 0.23          | +9.                               | +12.                              | +18.                              | +18.                              | +8.                               | +4.6                | +3.1                | -84.3                    |
| 0.35          | 0.23          | +9.                               | +13.                              | +19.                              | +19.                              | +9.                               | +4.9                | +3.4                | -84.3                    |
| 0.35          | 0.23          | +9.                               | +14.                              | +19.                              | +19.                              | +9.                               | +4.9                | +3.4                | +90.0                    |
| 0.35          | 0.12          | +12.                              | +15.                              | +16.                              | +16.                              | +12.                              | +4.5                | +3.8                | +76.7                    |
| -0.12         | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 0.35          | 0.35          | -2.                               | -2.                               | +2.                               | +3.                               | -3.                               | +0.4                | -0.4                | U/C                      |
| 10.20         | 9.76          | +12.                              | +27.                              | -3.                               | +28.                              | -18.                              | +5.0                | -2.2                | +35.4                    |
| 20.52         | 19.51         | +22.                              | +61.                              | -11.                              | +63.                              | -53.                              | +10.6               | -7.6                | +36.7                    |
| 30.72         | 29.15         | +28.                              | +93.                              | -21.                              | +96.                              | -89.                              | +15.7               | -13.4               | +37.3                    |
| 0.35          | 0.23          | -2.                               | -4.                               | +3.                               | +5.                               | -4.                               | +0.9                | -0.6                | U/C                      |
| 10.43         | 9.64          | +10.                              | +25.                              | -4.                               | +26.                              | -19.                              | +4.5                | -2.6                | +35.8                    |
| 20.63         | 19.40         | +20.                              | +59.                              | -12.                              | +61.                              | -53.                              | +10.1               | -7.9                | +36.8                    |
| 30.72         | 29.15         | +27.                              | +93.                              | -22.                              | +96.                              | -91.                              | +15.4               | -14.1               | +37.5                    |
| 41.03         | 39.02         | +32.                              | +126.                             | -32.                              | +130.                             | -130.                             | +20.5               | -20.5               | +37.8                    |
| 51.11         | 48.90         | +35.                              | +155.                             | -44.                              | +160.                             | -169.                             | +24.7               | -27.1               | +38.1                    |
| 0.35          | 0.23          | -5.                               | -14.                              | +0.                               | +10.                              | -14.                              | +1.2                | -2.6                | -50.7                    |
| -0.23         | -0.35         | -4.                               | -13.                              | -4.                               | +6.                               | -13.                              | +0.4                | -2.6                | +45.0                    |

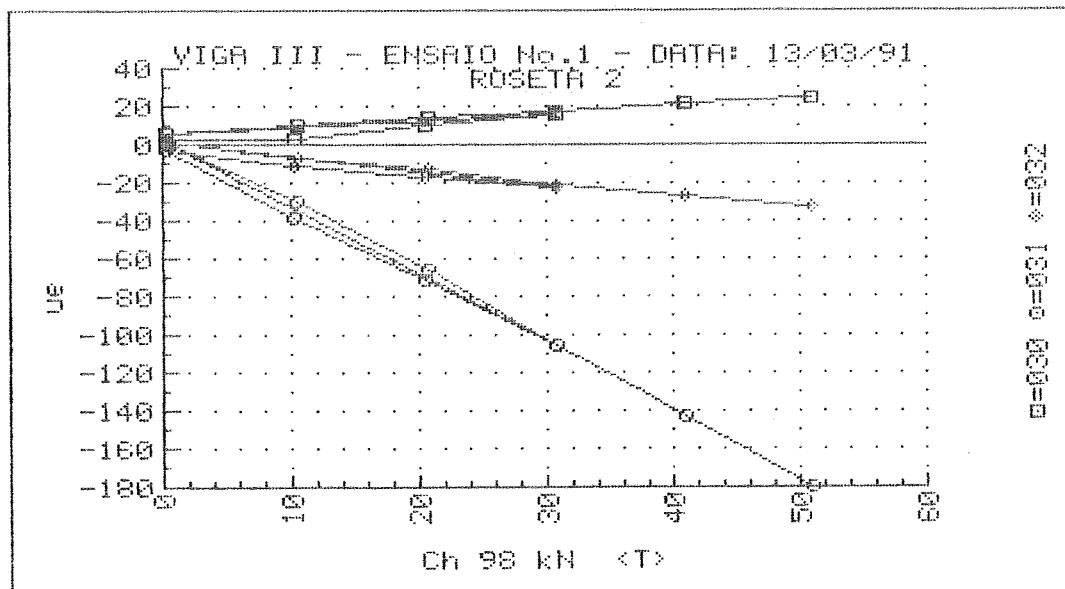
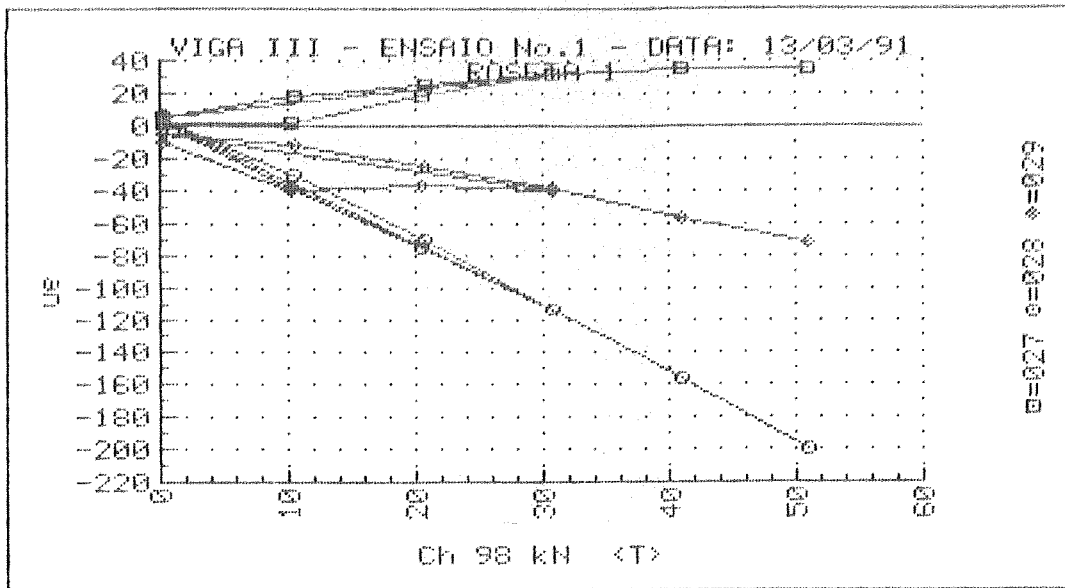


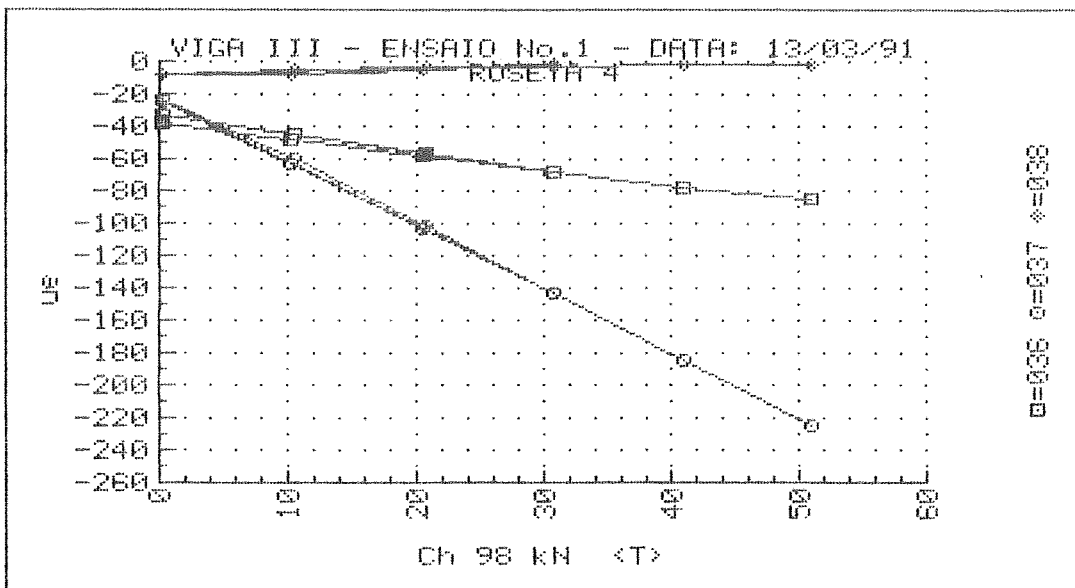
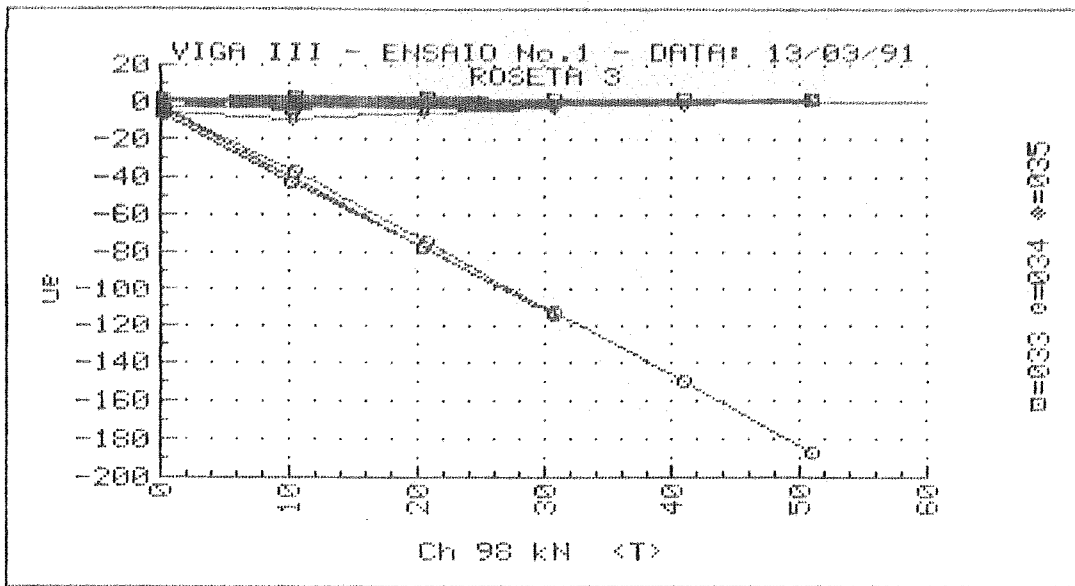




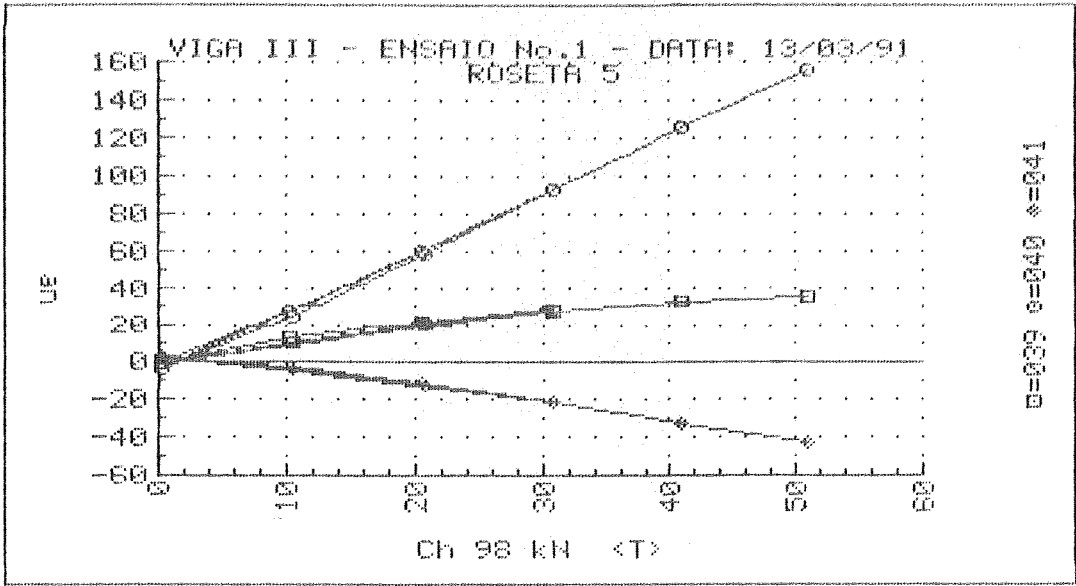












## MODELO - VIGA III

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### . ENSAIO 2

#### - DESLOCAMENTOS

#### .TABELAS

#### .GRÁFICOS

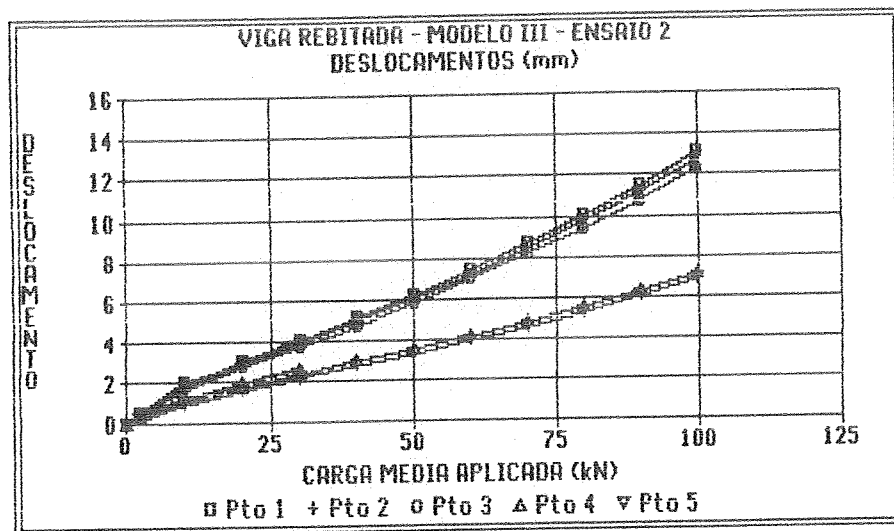
MODELO: VIGA REBITADA III

ENSAIO Nro:2

DATA: 20 DE MARÇO DE 1991

HORARIO: 8:45 Hs

| ETAPA     | CARGA APL<br>MEDIA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS<br>(mm) |       |       |       |       |       |       |
|-----------|----------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           |                            | Pto 1                 | Pto 2 | Pto 3 | Pto 4 | Pto 5 | Pto 6 | Pto 7 |
| TENS. TIR | 0.00                       | -.72                  | -.71  | -.69  | -.46  | -.36  |       |       |
|           | 0.00                       | 0.00                  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| 1         | 9.95                       | 1.81                  | 1.77  | 1.68  | 1.24  | .98   | 0.00  | .29   |
| 2         | 19.95                      | 3.02                  | 2.98  | 2.79  | 2.05  | 1.58  | -.07  | .59   |
| 3         | 29.90                      | 4.14                  | 4.07  | 3.84  | 2.63  | 2.18  | .01   | .76   |
| 4         | 2.10                       | .57                   | .56   | .58   | .34   | .26   | -.05  | .09   |
| 5         | 9.95                       | 1.99                  | 1.95  | 1.82  | 1.38  | 1.09  | -.01  | .21   |
| 6         | 19.95                      | 2.98                  | 2.87  | 2.75  | 1.79  | 1.64  | -.06  | .50   |
| 7         | 29.95                      | 4.08                  | 3.95  | 3.77  | 2.39  | 2.21  | .04   | .68   |
| 8         | 39.95                      | 5.20                  | 5.04  | 4.86  | 3.00  | 2.81  | .20   | .93   |
| 9         | 49.90                      | 6.29                  | 6.10  | 5.89  | 3.59  | 3.37  | .38   | .95   |
| 10        | 59.95                      | 7.49                  | 7.26  | 7.01  | 4.23  | 4.01  | .58   | 1.02  |
| 11        | 69.95                      | 8.78                  | 8.53  | 8.24  | 4.91  | 4.70  | .77   | 1.12  |
| 12        | 79.85                      | 10.09                 | 9.80  | 9.46  | 5.61  | 5.34  | 1.01  | 1.17  |
| 13        | 89.80                      | 11.53                 | 11.19 | 10.85 | 6.35  | 6.19  | 1.27  | 1.22  |
| 14        | 99.85                      | 13.05                 | 12.69 | 12.30 | 7.15  | 6.94  | 1.58  | 1.18  |
| 15        | 2.30                       | 2.02                  | 2.01  | 1.93  | 1.28  | .99   | .23   | -.11  |



## MODELO - VIGA III

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### . ENSAIO 2

#### - DEFORMAÇÕES

#### EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA

.UNIAXIAIS

.ROSETAS

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.2 DATA: 20/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAD 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>(μE) | 2<br>(μE) | 3<br>(μE) | 4<br>(μE) | 5<br>(μE) | 6<br>(μE) | 7<br>(μE) | 8<br>(μE) | 9<br>(μE) | 10<br>(μE) |
|------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 0.00                   | -0.12                  | +0.       | +0.       | +0.       | +0.       | +1.       | +0.       | +0.       | +0.       | +0.       | +1.        |
| 2.23                   | 2.21                   | -144.     | -155.     | -163.     | -124.     | -149.     | +31.      | +36.      | +46.      | +28.      | +20.       |
| 10.43                  | 9.52                   | -60.      | -77.      | -91.      | -66.      | -82.      | -70.      | -49.      | -31.      | -63.      | -46.       |
| 20.63                  | 19.16                  | +43.      | +26.      | +8.       | +8.       | +9.       | -189.     | -161.     | -141.     | -175.     | -132.      |
| 30.83                  | 29.04                  | +145.     | +131.     | +111.     | +85.      | +99.      | -307.     | -273.     | -256.     | -286.     | -220.      |
| 2.23                   | 1.97                   | -141.     | -151.     | -159.     | -121.     | -147.     | +32.      | +37.      | +46.      | +31.      | +20.       |
| 10.43                  | 9.52                   | -57.      | -72.      | -87.      | -63.      | -78.      | -70.      | -50.      | -33.      | -63.      | -46.       |
| 20.63                  | 19.28                  | +45.      | +29.      | +13.      | +11.      | +13.      | -189.     | -161.     | -143.     | -175.     | -133.      |
| 30.83                  | 29.04                  | +145.     | +133.     | +115.     | +86.      | +102.     | -306.     | -272.     | -256.     | -285.     | -220.      |
| 41.15                  | 38.79                  | +248.     | +239.     | +219.     | +163.     | +190.     | -424.     | -384.     | -369.     | -396.     | -309.      |
| 51.11                  | 48.66                  | +352.     | +346.     | +324.     | +241.     | +279.     | -543.     | -498.     | -482.     | -505.     | -396.      |
| 61.08                  | 58.77                  | +459.     | +458.     | +430.     | +318.     | +367.     | -661.     | -607.     | -599.     | -614.     | -482.      |
| 71.28                  | 68.64                  | +577.     | +593.     | +540.     | +385.     | +454.     | -784.     | -714.     | -722.     | -725.     | -570.      |
| 81.95                  | 77.93                  | +695.     | +725.     | +651.     | +457.     | +539.     | -906.     | -812.     | -848.     | -838.     | -659.      |
| 91.56                  | 88.04                  | +815.     | +853.     | +764.     | +528.     | +621.     | -1023.    | -892.     | -960.     | -951.     | -753.      |
| 101.88                 | 97.91                  | +952.     | +978.     | +885.     | +606.     | +709.     | -1132.    | -961.     | -1130.    | -1072.    | -858.      |
| 2.34                   | 2.09                   | -62.      | -46.      | -97.      | -139.     | -125.     | +20.      | +126.     | -20.      | -4.       | -15.       |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.2 DATA: 20/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00                   | -0.12                  | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                     |
| 2.23                   | 2.21                   | -160.                  | -163.                  | -159.                  | -137.                  | -145.                  | +33.                   | +47.                   | +61.                   | +32.                   | +27.                    |
| 10.43                  | 9.52                   | -123.                  | -117.                  | -111.                  | -106.                  | -107.                  | -32.                   | -9.                    | +10.                   | -28.                   | -15.                    |
| 20.63                  | 19.16                  | -64.                   | -56.                   | -48.                   | -65.                   | -57.                   | -110.                  | -84.                   | -59.                   | -100.                  | -71.                    |
| 30.83                  | 29.04                  | -4.                    | +6.                    | +15.                   | -24.                   | -7.                    | -189.                  | -158.                  | -131.                  | -174.                  | -126.                   |
| 2.23                   | 1.97                   | -166.                  | -161.                  | -156.                  | -135.                  | -143.                  | +32.                   | +46.                   | +61.                   | +31.                   | +26.                    |
| 10.43                  | 9.52                   | -120.                  | -114.                  | -108.                  | -103.                  | -104.                  | -34.                   | -11.                   | +11.                   | -30.                   | -16.                    |
| 20.63                  | 19.28                  | -61.                   | -54.                   | -46.                   | -63.                   | -55.                   | -112.                  | -84.                   | -59.                   | -102.                  | -71.                    |
| 30.83                  | 29.04                  | -3.                    | +7.                    | +17.                   | -22.                   | -5.                    | -190.                  | -158.                  | -130.                  | -175.                  | -126.                   |
| 41.15                  | 38.79                  | +58.                   | +68.                   | +79.                   | +20.                   | +46.                   | -271.                  | -232.                  | -200.                  | -248.                  | -183.                   |
| 51.11                  | 48.66                  | +118.                  | +128.                  | +139.                  | +60.                   | +95.                   | -352.                  | -308.                  | -269.                  | -321.                  | -239.                   |
| 61.08                  | 58.77                  | +177.                  | +189.                  | +199.                  | +98.                   | +144.                  | -438.                  | -384.                  | -336.                  | -396.                  | -294.                   |
| 71.28                  | 68.64                  | +241.                  | +251.                  | +258.                  | +139.                  | +191.                  | -529.                  | -462.                  | -404.                  | -471.                  | -349.                   |
| 81.95                  | 77.93                  | +307.                  | +315.                  | +320.                  | +189.                  | +243.                  | -620.                  | -540.                  | -470.                  | -548.                  | -403.                   |
| 91.56                  | 88.04                  | +374.                  | +379.                  | +379.                  | +238.                  | +293.                  | -715.                  | -616.                  | -530.                  | -623.                  | -453.                   |
| 101.88                 | 97.91                  | +447.                  | +463.                  | +447.                  | +286.                  | +348.                  | -819.                  | -695.                  | -589.                  | -709.                  | -507.                   |
| 2.34                   | 2.09                   | -140.                  | -119.                  | -142.                  | -115.                  | -123.                  | +4.                    | +26.                   | +37.                   | +13.                   | +22.                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.2 DATA: 20/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 3

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>(µε) | 2<br>(µε) | 3<br>(µε) | 4<br>(µε) | 5<br>(µε) | 6<br>(µε) |
|------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.00                   | -0.12                  | +0.       | +0.       | +0.       | +0.       | +1.       | +0.       |
| 2.23                   | 2.21                   | -164.     | -173.     | -133.     | +40.      | +42.      | +46.      |
| 10.43                  | 9.52                   | -122.     | -137.     | -100.     | -14.      | -15.      | -9.       |
| 20.63                  | 19.16                  | -63.      | -87.      | -56.      | -78.      | -84.      | -82.      |
| 30.83                  | 29.04                  | -4.       | -34.      | -10.      | -141.     | -155.     | -156.     |
| 2.23                   | 1.97                   | -163.     | -170.     | -130.     | +42.      | +51.      | +46.      |
| 10.43                  | 9.52                   | -118.     | -134.     | -97.      | -12.      | -14.      | -11.      |
| 20.63                  | 19.28                  | -60.      | -83.      | -53.      | -77.      | -87.      | -83.      |
| 30.83                  | 29.04                  | -2.       | -32.      | -8.       | -140.     | -158.     | -156.     |
| 41.15                  | 38.79                  | +58.      | +21.      | +37.      | -204.     | -228.     | -231.     |
| 51.11                  | 48.66                  | +117.     | +74.      | +84.      | -268.     | -297.     | -306.     |
| 61.08                  | 58.77                  | +177.     | +127.     | +128.     | -328.     | -367.     | -383.     |
| 71.28                  | 68.64                  | +241.     | +178.     | +172.     | -387.     | -435.     | -453.     |
| 81.95                  | 77.93                  | +302.     | +228.     | +215.     | -444.     | -500.     | -516.     |
| 91.56                  | 88.04                  | +365.     | +283.     | +258.     | -500.     | -560.     | -574.     |
| 101.88                 | 97.91                  | +433.     | +342.     | +299.     | -552.     | -613.     | -626.     |
| 2.34                   | 2.09                   | -141.     | -157.     | -133.     | +25.      | +20.      | +99.      |



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.2 DATA: 20/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 TIRANTE 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | S1.1<br>(µε) | S1.2<br>(µε) | S1.3<br>(µε) | S1.4<br>(µε) | S2.1<br>(µε) | S2.2<br>(µε) |
|------------------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.00                   | -0.12                  | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          |
| 2.23                   | 2.21                   | +420.        | +672.        | +888.        | +648.        | +635.        | +688.        |
| 10.43                  | 9.52                   | +493.        | +744.        | +961.        | +723.        | +708.        | +761.        |
| 20.63                  | 19.16                  | +584.        | +834.        | +1053.       | +815.        | +799.        | +853.        |
| 30.83                  | 29.04                  | +676.        | +925.        | +1145.       | +907.        | +890.        | +946.        |
| 2.23                   | 1.97                   | +411.        | +666.        | +879.        | +639.        | +628.        | +679.        |
| 10.43                  | 9.52                   | +487.        | +740.        | +955.        | +716.        | +703.        | +756.        |
| 20.63                  | 19.28                  | +580.        | +831.        | +1050.       | +811.        | +795.        | +850.        |
| 30.83                  | 29.04                  | +673.        | +923.        | +1142.       | +905.        | +888.        | +944.        |
| 41.15                  | 38.79                  | +764.        | +1012.       | +1233.       | +996.        | +978.        | +1035.       |
| 51.11                  | 48.66                  | +852.        | +1101.       | +1321.       | +1085.       | +1068.       | +1124.       |
| 61.08                  | 58.77                  | +938.        | +1187.       | +1409.       | +1172.       | +1155.       | +1213.       |
| 71.28                  | 68.64                  | +1033.       | +1281.       | +1504.       | +1267.       | +1250.       | +1308.       |
| 81.95                  | 77.93                  | +1129.       | +1377.       | +1600.       | +1364.       | +1349.       | +1405.       |
| 91.56                  | 88.04                  | +1224.       | +1472.       | +1696.       | +1460.       | +1445.       | +1503.       |
| 101.88                 | 97.91                  | +1320.       | +1568.       | +1793.       | +1555.       | +1542.       | +1599.       |
| 2.34                   | 2.09                   | +386.        | +644.        | +852.        | +611.        | +607.        | +657.        |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.2 DATA: 20/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 TIRANTE 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | S1.1<br>( $\mu\epsilon$ ) | S1.2<br>( $\mu\epsilon$ ) | S2.1<br>( $\mu\epsilon$ ) | S2.2<br>( $\mu\epsilon$ ) | S2.3<br>( $\mu\epsilon$ ) | S2.4<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0.00                   | -0.12                  | +0.                       | +0.                       | +0.                       | +1.                       | +0.                       | +0.                       |
| 2.23                   | 2.21                   | +672.                     | +662.                     | +735.                     | +545.                     | +607.                     | +794.                     |
| 10.43                  | 9.52                   | +740.                     | +731.                     | +803.                     | +615.                     | +675.                     | +861.                     |
| 20.63                  | 19.16                  | +830.                     | +821.                     | +894.                     | +706.                     | +765.                     | +951.                     |
| 30.83                  | 29.04                  | +921.                     | +912.                     | +985.                     | +798.                     | +856.                     | +1042.                    |
| 2.23                   | 1.97                   | +662.                     | +654.                     | +725.                     | +535.                     | +598.                     | +785.                     |
| 10.43                  | 9.52                   | +734.                     | +724.                     | +797.                     | +609.                     | +669.                     | +855.                     |
| 20.63                  | 19.28                  | +828.                     | +818.                     | +891.                     | +703.                     | +763.                     | +948.                     |
| 30.83                  | 29.04                  | +921.                     | +912.                     | +985.                     | +798.                     | +856.                     | +1042.                    |
| 41.15                  | 38.79                  | +1012.                    | +1001.                    | +1075.                    | +889.                     | +946.                     | +1131.                    |
| 51.11                  | 48.66                  | +1101.                    | +1091.                    | +1163.                    | +978.                     | +1036.                    | +1218.                    |
| 61.00                  | 58.77                  | +1189.                    | +1180.                    | +1251.                    | +1067.                    | +1123.                    | +1306.                    |
| 71.28                  | 68.64                  | +1285.                    | +1275.                    | +1347.                    | +1163.                    | +1218.                    | +1401.                    |
| 81.95                  | 77.93                  | +1381.                    | +1372.                    | +1442.                    | +1258.                    | +1314.                    | +1496.                    |
| 91.56                  | 88.04                  | +1477.                    | +1467.                    | +1537.                    | +1354.                    | +1409.                    | +1591.                    |
| 101.88                 | 97.91                  | +1572.                    | +1561.                    | +1633.                    | +1450.                    | +1503.                    | +1685.                    |
| 2.34                   | 2.09                   | +648.                     | +642.                     | +711.                     | +520.                     | +582.                     | +771.                     |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.2 DATA: 20/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | -0.12                  | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                    | -1.                    | +0.1                    | -0.1                    | U/C      |
| 2.23                   | 2.21                   | +8.                    | -2.                    | -6.                    | +8.                    | -6.                    | +1.4                    | -0.9                    | -11.6    |
| 10.43                  | 9.52                   | +20.                   | -29.                   | -8.                    | +44.                   | -32.                   | +7.8                    | -4.2                    | -34.4    |
| 20.63                  | 19.16                  | +28.                   | -70.                   | -17.                   | +85.                   | -73.                   | +14.1                   | -10.8                   | -36.7    |
| 30.83                  | 29.04                  | +33.                   | -113.                  | -31.                   | +119.                  | -117.                  | +18.9                   | -18.3                   | -37.1    |
| 2.23                   | 1.97                   | +9.                    | +0.                    | -1.                    | +10.                   | -2.                    | +2.1                    | +0.2                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.52                   | +20.                   | -28.                   | -5.                    | +46.                   | -30.                   | +8.2                    | -3.8                    | -35.6    |
| 20.63                  | 19.28                  | +28.                   | -70.                   | -17.                   | +85.                   | -73.                   | +14.1                   | -10.8                   | -36.7    |
| 30.83                  | 29.04                  | +33.                   | -113.                  | -31.                   | +119.                  | -117.                  | +18.9                   | -18.3                   | -37.1    |
| 41.15                  | 38.79                  | +36.                   | -157.                  | -46.                   | +152.                  | -163.                  | +23.3                   | -26.3                   | -37.4    |
| 51.11                  | 48.66                  | +39.                   | -201.                  | -61.                   | +185.                  | -207.                  | +27.7                   | -34.1                   | -37.7    |
| 61.08                  | 58.77                  | +36.                   | -246.                  | -77.                   | +212.                  | -253.                  | +30.7                   | -42.6                   | -38.0    |
| 71.28                  | 68.64                  | +20.                   | -293.                  | -88.                   | +231.                  | -299.                  | +31.8                   | -51.7                   | -39.1    |
| 81.95                  | 77.93                  | +3.                    | -342.                  | -102.                  | +247.                  | -346.                  | +32.2                   | -61.3                   | -39.9    |
| 91.56                  | 88.04                  | -7.                    | -389.                  | -121.                  | +266.                  | -394.                  | +33.3                   | -70.8                   | -40.0    |
| 101.88                 | 97.91                  | -9.                    | -435.                  | -141.                  | +292.                  | -441.                  | +35.9                   | -79.7                   | -39.8    |
| 2.34                   | 2.09                   | -58.                   | -13.                   | -7.                    | -0.                    | -64.                   | -4.4                    | -14.4                   | U/C      |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.2 DATA: 20/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | -0.12                  | +1.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                    | -0.                    | +0.2                    | +0.0                    | U/C      |
| 2.23                   | 2.21                   | +5.                    | -5.                    | -4.                    | +7.                    | -6.                    | +1.2                    | -0.9                    | -25.4    |
| 10.43                  | 9.52                   | +9.                    | -30.                   | -9.                    | +31.                   | -32.                   | +4.8                    | -5.1                    | -36.6    |
| 20.63                  | 19.16                  | +13.                   | -67.                   | -16.                   | +66.                   | -69.                   | +10.2                   | -11.0                   | -38.7    |
| 30.83                  | 29.04                  | +16.                   | -106.                  | -24.                   | +100.                  | -108.                  | +15.3                   | -17.5                   | -39.5    |
| 2.23                   | 1.97                   | +6.                    | -4.                    | -2.                    | +9.                    | -5.                    | +1.6                    | -0.5                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.52                   | +10.                   | -29.                   | -8.                    | +33.                   | -31.                   | +5.5                    | -4.6                    | -36.9    |
| 20.63                  | 19.28                  | +14.                   | -67.                   | -15.                   | +68.                   | -69.                   | +10.6                   | -10.9                   | -38.8    |
| 30.83                  | 29.04                  | +17.                   | -106.                  | -24.                   | +101.                  | -108.                  | +15.5                   | -17.5                   | -39.4    |
| 41.15                  | 38.79                  | +19.                   | -146.                  | -31.                   | +136.                  | -148.                  | +20.6                   | -24.2                   | -39.9    |
| 51.11                  | 48.66                  | +21.                   | -185.                  | -39.                   | +169.                  | -187.                  | +25.5                   | -30.7                   | -40.2    |
| 61.08                  | 58.77                  | +24.                   | -223.                  | -44.                   | +205.                  | -226.                  | +31.0                   | -37.1                   | -40.5    |
| 71.28                  | 68.64                  | +27.                   | -263.                  | -53.                   | +240.                  | -266.                  | +36.0                   | -43.8                   | -40.5    |
| 81.95                  | 77.93                  | +29.                   | -302.                  | -62.                   | +273.                  | -306.                  | +40.8                   | -50.4                   | -40.4    |
| 91.56                  | 88.04                  | +32.                   | -338.                  | -69.                   | +305.                  | -342.                  | +45.6                   | -56.4                   | -40.5    |
| 101.88                 | 97.91                  | +36.                   | -373.                  | -74.                   | +339.                  | -377.                  | +51.0                   | -62.1                   | -40.6    |
| 2.34                   | 2.09                   | +8.                    | -5.                    | -1.                    | +12.                   | -6.                    | +2.4                    | -0.5                    | -31.1    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.2 DATA: 20/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 3

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | -0.12         | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 2.23          | 2.21          | +2.                               | -9.                               | -4.                               | +7.                               | -9.                               | +1.0                | -1.6                | -34.7                    |
| 10.43         | 9.52          | +4.                               | -36.                              | -3.                               | +37.                              | -36.                              | +5.9                | -5.6                | -42.4                    |
| 20.63         | 19.16         | +4.                               | -75.                              | -2.                               | +77.                              | -75.                              | +12.2               | -11.7               | -43.9                    |
| 30.83         | 29.04         | +4.                               | -114.                             | -3.                               | +115.                             | -114.                             | +18.1               | -17.9               | -44.2                    |
| 2.23          | 1.97          | +3.                               | -8.                               | -2.                               | +9.                               | -8.                               | +1.5                | -1.2                | -36.8                    |
| 10.43         | 9.52          | +5.                               | -35.                              | -1.                               | +39.                              | -35.                              | +6.4                | -5.3                | -42.8                    |
| 20.63         | 19.28         | +5.                               | -74.                              | -1.                               | +78.                              | -74.                              | +12.5               | -11.4               | -43.9                    |
| 30.83         | 29.04         | +4.                               | -114.                             | -2.                               | +116.                             | -114.                             | +18.3               | -17.8               | -44.3                    |
| 41.15         | 38.79         | +4.                               | -153.                             | -3.                               | +154.                             | -153.                             | +24.4               | -24.1               | -44.4                    |
| 51.11         | 48.66         | +2.                               | -192.                             | -3.                               | +191.                             | -192.                             | +30.1               | -30.4               | -44.6                    |
| 61.08         | 58.77         | +1.                               | -230.                             | -3.                               | +228.                             | -230.                             | +35.8               | -36.4               | -44.8                    |
| 71.28         | 68.64         | +2.                               | -271.                             | -4.                               | +269.                             | -271.                             | +42.3               | -42.8               | -44.7                    |
| 81.95         | 77.93         | +3.                               | -310.                             | -5.                               | +309.                             | -310.                             | +48.5               | -49.1               | -44.6                    |
| 91.56         | 88.04         | +5.                               | -347.                             | -5.                               | +347.                             | -347.                             | +54.8               | -54.8               | -44.6                    |
| 101.88        | 97.91         | +8.                               | -382.                             | -2.                               | +388.                             | -382.                             | +61.6               | -59.9               | -44.6                    |
| 2.34          | 2.09          | +7.                               | -13.                              | -7.                               | +15.                              | -15.                              | +2.3                | -2.3                | -31.7                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

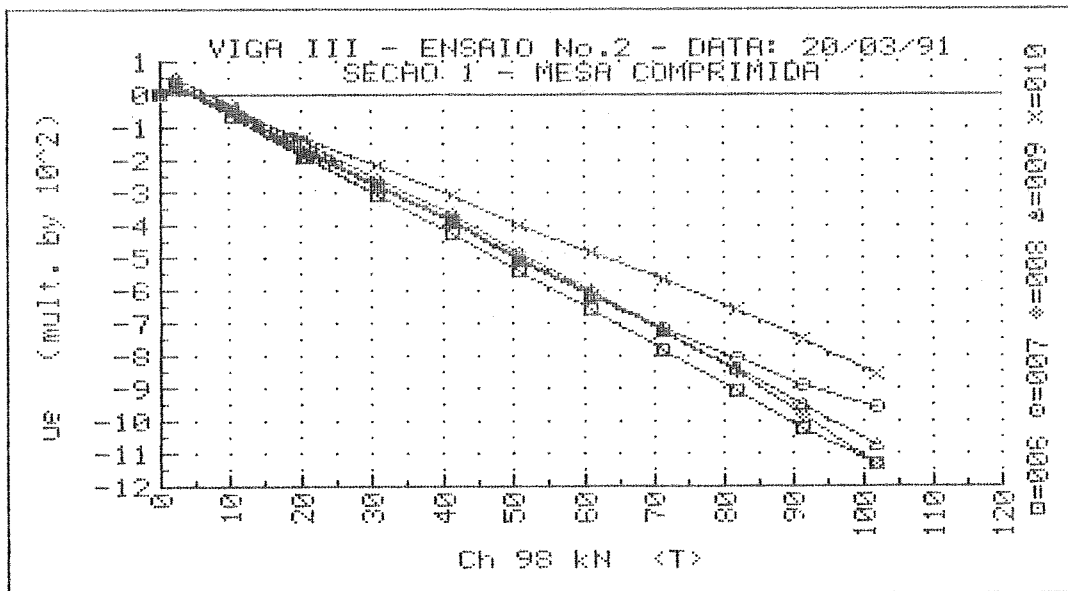
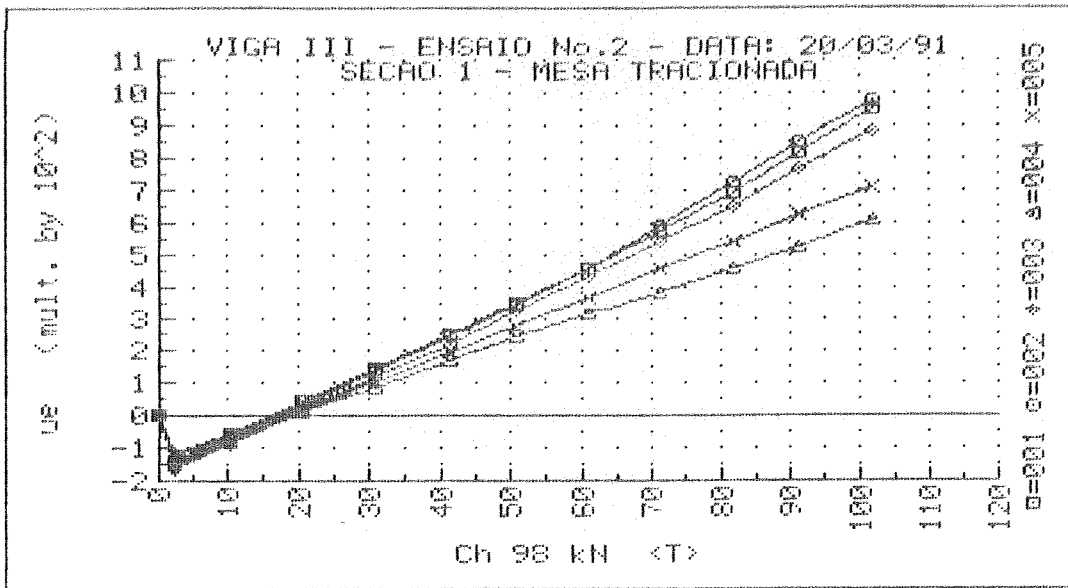
ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.2 DATA: 20/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 4

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | -0.12         | +0.                               | +0.                               | +1.                               | +1.                               | -0.                               | +0.2                | +0.0                | U/C                      |
| 2.23          | 2.21          | -61.                              | -38.                              | +1.                               | +2.                               | -62.                              | -3.7                | -13.7               | U/C                      |
| 10.43         | 9.52          | -70.                              | -69.                              | +2.                               | +16.                              | -84.                              | -2.1                | -17.9               | -67.9                    |
| 20.63         | 19.16         | -81.                              | -112.                             | +2.                               | +43.                              | -123.                             | +1.5                | -24.7               | -60.0                    |
| 30.83         | 29.04         | -92.                              | -155.                             | +3.                               | +76.                              | -165.                             | +6.0                | -32.0               | -56.6                    |
| 2.23          | 1.97          | -58.                              | -36.                              | -1.                               | -0.                               | -58.                              | -4.0                | -13.2               | U/C                      |
| 10.43         | 9.52          | -67.                              | -68.                              | +1.                               | +16.                              | -82.                              | -2.0                | -17.4               | -67.1                    |
| 20.63         | 19.28         | -80.                              | -111.                             | +2.                               | +44.                              | -121.                             | +1.7                | -24.4               | -59.8                    |
| 30.83         | 29.04         | -91.                              | -154.                             | +3.                               | +76.                              | -164.                             | +6.0                | -31.8               | -56.5                    |
| 41.15         | 38.79         | -101.                             | -198.                             | +3.                               | +108.                             | -207.                             | +10.4               | -39.2               | -54.7                    |
| 51.11         | 48.66         | -111.                             | -240.                             | +2.                               | +140.                             | -249.                             | +14.7               | -46.6               | -53.4                    |
| 61.08         | 58.77         | -118.                             | -282.                             | +2.                               | +174.                             | -290.                             | +19.5               | -53.6               | -52.5                    |
| 71.28         | 68.64         | -125.                             | -327.                             | +0.                               | +210.                             | -335.                             | +24.6               | -61.2               | -51.6                    |
| 81.95         | 77.93         | -132.                             | -374.                             | -3.                               | +246.                             | -381.                             | +29.7               | -69.1               | -50.9                    |
| 91.56         | 88.04         | -136.                             | -418.                             | -6.                               | +282.                             | -424.                             | +34.9               | -76.5               | -50.3                    |
| 101.88        | 97.91         | -140.                             | -465.                             | -9.                               | +322.                             | -470.                             | +40.7               | -84.2               | -49.8                    |
| 2.34          | 2.09          | -24.                              | -37.                              | -9.                               | +6.                               | -38.                              | -1.2                | -8.2                | -55.0                    |

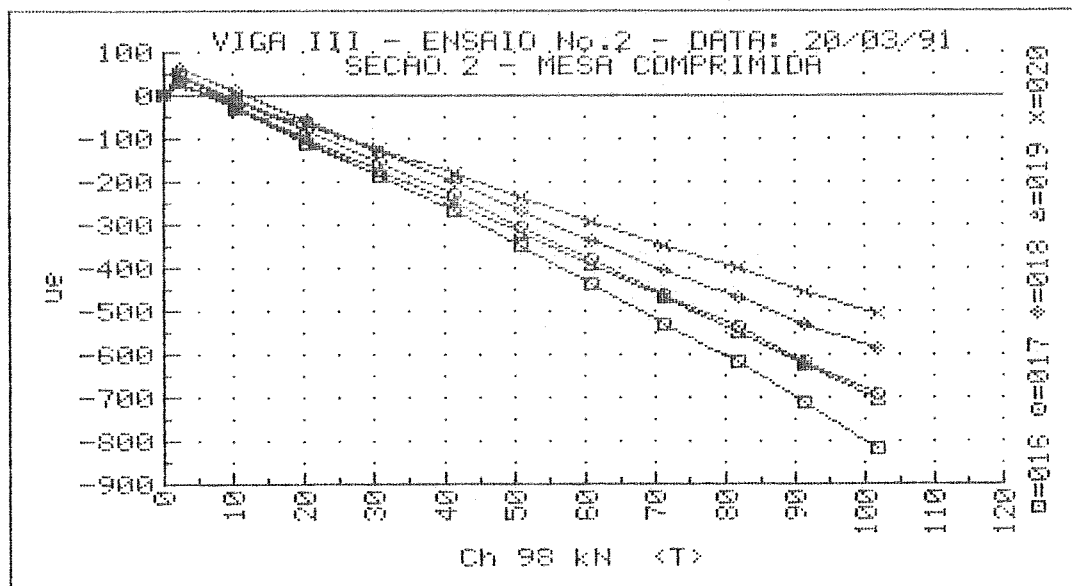
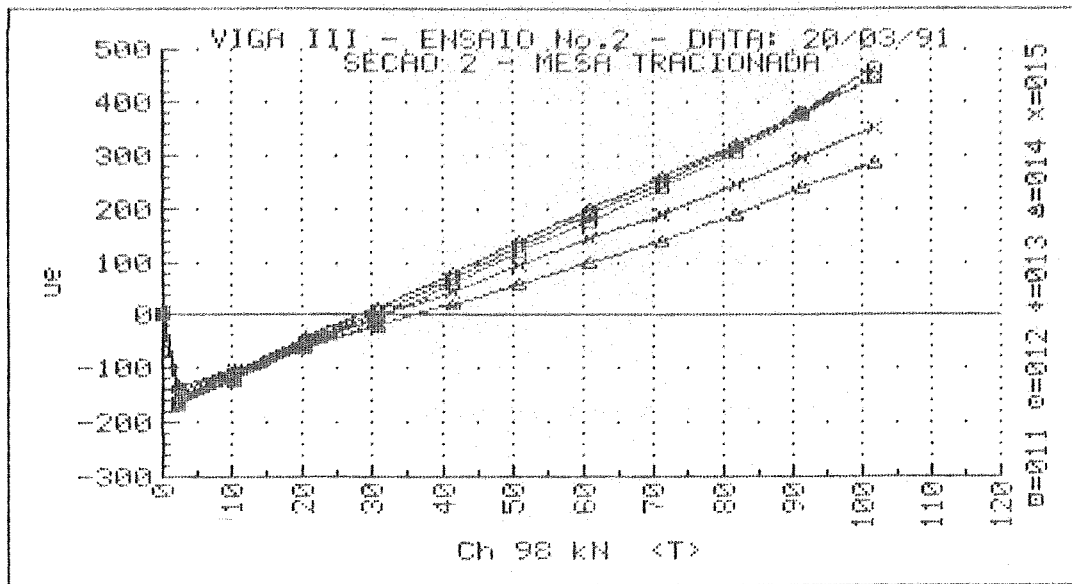
UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

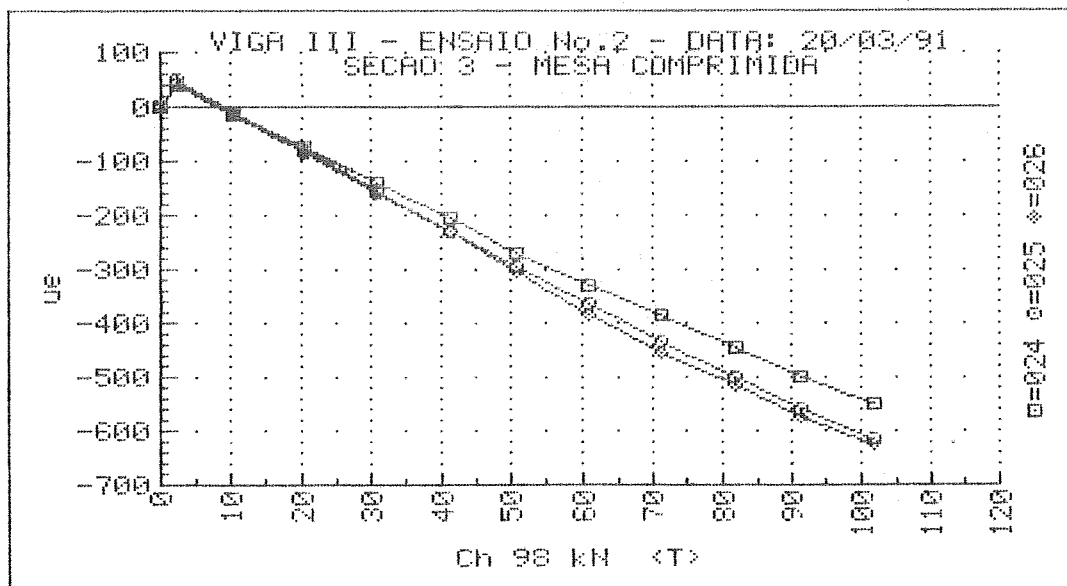
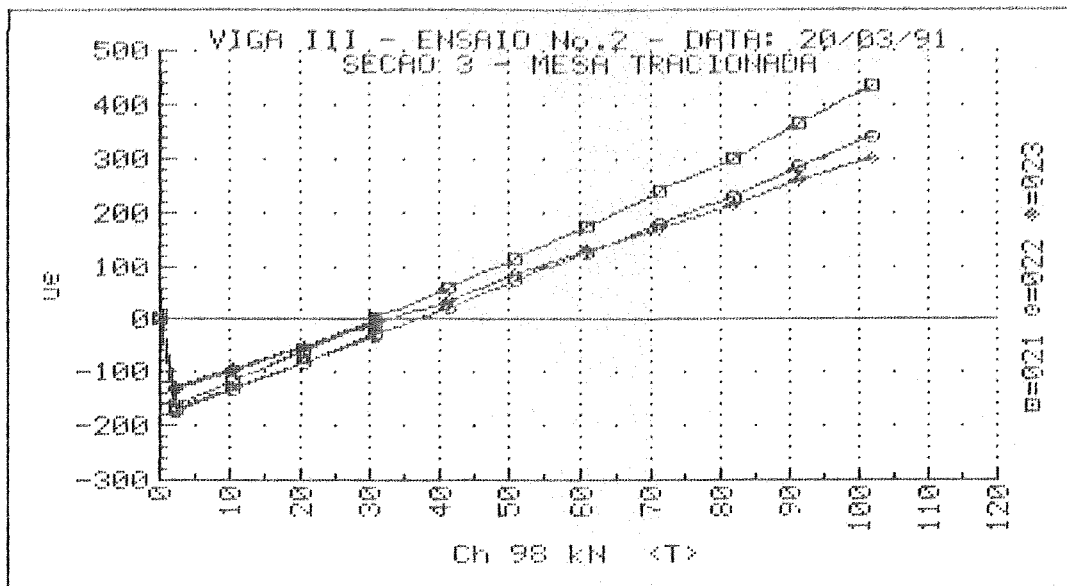
ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA III ENSAIO No.2 DATA: 20/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 5

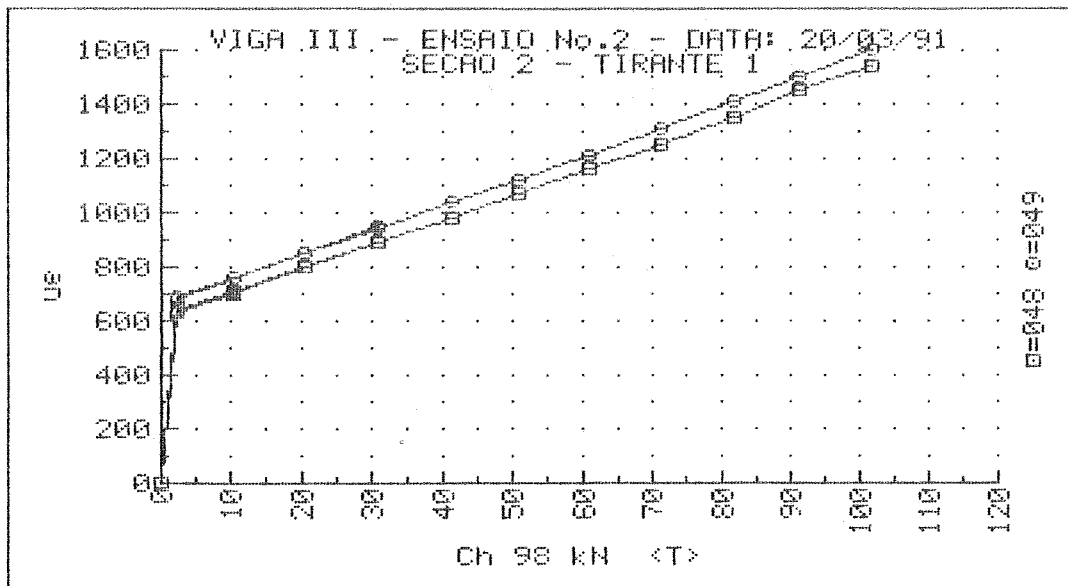
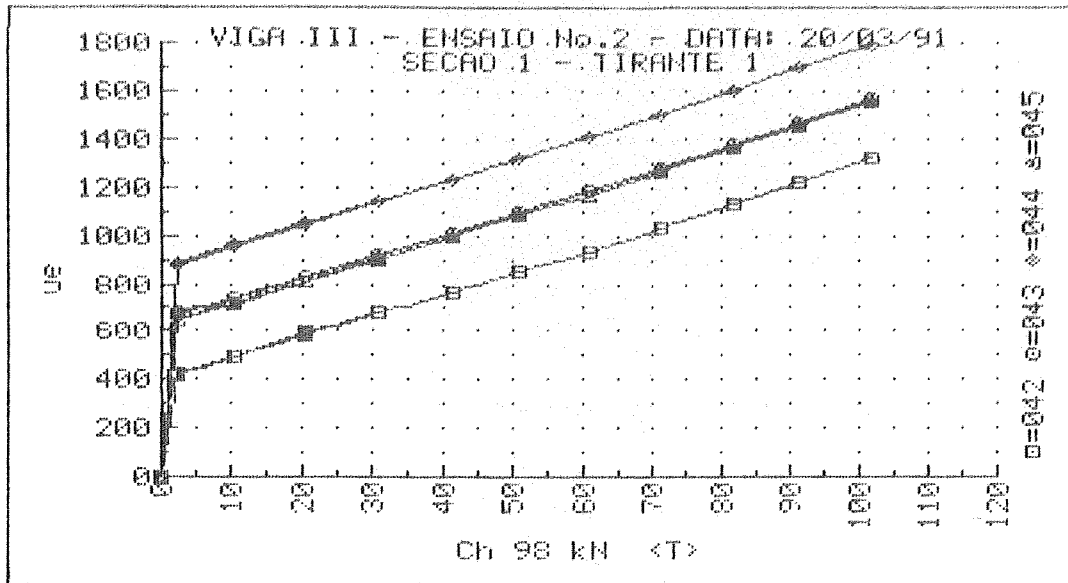
| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | -0.12         | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 2.23          | 2.21          | +3.                               | +5.                               | +1.                               | +5.                               | -1.                               | +1.0                | +0.1                | U/C                      |
| 10.43         | 9.52          | +9.                               | +28.                              | -6.                               | +29.                              | -26.                              | +4.9                | -3.8                | +37.0                    |
| 20.63         | 19.16         | +19.                              | +62.                              | -14.                              | +65.                              | -60.                              | +10.5               | -9.1                | +37.3                    |
| 30.83         | 29.04         | +27.                              | +98.                              | -24.                              | +102.                             | -99.                              | +16.2               | -15.4               | +37.8                    |
| 2.23          | 1.97          | +2.                               | +5.                               | +2.                               | +5.                               | -1.                               | +1.0                | +0.1                | U/C                      |
| 10.43         | 9.52          | +10.                              | +29.                              | -5.                               | +30.                              | -25.                              | +5.2                | -3.5                | +37.0                    |
| 20.63         | 19.28         | +19.                              | +64.                              | -14.                              | +67.                              | -62.                              | +10.8               | -9.4                | +37.5                    |
| 30.83         | 29.04         | +27.                              | +99.                              | -23.                              | +103.                             | -98.                              | +16.5               | -15.1               | +37.8                    |
| 41.15         | 38.79         | +33.                              | +134.                             | -33.                              | +138.                             | -138.                             | +21.8               | -21.8               | +38.1                    |
| 51.11         | 48.66         | +39.                              | +169.                             | -44.                              | +174.                             | -179.                             | +27.2               | -28.5               | +38.3                    |
| 61.08         | 58.77         | +43.                              | +203.                             | -56.                              | +208.                             | -222.                             | +31.9               | -35.8               | +38.4                    |
| 71.28         | 68.64         | +48.                              | +233.                             | -71.                              | +240.                             | -263.                             | +36.3               | -43.0               | +38.1                    |
| 81.95         | 77.93         | +53.                              | +263.                             | -87.                              | +272.                             | -306.                             | +40.5               | -50.5               | +38.0                    |
| 91.56         | 88.04         | +59.                              | +294.                             | -102.                             | +304.                             | -340.                             | +45.1               | -57.8               | +37.9                    |
| 101.88        | 97.91         | +63.                              | +327.                             | -117.                             | +339.                             | -393.                             | +49.8               | -65.6               | +37.8                    |
| 2.34          | 2.09          | +9.                               | -8.                               | -9.                               | +11.                              | -11.                              | +1.8                | -1.8                | -20.8                    |

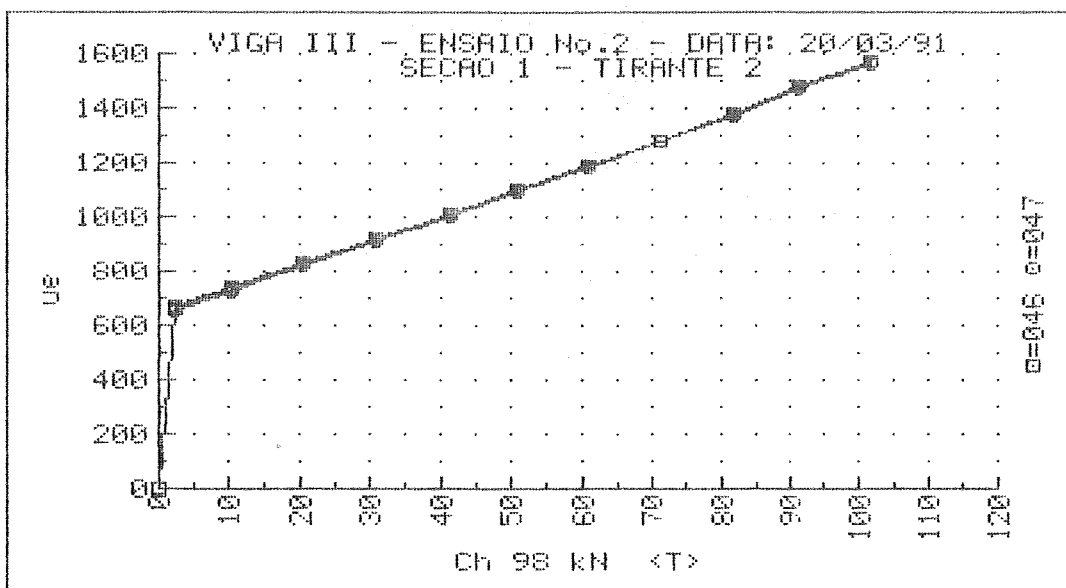
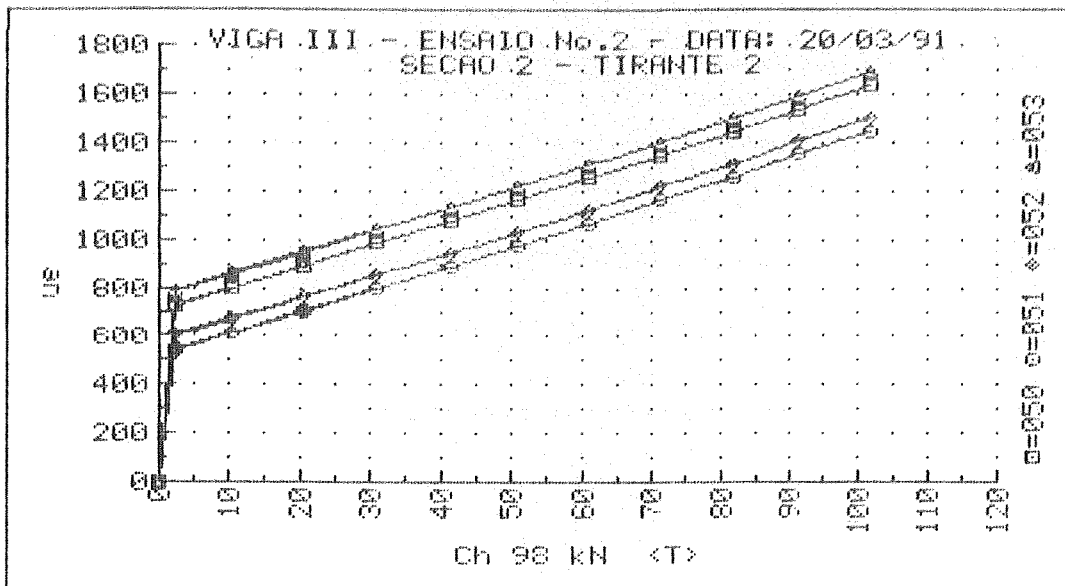


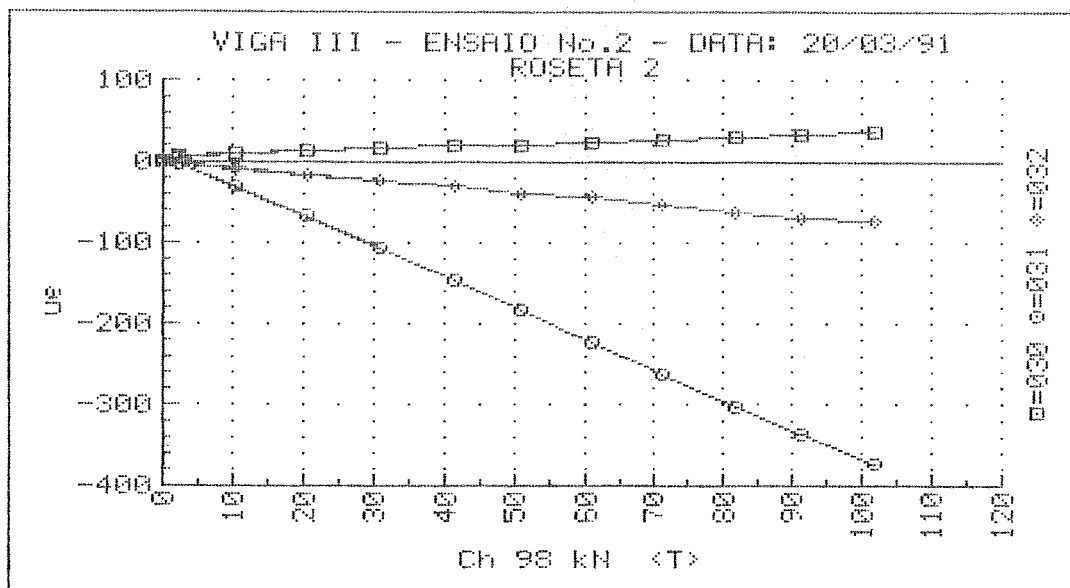
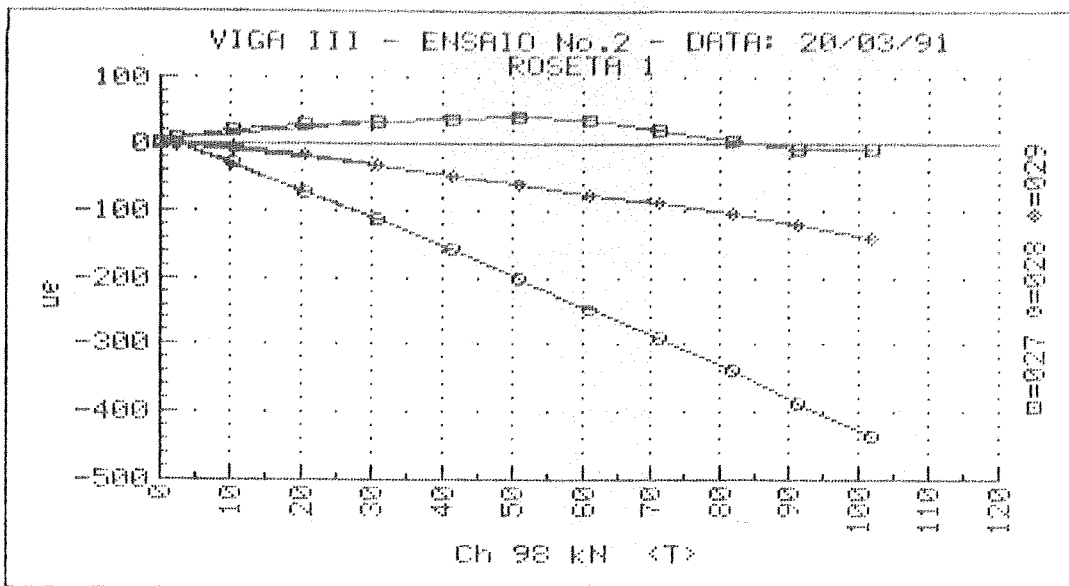


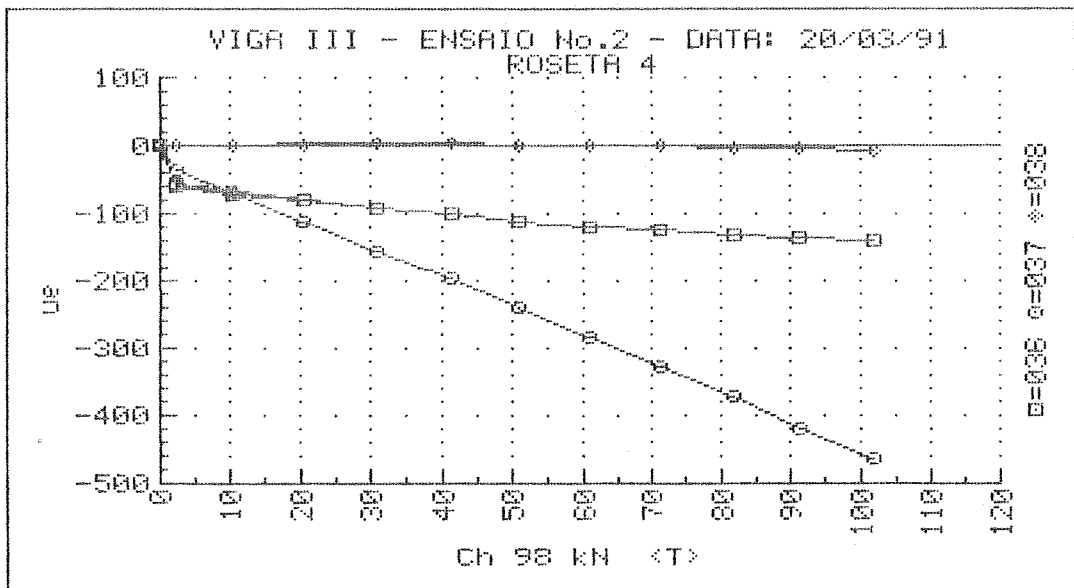
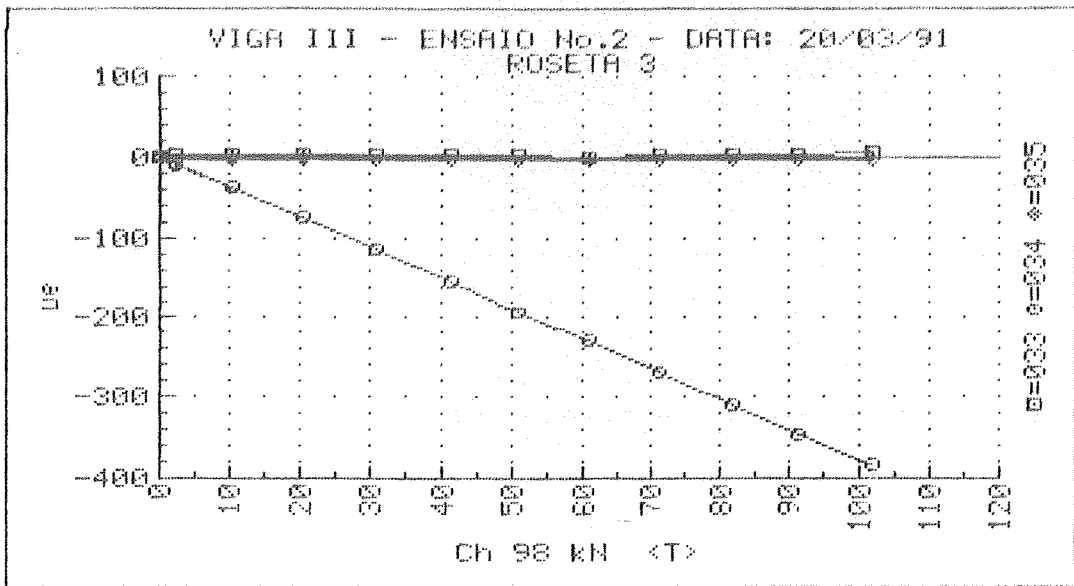


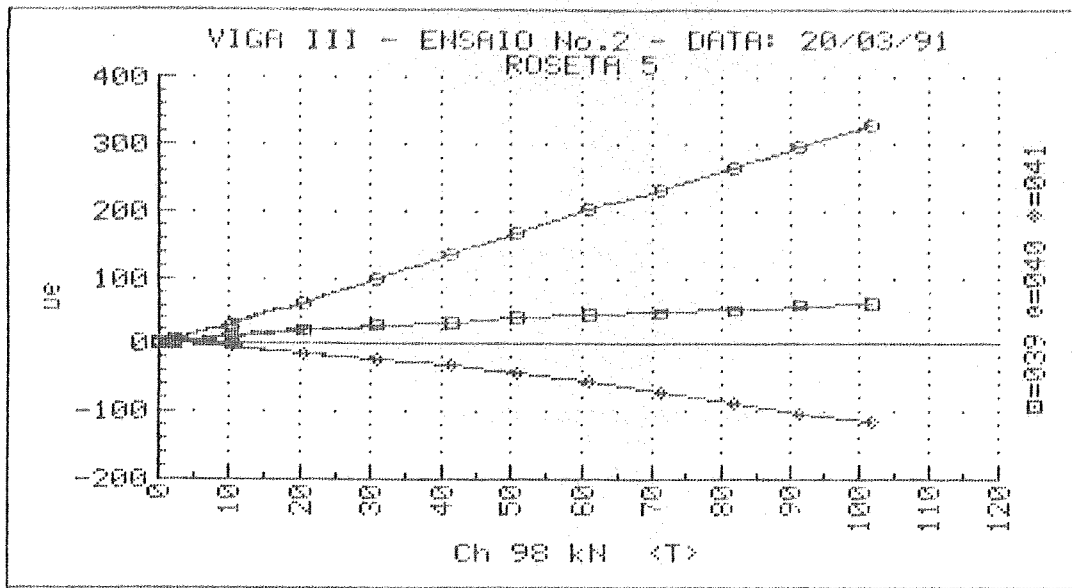












## MODELO - VIGA IV

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

- . ENSAIO 1
- . ENSAIO 2

- DESLOCAMENTOS

- DEFORMAÇÕES



## MODELO - VIGA IV

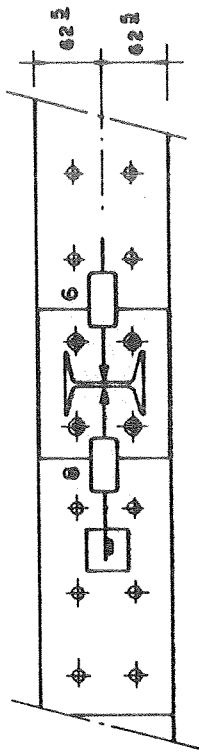
### RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### . ENSAIO 1

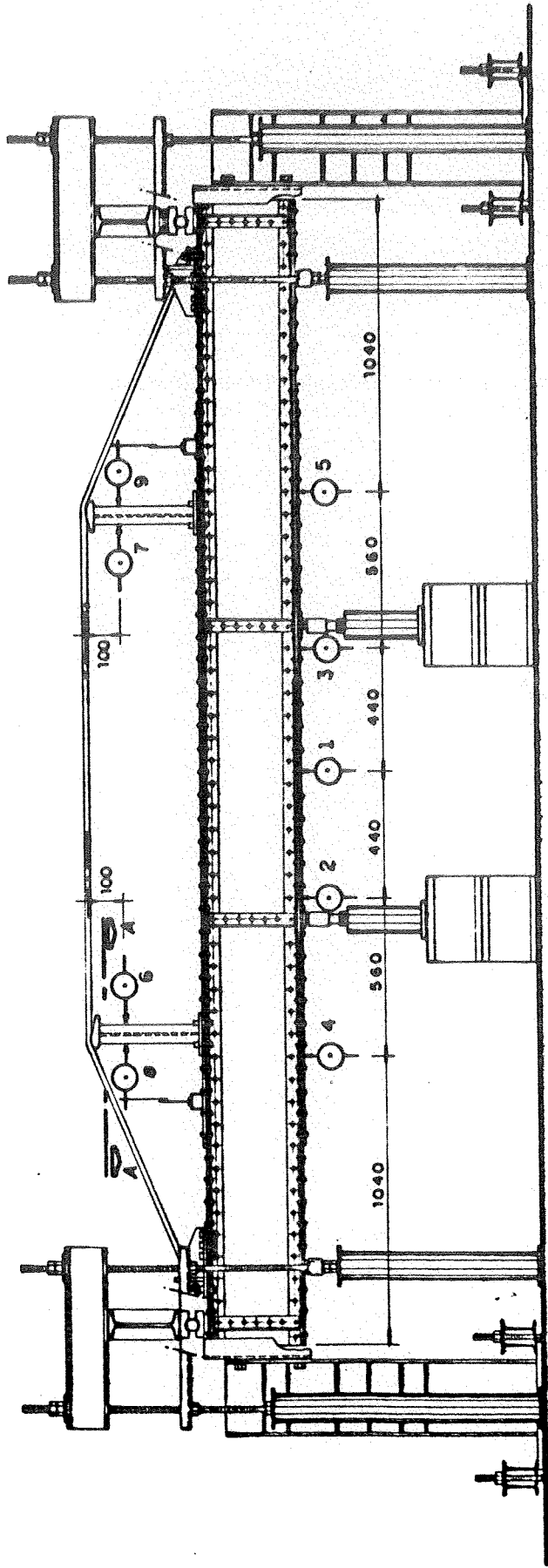
#### - DESLOCAMENTOS

.TABELAS

.GRÁFICOS



**CORTE A**



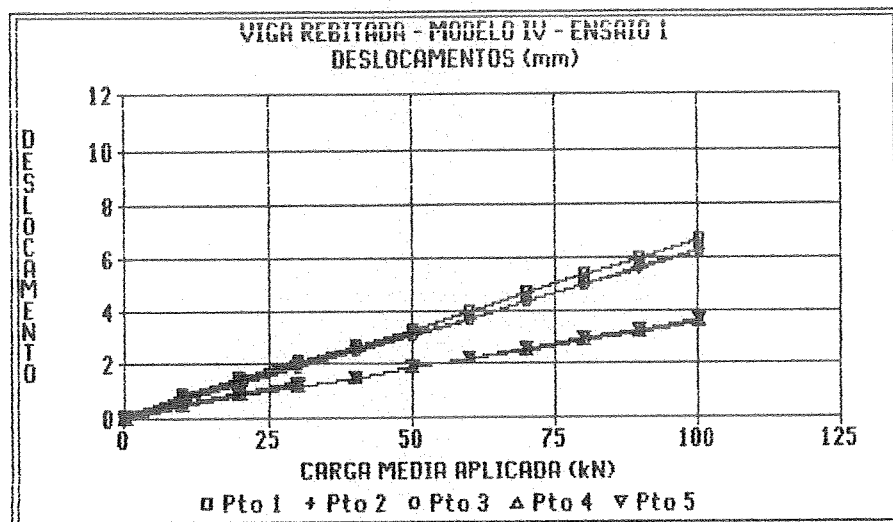
MODELO: VIGA REBITADA IV

ENSAIO Nro:1

DATA:26 DE MARCO DE 1991

HORARIO: 8:45 Hs

| ETAPA | CARGA APL<br>MEDIA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS<br>(mm) |       |       |       |       |
|-------|----------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
|       |                            | Pto 1                 | Pto 2 | Pto 3 | Pto 4 | Pto 5 |
|       | 0.00                       | 0.00                  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| 1     | 10.00                      | .84                   | .74   | .74   | .52   | .58   |
| 2     | 20.05                      | 1.52                  | 1.38  | 1.38  | .90   | .96   |
| 3     | 30.00                      | 2.13                  | 1.98  | 1.98  | 1.22  | 1.31  |
| 4     | .30                        | .07                   | .00   | .11   | .04   | .06   |
| 5     | 10.05                      | .85                   | .78   | .73   | .54   | .59   |
| 6     | 19.80                      | 1.50                  | 1.40  | 1.33  | .92   | .92   |
| 7     | 30.00                      | 2.06                  | 1.96  | 1.87  | 1.19  | 1.23  |
| 8     | 39.95                      | 2.69                  | 2.56  | 2.47  | 1.54  | 1.52  |
| 9     | 50.00                      | 3.33                  | 3.19  | 3.10  | 1.89  | 1.86  |
| 10    | 60.00                      | 3.96                  | 3.75  | 3.71  | 2.17  | 2.20  |
| 11    | 69.95                      | 4.67                  | 4.41  | 4.36  | 2.55  | 2.60  |
| 12    | 79.90                      | 5.36                  | 5.02  | 5.02  | 2.88  | 3.00  |
| 13    | 89.85                      | 6.01                  | 5.65  | 5.66  | 3.23  | 3.32  |
| 14    | 100.15                     | 6.71                  | 6.31  | 6.30  | 3.60  | 3.65  |



## MODELO - VIGA IV

### RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### . ENSAIO 1

#### - DEFORMAÇÕES

#### EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA

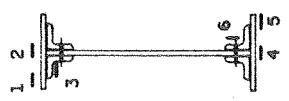
.UNIAXIAIS

.ROSETAS

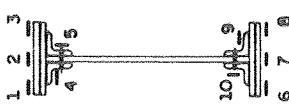
Seção 4



Seção 5



Seção 1 e 2

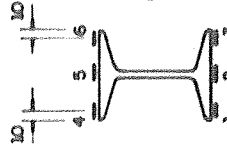
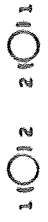


Seção 3

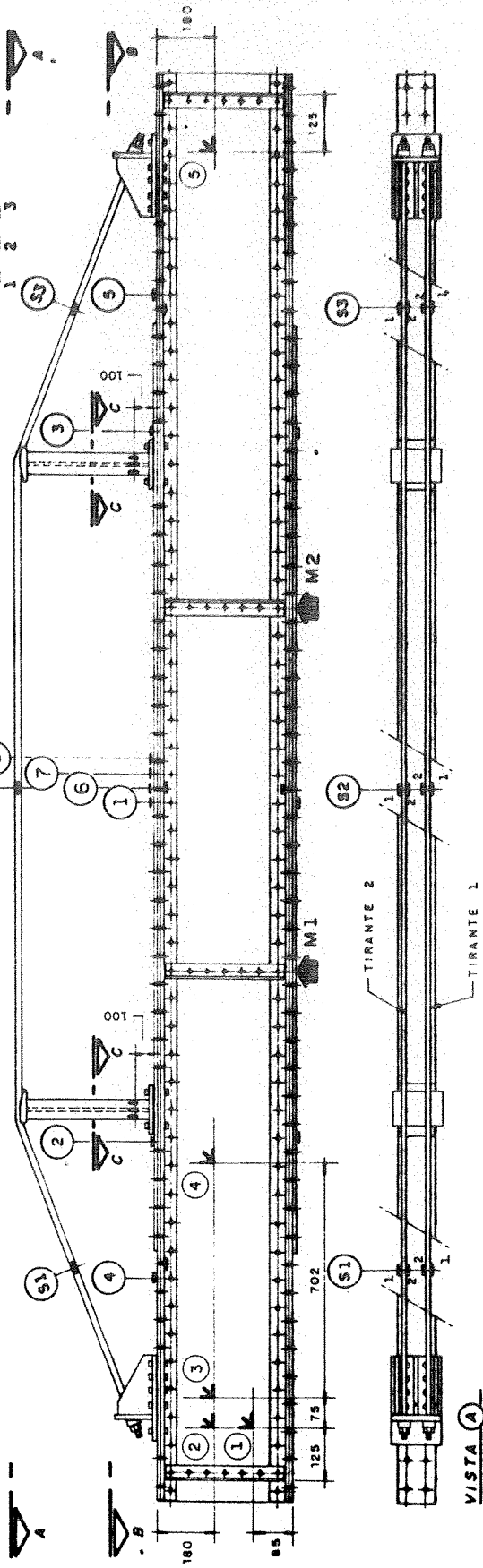


Seção S1, S2 e S3

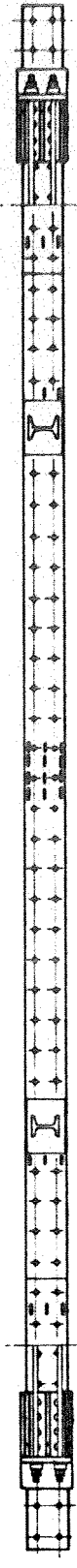
TIRANTE 1 TIRANTE 2



CORTE C  
(MONTANTES 1 e 2)



VISTA A



VISTA B



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.1 DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>(µε) | 2<br>(µε) | 3<br>(µε) | 4<br>(µε) | 5<br>(µε) | 6<br>(µε) | 7<br>(µε) | 8<br>(µε) | 9<br>(µε) | 10<br>(µε) |
|------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.       | +0.       | +0.       | +0.       | +0.       | +0.       | +0.       | +1.       | +0.       | +0.        |
| 10.55                  | 9.41                   | +48.      | +52.      | +57.      | +40.      | +37.      | -64.      | -66.      | -71.      | -57.      | -48.       |
| 20.75                  | 19.28                  | +97.      | +107.     | +116.     | +82.      | +76.      | -134.     | -133.     | -139.     | -112.     | -99.       |
| 30.95                  | 29.15                  | +149.     | +162.     | +175.     | +124.     | +116.     | -203.     | -201.     | -208.     | -166.     | -150.      |
| 0.59                   | 0.00                   | +9.       | +9.       | +9.       | +7.       | +7.       | +1.       | -7.       | -14.      | -9.       | -4.        |
| 10.55                  | 9.52                   | +54.      | +59.      | +65.      | +46.      | +44.      | -65.      | -70.      | -77.      | -60.      | -51.       |
| 20.63                  | 19.05                  | +101.     | +110.     | +120.     | +85.      | +79.      | -134.     | -134.     | -141.     | -112.     | -99.       |
| 30.95                  | 29.15                  | +150.     | +163.     | +177.     | +125.     | +117.     | -204.     | -201.     | -209.     | -166.     | -151.      |
| 41.15                  | 38.79                  | +202.     | +217.     | +236.     | +169.     | +156.     | -273.     | -268.     | -278.     | -221.     | -201.      |
| 51.35                  | 48.78                  | +257.     | +275.     | +296.     | +215.     | +198.     | -343.     | -337.     | -350.     | -278.     | -253.      |
| 61.43                  | 58.42                  | +314.     | +333.     | +358.     | +263.     | +240.     | -412.     | -406.     | -423.     | -335.     | -305.      |
| 71.40                  | 68.52                  | +373.     | +394.     | +421.     | +313.     | +283.     | -482.     | -477.     | -499.     | -394.     | -359.      |
| 81.36                  | 78.40                  | +431.     | +453.     | +484.     | +362.     | +326.     | -548.     | -547.     | -575.     | -453.     | -409.      |
| 91.79                  | 88.04                  | +488.     | +514.     | +548.     | +412.     | +370.     | -612.     | -618.     | -657.     | -515.     | -461.      |
| 101.64                 | 98.84                  | +548.     | +578.     | +617.     | +464.     | +417.     | -674.     | -692.     | -748.     | -581.     | -513.      |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.1 DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>(µε) | 2<br>(µε) | 3<br>(µε) | 4<br>(µε) | 5<br>(µε) | 6<br>(µε) | 7<br>(µε) | 8<br>(µε) | 9<br>(µε) | 10<br>(µε) |
|------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.       | +0.       | +1.       | +0.       | +0.       | +0.       | +1.       | +0.       | +0.       | +0.        |
| 10.55                  | 9.41                   | +24.      | +27.      | +39.      | +7.       | +17.      | -37.      | -36.      | -36.      | -29.      | -20.       |
| 20.75                  | 19.28                  | +50.      | +55.      | +79.      | +14.      | +37.      | -83.      | -74.      | -68.      | -58.      | -59.       |
| 30.95                  | 29.15                  | +77.      | +85.      | +120.     | +21.      | +60.      | -128.     | -112.     | -100.     | -86.      | -91.       |
| 0.59                   | 0.00                   | +10.      | +9.       | +11.      | +2.       | +8.       | -7.       | -6.       | -6.       | -5.       | -4.        |
| 10.55                  | 9.52                   | +33.      | +34.      | +49.      | +9.       | +26.      | -46.      | -40.      | -35.      | -31.      | -32.       |
| 20.63                  | 19.05                  | +55.      | +59.      | +85.      | +16.      | +43.      | -86.      | -75.      | -67.      | -58.      | -61.       |
| 30.95                  | 29.15                  | +79.      | +86.      | +123.     | +22.      | +60.      | -129.     | -113.     | -101.     | -86.      | -92.       |
| 41.15                  | 38.79                  | +105.     | +116.     | +163.     | +31.      | +85.      | -174.     | -151.     | -134.     | -115.     | -123.      |
| 51.35                  | 48.78                  | +136.     | +148.     | +206.     | +41.      | +110.     | -219.     | -191.     | -168.     | -146.     | -155.      |
| 61.43                  | 58.42                  | +166.     | +182.     | +252.     | +53.      | +137.     | -267.     | -230.     | -202.     | -177.     | -187.      |
| 71.40                  | 68.52                  | +202.     | +218.     | +297.     | +67.      | +163.     | -315.     | -271.     | -240.     | -211.     | -221.      |
| 81.36                  | 78.40                  | +235.     | +255.     | +343.     | +79.      | +189.     | -361.     | -311.     | -276.     | -244.     | -253.      |
| 91.79                  | 88.04                  | +269.     | +292.     | +389.     | +89.      | +213.     | -409.     | -353.     | -314.     | -280.     | -283.      |
| 101.64                 | 98.84                  | +307.     | +333.     | +442.     | +100.     | +241.     | -458.     | -397.     | -356.     | -317.     | -316.      |



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
VIGA IV ENSAIO No.1 DATA: 26/03/91  
DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
SECAO 3

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | 1<br>( $\mu E$ ) | 2<br>( $\mu E$ ) | 3<br>( $\mu E$ ) | 4<br>( $\mu E$ ) | 5<br>( $\mu E$ ) | 6<br>( $\mu E$ ) |
|---------------|---------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.              | +0.              | +0.              | +0.              | +0.              | +0.              |
| 10.55         | 9.41          | +19.             | +27.             | +6.              | -35.             | -45.             | -31.             |
| 20.75         | 19.28         | +38.             | +56.             | +13.             | -72.             | -88.             | -61.             |
| 30.95         | 29.15         | +59.             | +85.             | +20.             | -109.            | -131.            | -92.             |
| 0.59          | 0.00          | +10.             | +13.             | +1.              | -6.              | -18.             | -6.              |
| 10.55         | 9.52          | +26.             | +37.             | +6.              | -39.             | -58.             | -34.             |
| 20.63         | 19.05         | +43.             | +62.             | +14.             | -73.             | -94.             | -62.             |
| 30.95         | 29.15         | +60.             | +87.             | +21.             | -110.            | -131.            | -93.             |
| 41.15         | 38.79         | +83.             | +116.            | +31.             | -146.            | -172.            | -123.            |
| 51.35         | 48.78         | +106.            | +147.            | +40.             | -185.            | -214.            | -155.            |
| 61.43         | 58.42         | +130.            | +180.            | +51.             | -223.            | -256.            | -188.            |
| 71.40         | 68.52         | +158.            | +214.            | +66.             | -262.            | -302.            | -223.            |
| 81.36         | 78.40         | +181.            | +246.            | +75.             | -301.            | -345.            | -255.            |
| 91.79         | 88.04         | +204.            | +281.            | +84.             | -341.            | -392.            | -290.            |
| 101.64        | 98.84         | +227.            | +316.            | +93.             | -381.            | -440.            | -324.            |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.1 DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAD 4

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                     |
| 10.55                  | 9.41                   | -1.                    | +10.                   | +23.                   | +7.                    | +3.                    | -14.                   | -25.                   | -40.                   | -33.                   | -19.                    |
| 20.75                  | 19.28                  | +1.                    | +22.                   | +46.                   | +12.                   | +7.                    | -35.                   | -52.                   | -76.                   | -62.                   | -40.                    |
| 30.95                  | 29.15                  | +5.                    | +34.                   | +70.                   | +19.                   | +11.                   | -59.                   | -80.                   | -110.                  | -92.                   | -61.                    |
| 0.59                   | 0.00                   | +7.                    | +8.                    | +11.                   | +7.                    | +7.                    | +10.                   | -5.                    | -20.                   | -12.                   | -2.                     |
| 10.55                  | 9.52                   | +4.                    | +17.                   | +33.                   | +11.                   | +7.                    | -7.                    | -29.                   | -53.                   | -40.                   | -20.                    |
| 20.63                  | 19.05                  | +5.                    | +26.                   | +52.                   | +16.                   | +10.                   | -33.                   | -54.                   | -81.                   | -66.                   | -40.                    |
| 30.95                  | 29.15                  | +5.                    | +35.                   | +72.                   | +20.                   | +12.                   | -59.                   | -80.                   | -110.                  | -92.                   | -61.                    |
| 41.15                  | 38.79                  | +8.                    | +47.                   | +95.                   | +27.                   | +17.                   | -85.                   | -109.                  | -141.                  | -121.                  | -83.                    |
| 51.35                  | 48.78                  | +13.                   | +61.                   | +120.                  | +35.                   | +22.                   | -112.                  | -139.                  | -176.                  | -151.                  | -105.                   |
| 61.43                  | 58.42                  | +18.                   | +77.                   | +150.                  | +46.                   | +29.                   | -139.                  | -169.                  | -209.                  | -180.                  | -126.                   |
| 71.40                  | 68.52                  | +29.                   | +95.                   | +175.                  | +58.                   | +40.                   | -166.                  | -201.                  | -246.                  | -213.                  | -150.                   |
| 81.36                  | 78.40                  | +33.                   | +110.                  | +205.                  | +70.                   | +46.                   | -194.                  | -230.                  | -281.                  | -243.                  | -173.                   |
| 91.79                  | 88.04                  | +35.                   | +127.                  | +241.                  | +84.                   | +51.                   | -224.                  | -261.                  | -316.                  | -275.                  | -197.                   |
| 101.64                 | 98.84                  | +37.                   | +146.                  | +279.                  | +98.                   | +55.                   | -254.                  | -292.                  | -352.                  | -308.                  | -221.                   |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.1 DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 5

| F <sub>1</sub><br>(KN) | F <sub>2</sub><br>(KN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                    |
| 10.55                  | 9.41                   | +1.                    | +9.                    | +5.                    | -26.                   | -29.                   | -20.                   |
| 20.75                  | 19.28                  | +4.                    | +20.                   | +11.                   | -56.                   | -51.                   | -40.                   |
| 30.95                  | 29.15                  | +7.                    | +32.                   | +19.                   | -85.                   | -72.                   | -60.                   |
| 0.59                   | 0.00                   | +3.                    | +6.                    | +5.                    | -5.                    | -5.                    | -3.                    |
| 10.55                  | 9.52                   | +5.                    | +14.                   | +9.                    | -30.                   | -28.                   | -21.                   |
| 20.63                  | 19.05                  | +7.                    | +23.                   | +15.                   | -58.                   | -49.                   | -40.                   |
| 30.95                  | 29.15                  | +9.                    | +33.                   | +20.                   | -85.                   | -72.                   | -61.                   |
| 41.15                  | 38.79                  | +14.                   | +44.                   | +27.                   | -114.                  | -95.                   | -80.                   |
| 51.35                  | 48.78                  | +20.                   | +59.                   | +37.                   | -146.                  | -119.                  | -100.                  |
| 61.43                  | 58.42                  | +29.                   | +74.                   | +48.                   | -176.                  | -141.                  | -120.                  |
| 71.40                  | 68.52                  | +41.                   | +93.                   | +63.                   | -210.                  | -166.                  | -140.                  |
| 81.36                  | 78.40                  | +53.                   | +112.                  | +77.                   | -241.                  | -189.                  | -158.                  |
| 91.79                  | 88.04                  | +63.                   | +131.                  | +91.                   | -274.                  | -214.                  | -176.                  |
| 101.64                 | 98.84                  | +75.                   | +153.                  | +108.                  | -309.                  | -239.                  | -194.                  |

---

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

---

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
VIGA IV            ENSAIO No.1            DATA: 26/03/91  
DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
SECAD 6

---

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu$ E) | 2<br>( $\mu$ E) | 3<br>( $\mu$ E) |
|------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +1.             | +0.             | +0.             |
| 10.55                  | 9.41                   | +49.            | +50.            | +55.            |
| 20.75                  | 19.28                  | +99.            | +103.           | +112.           |
| 30.95                  | 29.15                  | +151.           | +156.           | +169.           |
| 0.59                   | 0.00                   | +9.             | +9.             | +8.             |
| 10.55                  | 9.52                   | +55.            | +58.            | +62.            |
| 20.63                  | 19.05                  | +103.           | +106.           | +116.           |
| 30.95                  | 29.15                  | +152.           | +157.           | +171.           |
| 41.15                  | 38.79                  | +205.           | +210.           | +227.           |
| 51.35                  | 48.78                  | +263.           | +266.           | +285.           |
| 61.43                  | 58.42                  | +323.           | +325.           | +345.           |
| 71.40                  | 68.52                  | +389.           | +386.           | +406.           |
| 81.36                  | 78.40                  | +452.           | +446.           | +466.           |
| 91.79                  | 88.04                  | +516.           | +507.           | +528.           |
| 101.64                 | 98.84                  | +583.           | +572.           | +596.           |

---

---

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

---

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
VIGA IV            ENSAIO No.1            DATA: 26/03/91  
DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
SECAO 7

---

| $F_s$<br>(kN) | $F_m$<br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                    | +0.                    | +0.                    |
| 10.55         | 9.41          | +49.                   | +52.                   | +57.                   |
| 20.75         | 19.28         | +99.                   | +104.                  | +117.                  |
| 30.95         | 29.15         | +151.                  | +158.                  | +176.                  |
| 0.59          | 0.00          | +10.                   | +10.                   | +10.                   |
| 10.55         | 9.52          | +55.                   | +58.                   | +66.                   |
| 20.63         | 19.05         | +102.                  | +108.                  | +120.                  |
| 30.95         | 29.15         | +151.                  | +160.                  | +178.                  |
| 41.15         | 38.79         | +203.                  | +213.                  | +235.                  |
| 51.35         | 48.76         | +258.                  | +270.                  | +295.                  |
| 61.43         | 58.42         | +314.                  | +327.                  | +357.                  |
| 71.40         | 68.52         | +374.                  | +387.                  | +420.                  |
| 81.36         | 78.40         | +433.                  | +447.                  | +482.                  |
| 91.79         | 88.04         | +490.                  | +506.                  | +546.                  |
| 101.64        | 98.84         | +551.                  | +570.                  | +616.                  |

---

---

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

---

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
VIGA IV            ENSAIO No.1            DATA: 26/03/91  
DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
SECAO 8

---

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | 1<br>( $\mu E$ ) | 2<br>( $\mu E$ ) | 3<br>( $\mu E$ ) |
|---------------|---------------|------------------|------------------|------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.              | +0.              | +0.              |
| 10.55         | 9.41          | +46.             | +51.             | +57.             |
| 20.75         | 19.28         | +95.             | +105.            | +117.            |
| 30.95         | 29.15         | +144.            | +159.            | +177.            |
| 0.59          | 0.00          | +8.              | +9.              | +9.              |
| 10.55         | 9.52          | +52.             | +58.             | +66.             |
| 20.63         | 19.05         | +97.             | +108.            | +121.            |
| 30.95         | 29.15         | +145.            | +160.            | +179.            |
| 41.15         | 38.79         | +195.            | +213.            | +237.            |
| 51.35         | 48.78         | +248.            | +270.            | +298.            |
| 61.43         | 58.42         | +304.            | +328.            | +362.            |
| 71.40         | 68.52         | +364.            | +390.            | +427.            |
| 81.36         | 78.40         | +425.            | +452.            | +492.            |
| 91.79         | 88.04         | +488.            | +515.            | +561.            |
| 101.64        | 98.84         | +555.            | +582.            | +635.            |

---

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV      ENSAIO No.1      DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 MONTANTE 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    |
| 10.55                  | 9.41                   | +7.                    | -16.                   | -34.                   | +10.                   | -14.                   | -36.                   |
| 20.75                  | 19.28                  | +17.                   | -32.                   | -72.                   | +23.                   | -27.                   | -73.                   |
| 30.95                  | 29.15                  | +28.                   | -48.                   | -112.                  | +38.                   | -41.                   | -110.                  |
| 0.59                   | 0.00                   | +7.                    | +2.                    | -3.                    | +7.                    | +3.                    | -3.                    |
| 10.55                  | 9.52                   | +13.                   | -14.                   | -37.                   | +18.                   | -11.                   | -37.                   |
| 20.63                  | 19.05                  | +20.                   | -30.                   | -73.                   | +28.                   | -26.                   | -73.                   |
| 30.95                  | 29.15                  | +30.                   | -47.                   | -113.                  | +39.                   | -41.                   | -111.                  |
| 41.15                  | 38.79                  | +41.                   | -63.                   | -151.                  | +54.                   | -54.                   | -148.                  |
| 51.35                  | 48.78                  | +53.                   | -80.                   | -193.                  | +71.                   | -66.                   | -187.                  |
| 61.43                  | 58.42                  | +69.                   | -95.                   | -234.                  | +92.                   | -77.                   | -226.                  |
| 71.40                  | 68.52                  | +91.                   | -108.                  | -278.                  | +113.                  | -90.                   | -269.                  |
| 81.36                  | 78.40                  | +103.                  | -123.                  | -316.                  | +136.                  | -101.                  | -309.                  |
| 91.79                  | 88.04                  | +115.                  | -138.                  | -355.                  | +161.                  | -111.                  | -350.                  |
| 101.64                 | 98.84                  | +130.                  | -153.                  | -396.                  | +188.                  | -122.                  | -393.                  |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.1 DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 MONTANTE 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu$ E) | 2<br>( $\mu$ E) | 3<br>( $\mu$ E) | 4<br>( $\mu$ E) | 5<br>( $\mu$ E) | 6<br>( $\mu$ E) |
|------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.             | +0.             | +0.             | +1.             | +0.             | +0.             |
| 10.55                  | 9.41                   | -34.            | -14.            | +9.             | -36.            | -17.            | +4.             |
| 20.75                  | 19.28                  | -70.            | -30.            | +18.            | -72.            | -32.            | +9.             |
| 30.95                  | 29.15                  | -105.           | -45.            | +25.            | -108.           | -46.            | +17.            |
| 0.59                   | 0.00                   | -7.             | +0.             | +7.             | -5.             | +3.             | +10.            |
| 10.55                  | 9.52                   | -37.            | -14.            | +14.            | -38.            | -13.            | +11.            |
| 20.63                  | 19.05                  | -71.            | -29.            | +20.            | -72.            | -29.            | +14.            |
| 30.95                  | 29.15                  | -105.           | -45.            | +25.            | -107.           | -45.            | +17.            |
| 41.15                  | 38.79                  | -141.           | -60.            | +33.            | -143.           | -59.            | +24.            |
| 51.35                  | 48.78                  | -178.           | -76.            | +43.            | -179.           | -72.            | +34.            |
| 61.43                  | 58.42                  | -215.           | -91.            | +54.            | -212.           | -84.            | +44.            |
| 71.40                  | 68.52                  | -247.           | -104.           | +62.            | -243.           | -96.            | +50.            |
| 81.36                  | 78.40                  | -285.           | -119.           | +75.            | -273.           | -107.           | +56.            |
| 91.79                  | 88.04                  | -325.           | -134.           | +87.            | -302.           | -118.           | +64.            |
| 101.64                 | 98.84                  | -366.           | -150.           | +101.           | -330.           | -128.           | +71.            |



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV      ENSAIO No.1      DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 TIRANTE 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | S1.1<br>(µε) | S1.2<br>(µε) | S2.1<br>(µε) | S2.2<br>(µε) | S3.1<br>(µε) | S3.2<br>(µε) |
|------------------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          |
| 10.55                  | 9.41                   | +64.         | +72.         | +68.         | +65.         | +71.         | +73.         |
| 20.75                  | 19.28                  | +129.        | +143.        | +136.        | +129.        | +141.        | +148.        |
| 30.95                  | 29.15                  | +193.        | +212.        | +203.        | +193.        | +211.        | +221.        |
| 0.59                   | 0.00                   | -12.         | -6.          | -8.          | -9.          | -8.          | -5.          |
| 10.55                  | 9.52                   | +54.         | +66.         | +60.         | +57.         | +62.         | +68.         |
| 20.63                  | 19.05                  | +121.        | +139.        | +130.        | +124.        | +135.        | +141.        |
| 30.95                  | 29.15                  | +191.        | +212.        | +202.        | +192.        | +209.        | +218.        |
| 41.15                  | 38.79                  | +256.        | +280.        | +268.        | +256.        | +278.        | +292.        |
| 51.35                  | 48.78                  | +319.        | +348.        | +333.        | +319.        | +346.        | +362.        |
| 61.43                  | 58.42                  | +379.        | +413.        | +395.        | +378.        | +409.        | +430.        |
| 71.40                  | 68.52                  | +425.        | +469.        | +448.        | +430.        | +467.        | +490.        |
| 81.36                  | 78.40                  | +481.        | +529.        | +505.        | +486.        | +526.        | +553.        |
| 91.79                  | 88.04                  | +536.        | +588.        | +562.        | +540.        | +584.        | +616.        |
| 101.64                 | 98.84                  | +591.        | +649.        | +617.        | +593.        | +641.        | +677.        |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.1 DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 TIRANTE 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | S1.1<br>(µε) | S1.2<br>(µε) | S2.1<br>(µε) | S2.2<br>(µε) | S3.1<br>(µε) | S3.2<br>(µε) |
|------------------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          |
| 10.55                  | 9.41                   | +77.         | +72.         | +67.         | +74.         | +83.         | +61.         |
| 20.75                  | 19.28                  | +151.        | +142.        | +133.        | +145.        | +158.        | +123.        |
| 30.95                  | 29.15                  | +221.        | +210.        | +196.        | +212.        | +233.        | +178.        |
| 0.59                   | 0.00                   | -11.         | -11.         | -8.          | -14.         | -38.         | +8.          |
| 10.55                  | 9.52                   | +65.         | +61.         | +58.         | +62.         | +57.         | +61.         |
| 20.63                  | 19.05                  | +142.        | +134.        | +125.        | +137.        | +146.        | +117.        |
| 30.95                  | 29.15                  | +218.        | +208.        | +194.        | +210.        | +232.        | +176.        |
| 41.15                  | 38.79                  | +288.        | +277.        | +258.        | +276.        | +307.        | +231.        |
| 51.35                  | 48.78                  | +354.        | +343.        | +318.        | +338.        | +376.        | +285.        |
| 61.43                  | 58.42                  | +416.        | +405.        | +377.        | +398.        | +443.        | +338.        |
| 71.40                  | 68.52                  | +482.        | +469.        | +435.        | +458.        | +508.        | +391.        |
| 81.36                  | 78.40                  | +541.        | +529.        | +492.        | +516.        | +572.        | +442.        |
| 91.79                  | 88.04                  | +600.        | +589.        | +548.        | +572.        | +637.        | +493.        |
| 101.64                 | 98.84                  | +657.        | +646.        | +603.        | +629.        | +698.        | +544.        |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.1 DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.0                    | +0.0                    | U/C      |
| 10.55                  | 9.41                   | -4.                    | +23.                   | +0.                    | +23.                   | -27.                   | +3.3                    | -4.4                    | +47.2    |
| 20.75                  | 19.28                  | -9.                    | +46.                   | -2.                    | +46.                   | -57.                   | +6.6                    | -9.7                    | +46.8    |
| 30.95                  | 29.15                  | -12.                   | +70.                   | -5.                    | +70.                   | -87.                   | +9.9                    | -14.9                   | +46.4    |
| 0.59                   | 0.00                   | +2.                    | +2.                    | -3.                    | +3.                    | -4.                    | +0.4                    | -0.7                    | U/C      |
| 10.55                  | 9.52                   | -3.                    | +25.                   | -3.                    | +25.                   | -30.                   | +3.5                    | -5.2                    | +45.0    |
| 20.63                  | 19.05                  | -7.                    | +47.                   | -3.                    | +47.                   | -57.                   | +6.8                    | -9.6                    | +46.0    |
| 30.95                  | 29.15                  | -11.                   | +70.                   | -5.                    | +70.                   | -86.                   | +10.0                   | -14.7                   | +46.2    |
| 41.15                  | 38.79                  | -15.                   | +95.                   | -8.                    | +95.                   | -117.                  | +13.4                   | -20.0                   | +46.0    |
| 51.35                  | 48.78                  | -19.                   | +119.                  | -11.                   | +119.                  | -150.                  | +16.8                   | -25.6                   | +45.8    |
| 61.43                  | 58.42                  | -22.                   | +146.                  | -16.                   | +146.                  | -184.                  | +20.4                   | -31.5                   | +45.5    |
| 71.40                  | 68.52                  | -24.                   | +174.                  | -21.                   | +174.                  | -219.                  | +24.4                   | -37.5                   | +45.2    |
| 81.36                  | 78.40                  | -27.                   | +201.                  | -27.                   | +201.                  | -255.                  | +28.1                   | -43.9                   | +44.9    |
| 91.79                  | 88.04                  | -28.                   | +232.                  | -34.                   | +232.                  | -294.                  | +32.3                   | -50.6                   | +44.7    |
| 101.64                 | 98.84                  | -30.                   | +265.                  | -44.                   | +265.                  | -339.                  | +36.8                   | -58.4                   | +44.4    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.1 DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 2

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 10.55         | 9.41          | +0.                               | +35.                              | +7.                               | +35.                              | -29.                              | +6.0                | -4.1                | +48.0                    |
| 20.75         | 19.28         | -1.                               | +68.                              | +9.                               | +68.                              | -61.                              | +11.3               | -9.1                | +47.1                    |
| 30.95         | 29.15         | -1.                               | +100.                             | +9.                               | +100.                             | -93.                              | +16.3               | -14.1               | +46.4                    |
| 0.59          | 0.00          | +7.                               | +4.                               | -6.                               | +7.                               | -7.                               | +1.2                | -1.0                | +14.2                    |
| 10.55         | 9.52          | +5.                               | +37.                              | +2.                               | +37.                              | -30.                              | +6.3                | -4.3                | +43.8                    |
| 20.63         | 19.05         | +2.                               | +69.                              | +6.                               | +69.                              | -62.                              | +11.4               | -9.2                | +45.8                    |
| 30.95         | 29.15         | -1.                               | +100.                             | +9.                               | +100.                             | -93.                              | +16.3               | -14.1               | +46.4                    |
| 41.15         | 38.79         | -2.                               | +132.                             | +9.                               | +133.                             | -126.                             | +21.3               | -19.4               | +46.2                    |
| 51.35         | 48.78         | -1.                               | +166.                             | +8.                               | +166.                             | -159.                             | +26.6               | -24.6               | +45.8                    |
| 61.43         | 58.42         | -1.                               | +199.                             | +7.                               | +199.                             | -193.                             | +31.7               | -30.1               | +45.6                    |
| 71.40         | 68.52         | -1.                               | +232.                             | +2.                               | +232.                             | -231.                             | +36.6               | -36.3               | +45.2                    |
| 81.36         | 78.40         | -1.                               | +265.                             | -2.                               | +265.                             | -268.                             | +41.6               | -42.4               | +44.9                    |
| 91.79         | 88.04         | +0.                               | +300.                             | -6.                               | +300.                             | -306.                             | +46.9               | -48.6               | +44.7                    |
| 101.64        | 98.84         | +0.                               | +337.                             | -12.                              | +337.                             | -349.                             | +52.3               | -55.9               | +44.5                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.1 DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 3

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | -1.                    | +0.                    | -1.                    | -0.0                    | -0.2                    | U/C      |
| 10.55                  | 9.41                   | -7.                    | +33.                   | +18.                   | +36.                   | -24.                   | +6.4                    | -3.1                    | +57.1    |
| 20.75                  | 19.28                  | -15.                   | +63.                   | +30.                   | +68.                   | -53.                   | +11.7                   | -7.3                    | +56.1    |
| 30.95                  | 29.15                  | -25.                   | +92.                   | +40.                   | +98.                   | -83.                   | +16.4                   | -12.0                   | +55.5    |
| 0.59                   | 0.00                   | +8.                    | +15.                   | +2.                    | +16.                   | -6.                    | +3.1                    | -0.3                    | +37.4    |
| 10.55                  | 9.52                   | -2.                    | +43.                   | +17.                   | +44.                   | -29.                   | +7.9                    | -3.5                    | +52.6    |
| 20.63                  | 19.05                  | -12.                   | +68.                   | +28.                   | +71.                   | -55.                   | +12.4                   | -7.6                    | +54.4    |
| 30.95                  | 29.15                  | -23.                   | +93.                   | +39.                   | +98.                   | -82.                   | +16.6                   | -11.8                   | +55.0    |
| 41.15                  | 38.79                  | -31.                   | +121.                  | +48.                   | +128.                  | -111.                  | +21.3                   | -16.3                   | +54.7    |
| 51.35                  | 48.78                  | -39.                   | +151.                  | +55.                   | +159.                  | -143.                  | +26.1                   | -21.4                   | +54.1    |
| 61.43                  | 58.42                  | -44.                   | +182.                  | +61.                   | +189.                  | -173.                  | +31.0                   | -26.2                   | +53.4    |
| 71.40                  | 68.52                  | -53.                   | +212.                  | +62.                   | +220.                  | -210.                  | +35.3                   | -32.5                   | +52.8    |
| 81.36                  | 78.40                  | -60.                   | +242.                  | +65.                   | +250.                  | -245.                  | +39.8                   | -38.2                   | +52.3    |
| 91.79                  | 88.04                  | -66.                   | +273.                  | +67.                   | +281.                  | -280.                  | +44.4                   | -44.2                   | +51.9    |
| 101.64                 | 98.84                  | -74.                   | +306.                  | +66.                   | +314.                  | -322.                  | +49.1                   | -51.3                   | +51.4    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

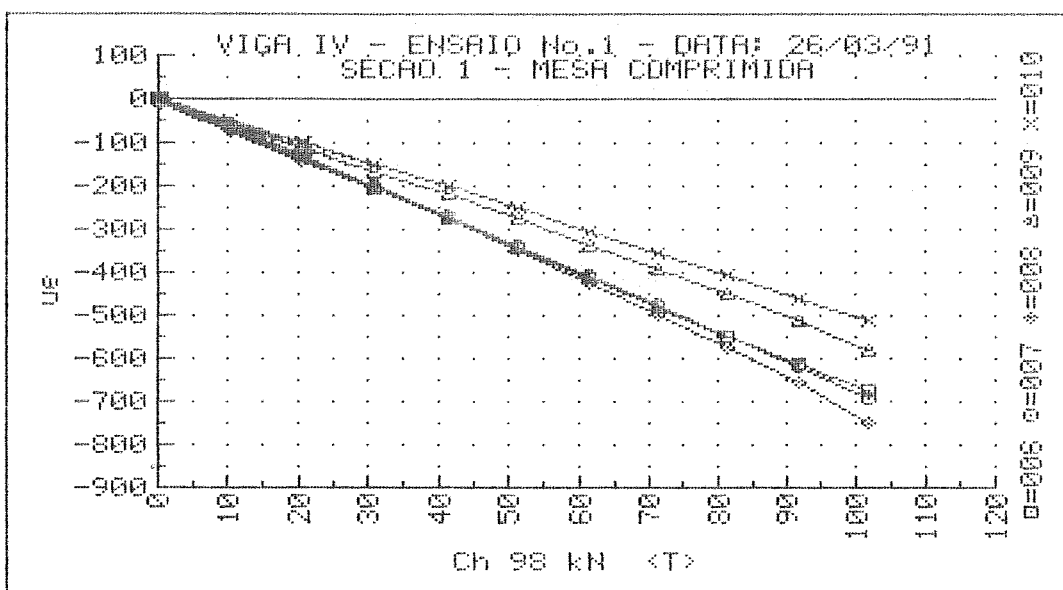
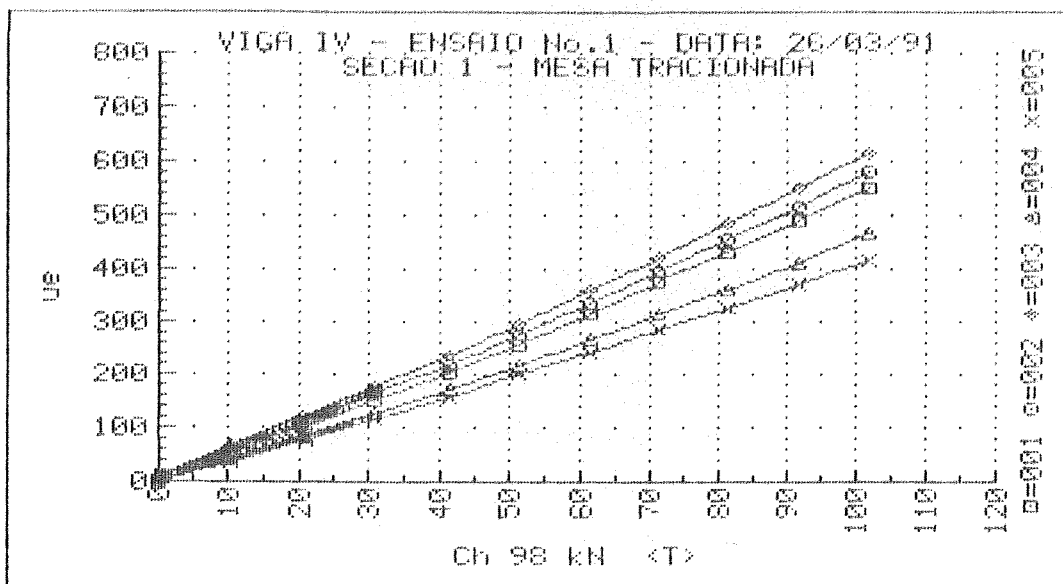
ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.1 DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 4

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(μE) | ε <sub>b</sub><br>(μE) | ε <sub>c</sub><br>(μE) | ε <sub>1</sub><br>(μE) | ε <sub>2</sub><br>(μE) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.0                    | +0.0                    | U/C      |
| 10.55                  | 9.41                   | -7.                    | +22.                   | -7.                    | +22.                   | -35.                   | +2.5                    | -6.4                    | +45.0    |
| 20.75                  | 19.28                  | -14.                   | +42.                   | -17.                   | +42.                   | -73.                   | +4.5                    | -13.6                   | +44.3    |
| 30.95                  | 29.15                  | -22.                   | +62.                   | -28.                   | +62.                   | -112.                  | +6.3                    | -21.0                   | +43.9    |
| 0.59                   | 0.00                   | +2.                    | +8.                    | +0.                    | +8.                    | -6.                    | +1.3                    | -0.8                    | +40.9    |
| 10.55                  | 9.52                   | -6.                    | +26.                   | -9.                    | +26.                   | -40.                   | +3.1                    | -7.2                    | +43.8    |
| 20.63                  | 19.05                  | -13.                   | +44.                   | -18.                   | +44.                   | -75.                   | +4.8                    | -13.9                   | +43.9    |
| 30.95                  | 29.15                  | -22.                   | +62.                   | -28.                   | +62.                   | -112.                  | +6.3                    | -21.0                   | +43.9    |
| 41.15                  | 38.79                  | -29.                   | +80.                   | -40.                   | +81.                   | -150.                  | +8.0                    | -28.3                   | +43.7    |
| 51.35                  | 48.78                  | -37.                   | +98.                   | -54.                   | +99.                   | -190.                  | +9.4                    | -36.0                   | +43.3    |
| 61.43                  | 58.42                  | -44.                   | +116.                  | -70.                   | +117.                  | -231.                  | +10.7                   | -44.2                   | +42.9    |
| 71.40                  | 68.52                  | -52.                   | +135.                  | -83.                   | +136.                  | -271.                  | +12.3                   | -51.9                   | +42.8    |
| 81.36                  | 78.40                  | -60.                   | +151.                  | -103.                  | +152.                  | -315.                  | +13.0                   | -60.7                   | +42.3    |
| 91.79                  | 88.04                  | -68.                   | +167.                  | -129.                  | +168.                  | -365.                  | +13.2                   | -70.9                   | +41.7    |
| 101.64                 | 98.04                  | -78.                   | +180.                  | -162.                  | +183.                  | -422.                  | +12.6                   | -82.7                   | +41.0    |

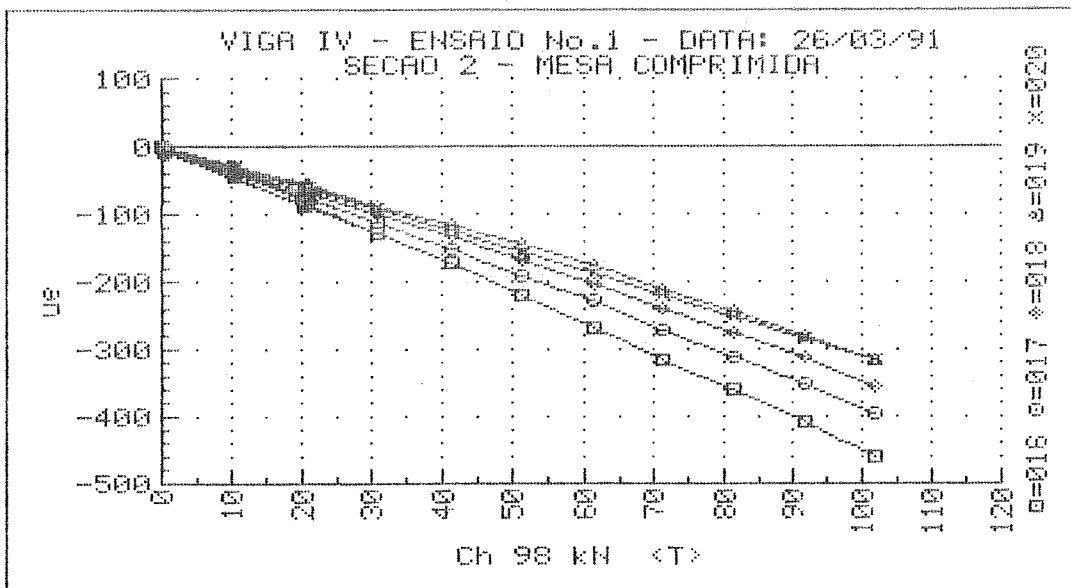
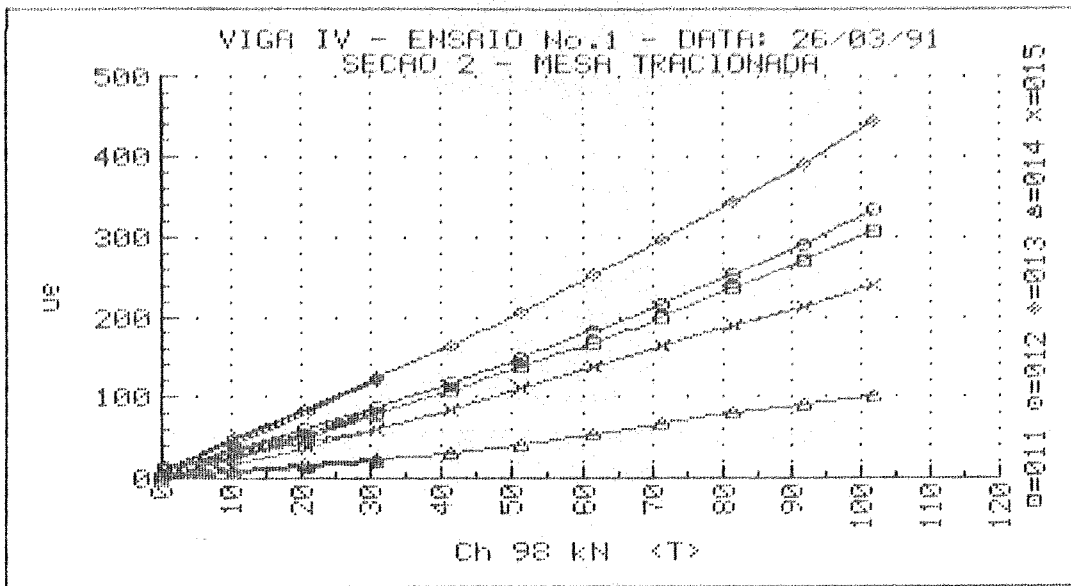
UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

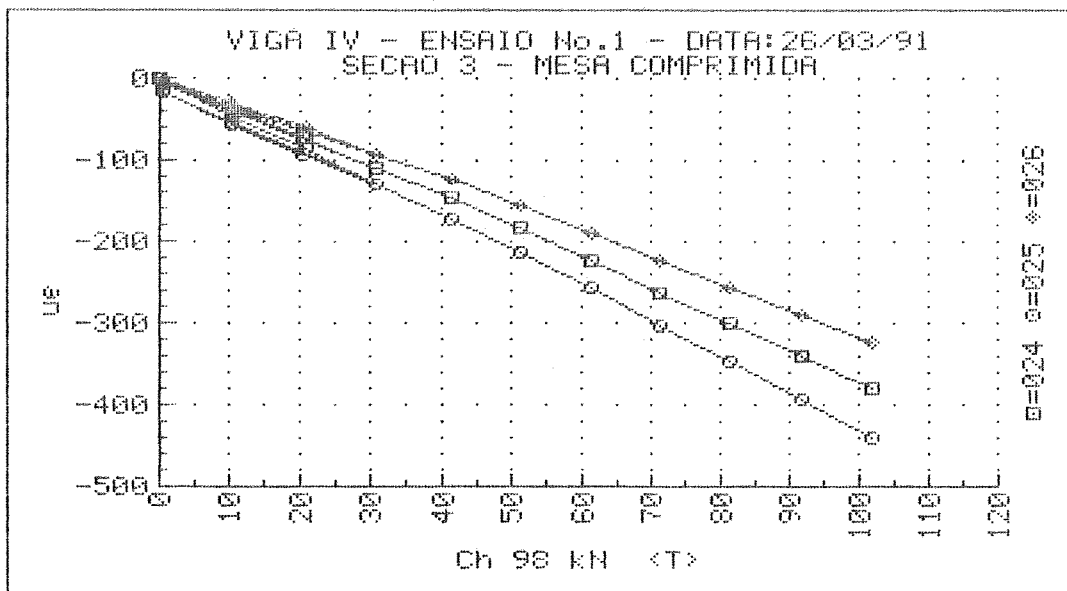
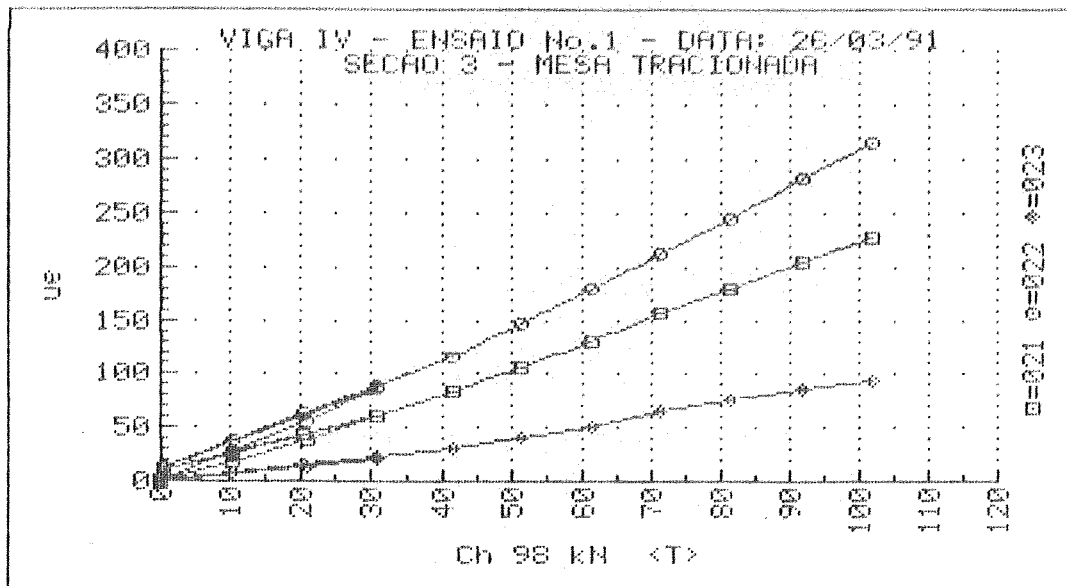
ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.1 DATA: 26/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 5

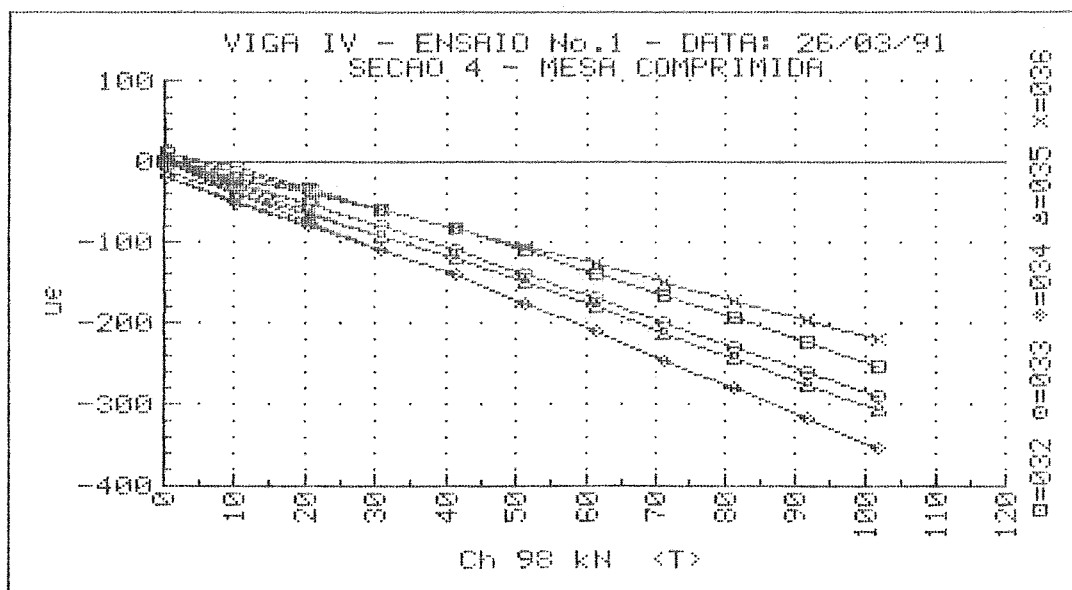
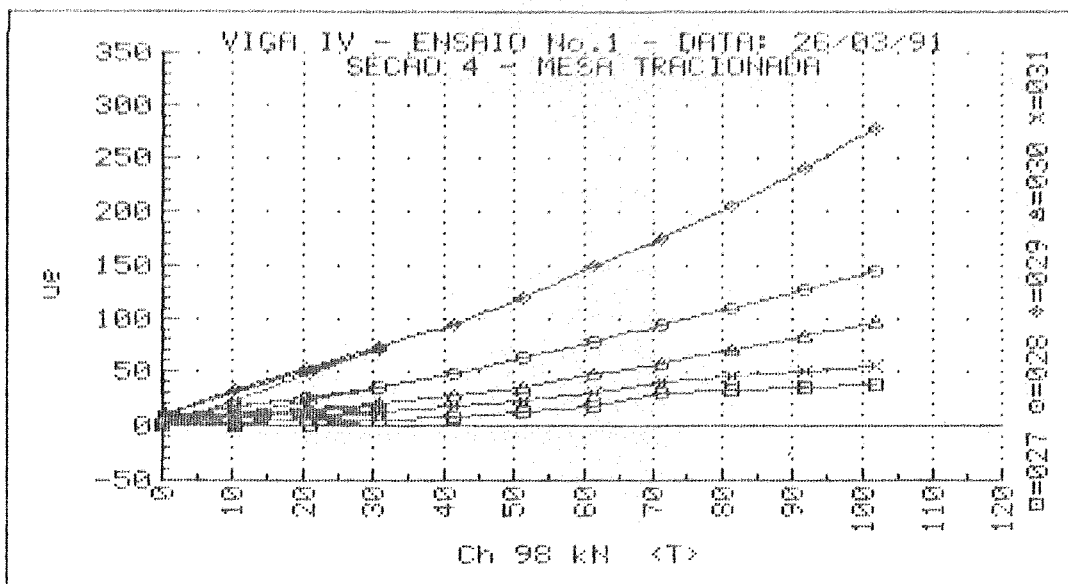
| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.0                    | +0.0                    | U/C      |
| 10.55                  | 9.41                   | -5.                    | -28.                   | +9.                    | +33.                   | -29.                   | +5.4                    | -4.3                    | -51.2    |
| 20.75                  | 19.28                  | -12.                   | -63.                   | +14.                   | +67.                   | -65.                   | +10.6                   | -10.1                   | -50.8    |
| 30.95                  | 29.15                  | -19.                   | -99.                   | +18.                   | +100.                  | -101.                  | +15.7                   | -16.0                   | -50.3    |
| 0.59                   | 0.00                   | +4.                    | -4.                    | -3.                    | +6.                    | -5.                    | +1.0                    | -0.7                    | U/C      |
| 10.55                  | 9.52                   | -2.                    | -30.                   | +6.                    | +34.                   | -31.                   | +5.7                    | -4.6                    | -48.4    |
| 20.63                  | 19.05                  | -9.                    | -63.                   | +12.                   | +67.                   | -64.                   | +10.8                   | -10.0                   | -49.8    |
| 30.95                  | 29.15                  | -18.                   | -99.                   | +17.                   | +100.                  | -101.                  | +15.7                   | -16.0                   | -50.0    |
| 41.15                  | 38.79                  | -24.                   | -134.                  | +21.                   | +133.                  | -136.                  | +20.8                   | -21.7                   | -49.7    |
| 51.35                  | 48.78                  | -29.                   | -171.                  | +23.                   | +167.                  | -173.                  | +25.8                   | -27.8                   | -49.4    |
| 61.43                  | 58.42                  | -33.                   | -208.                  | +23.                   | +200.                  | -210.                  | +30.8                   | -33.8                   | -48.9    |
| 71.40                  | 68.52                  | -37.                   | -248.                  | +21.                   | +234.                  | -250.                  | +35.8                   | -40.5                   | -48.4    |
| 81.36                  | 78.40                  | -40.                   | -288.                  | +20.                   | +269.                  | -289.                  | +41.1                   | -47.0                   | -48.1    |
| 91.79                  | 88.04                  | -44.                   | -328.                  | +17.                   | +303.                  | -330.                  | +46.1                   | -53.8                   | -47.7    |
| 101.64                 | 98.84                  | -46.                   | -372.                  | +13.                   | +340.                  | -373.                  | +51.4                   | -61.1                   | -47.4    |

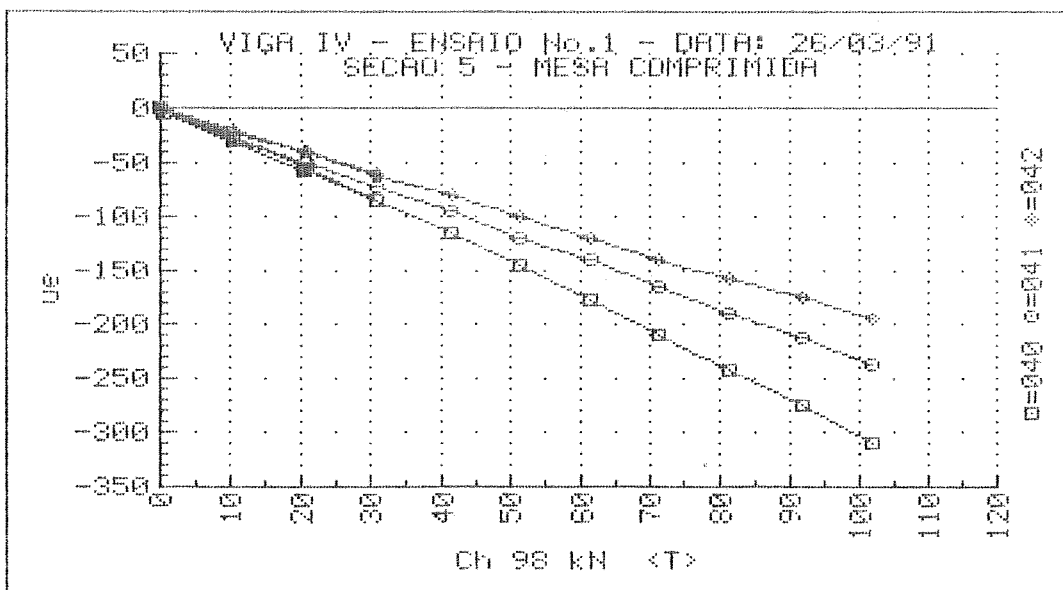
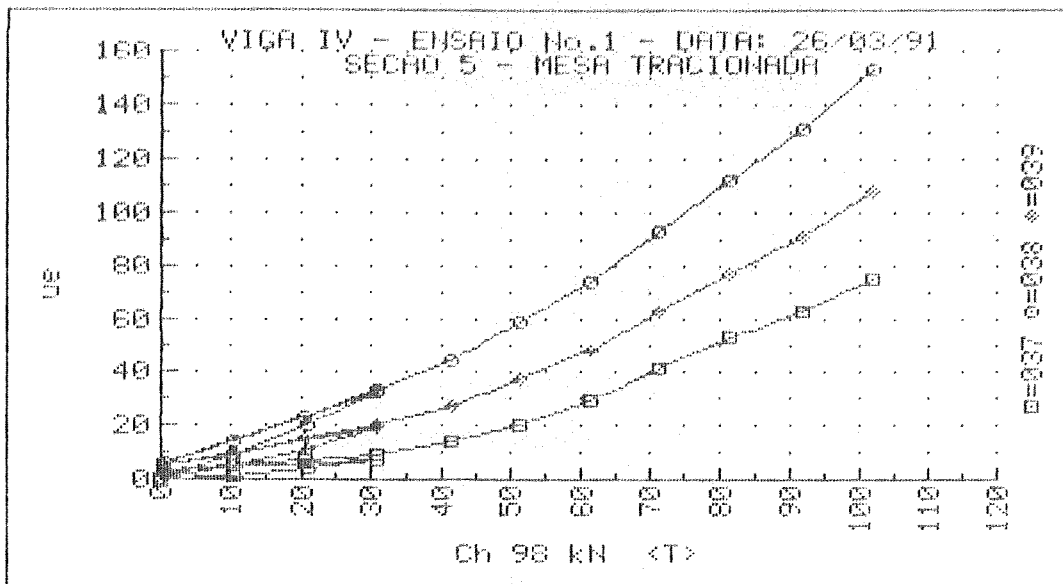


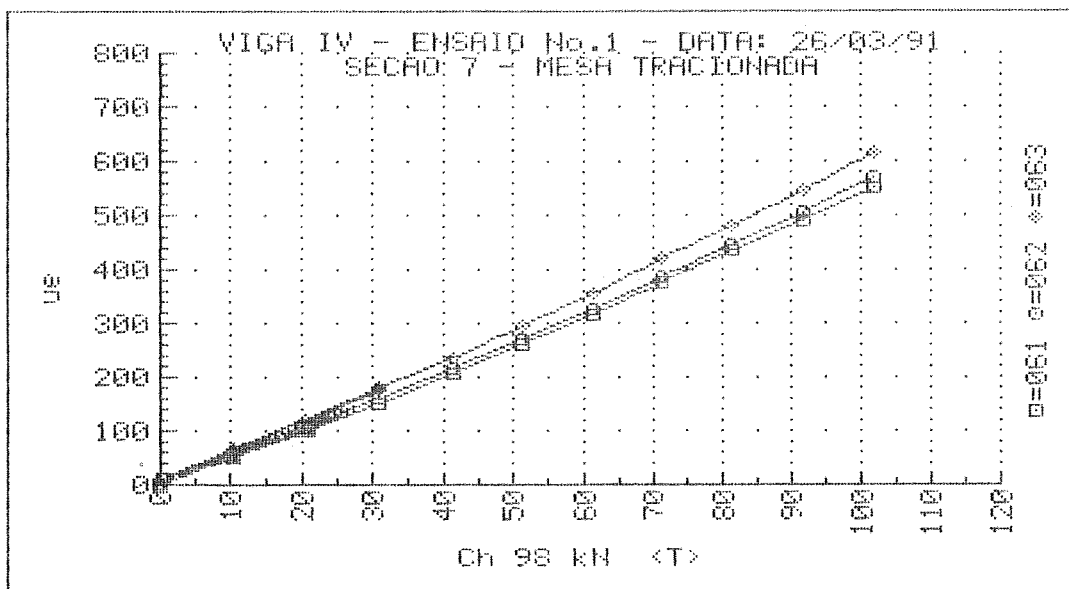
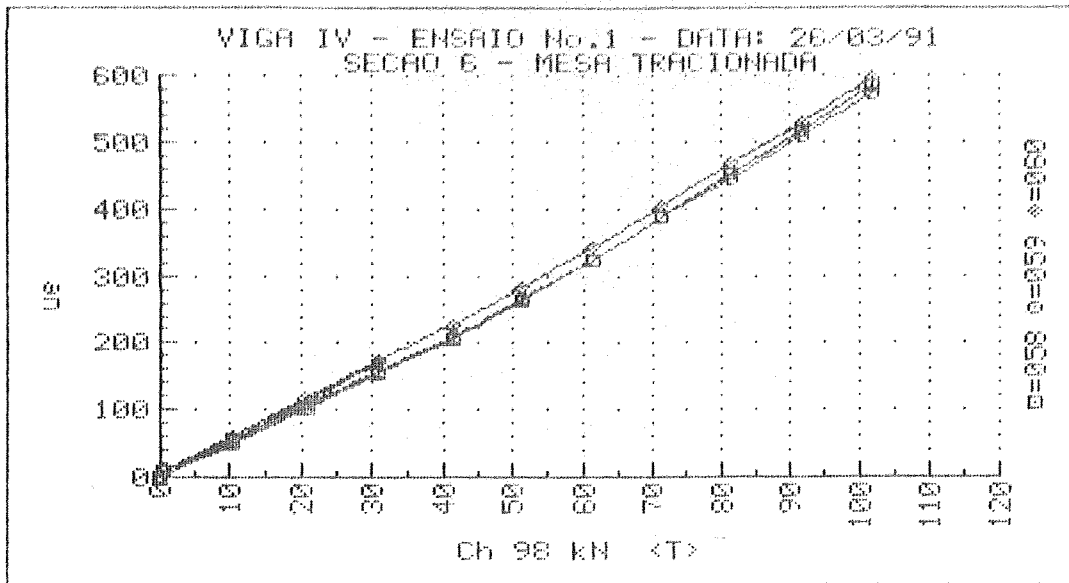




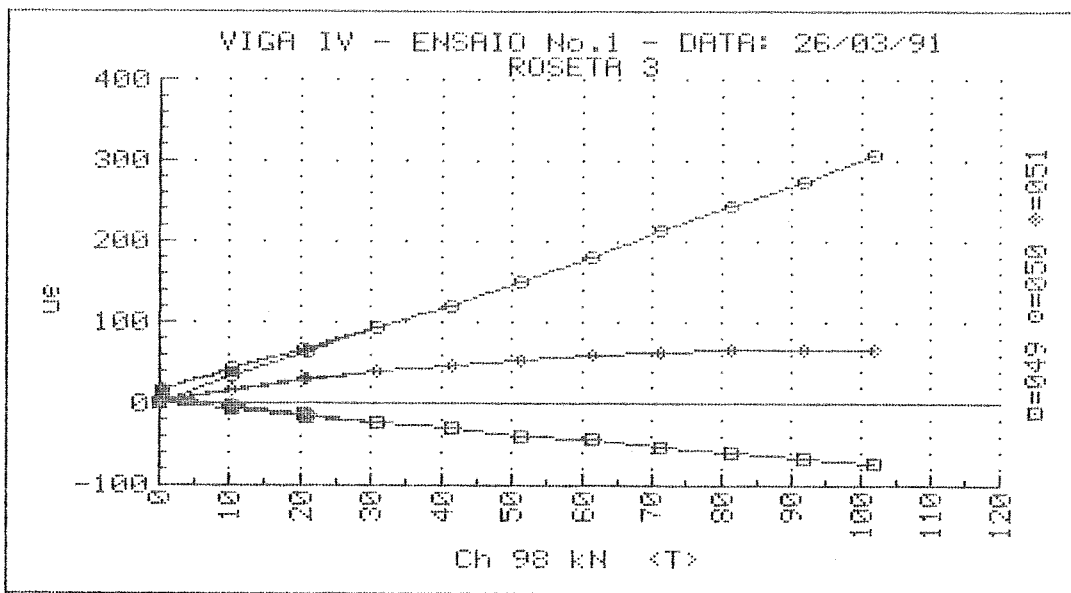
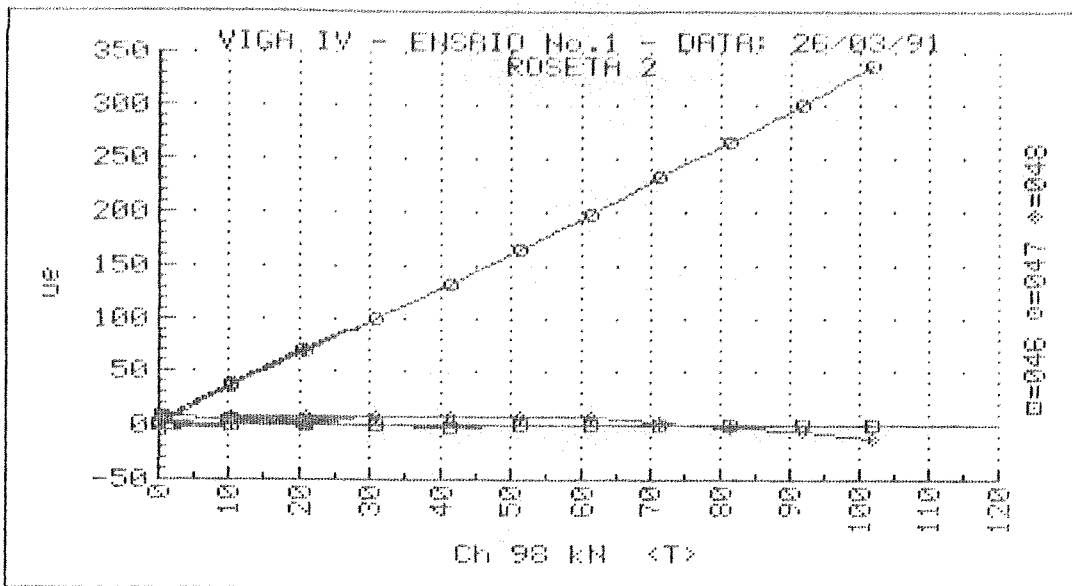


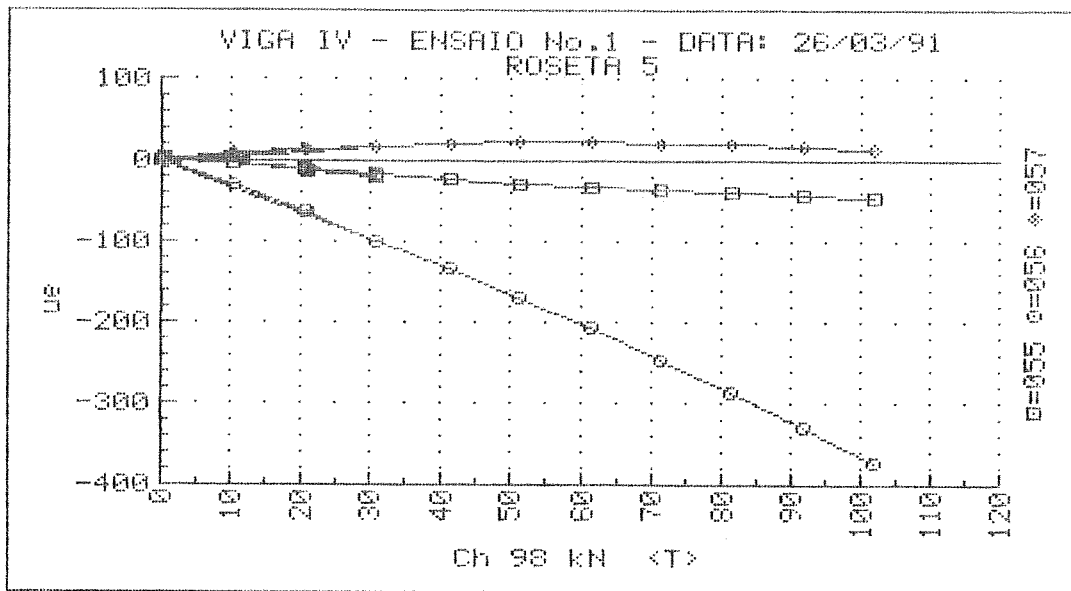
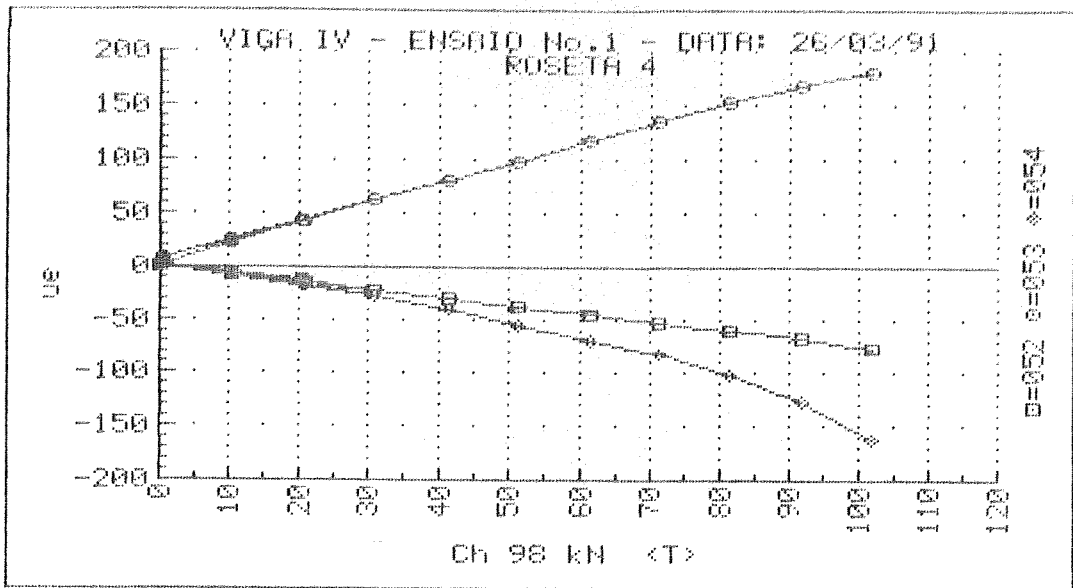




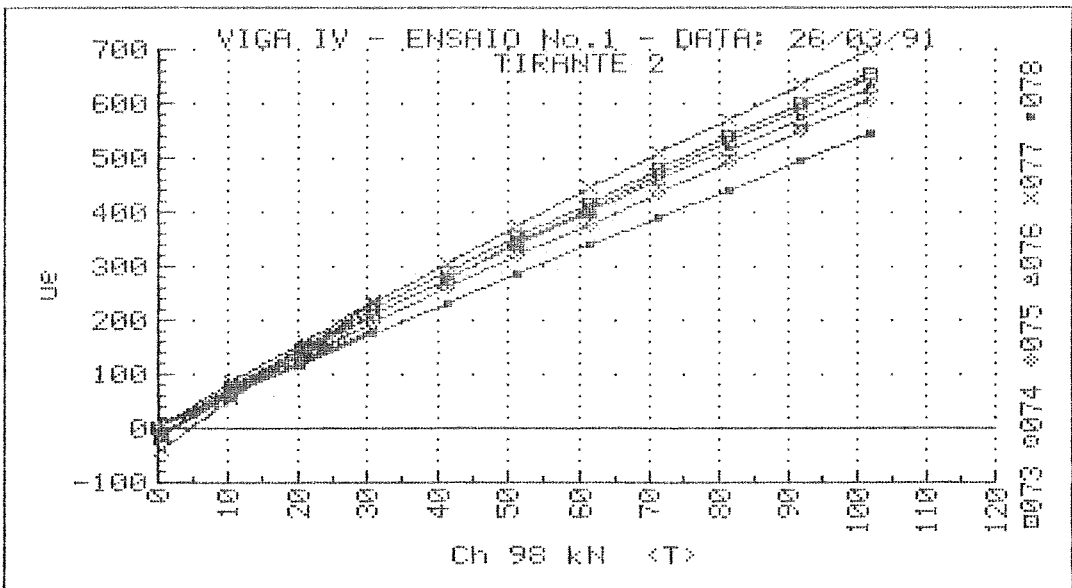
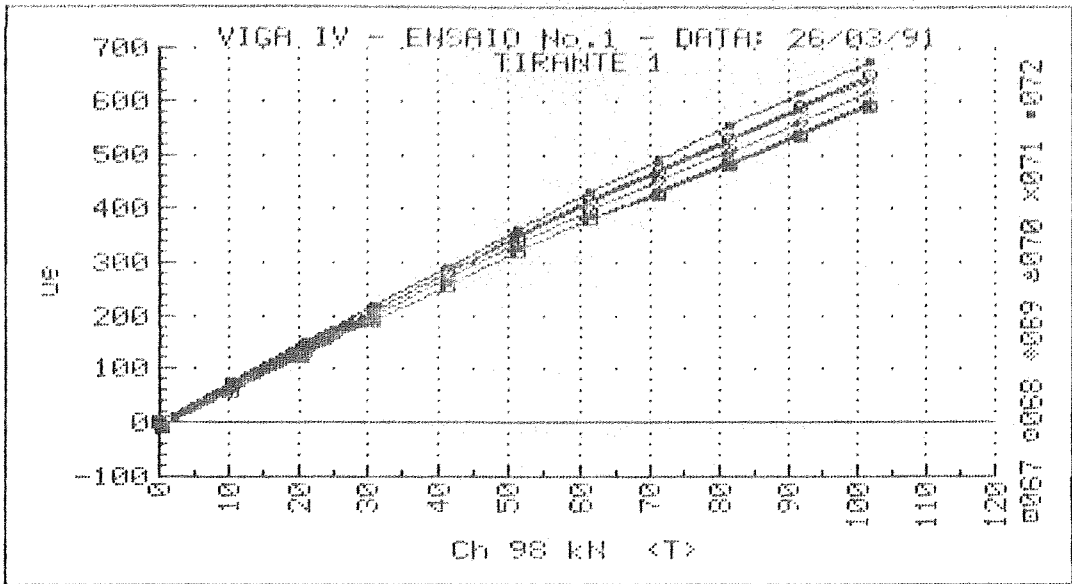


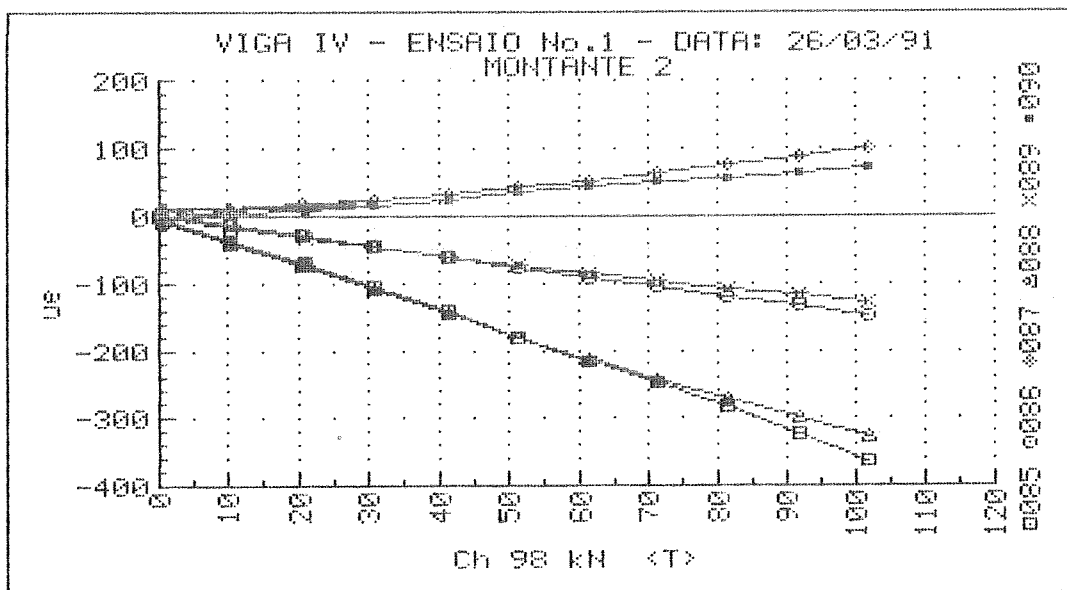
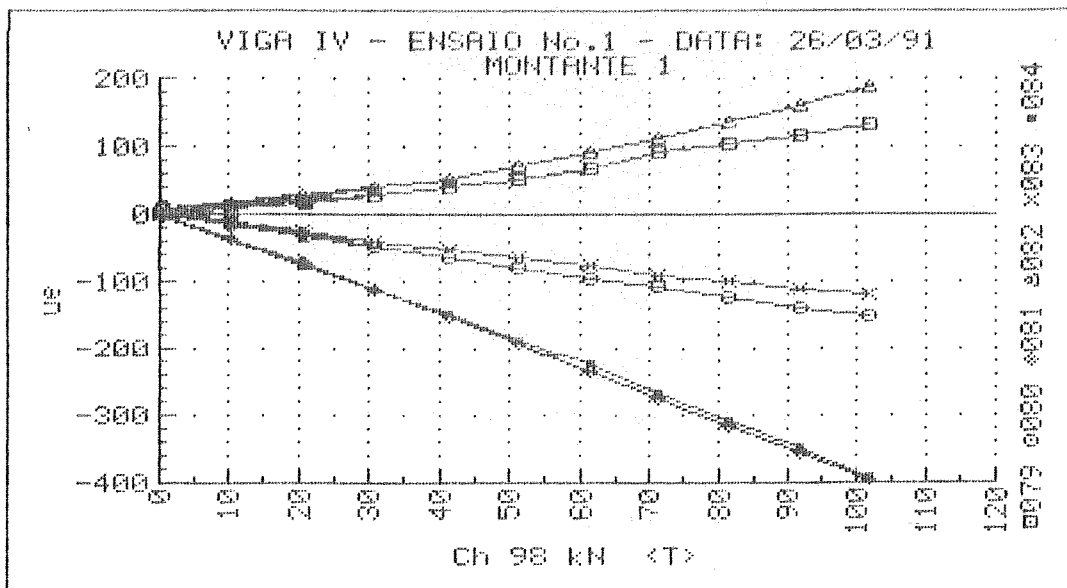












## MODELO - VIGA IV

## RESULTADOS DOS ENSAIOS

### . ENSAIO 2

#### - DESLOCAMENTOS

#### .TABELAS

#### .GRÁFICOS

MODELO: VIGA REBITADA IV

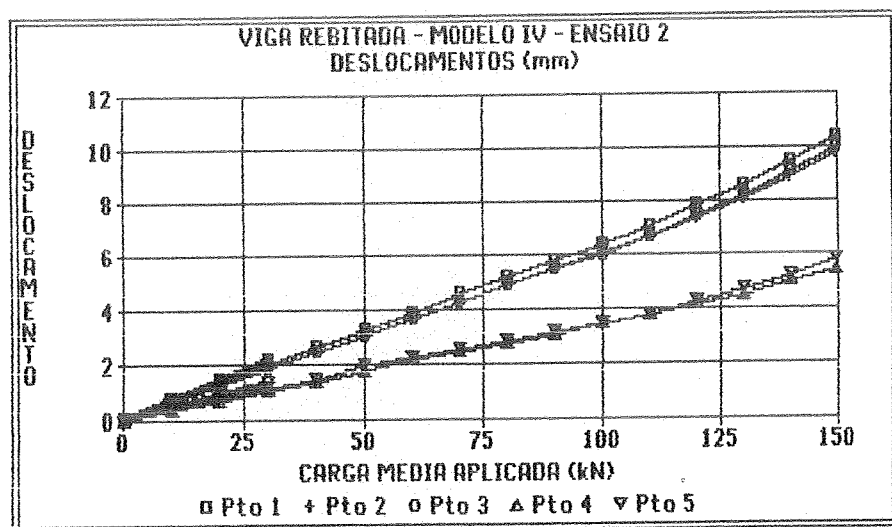
ENSAIO Nro:2

DATA:27 DE MARÇO DE 1991

HORARIO: 14:15 Hs

| ETAPA | CARGA APL<br>MEDIA<br>(kN) | DESLOCAMENTOS<br>(mm) |       |       |       |       |       |        |        |        |
|-------|----------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
|       |                            | Pto 1                 | Pto 2 | Pto 3 | Pto 4 | Pto 5 | Pto 6 | Pto 7  | Pto 8  | Pto 9  |
|       | 0,00                       | 0,00                  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
| 1     | 9,70                       | ,84                   | ,74   | ,83   | ,47   | ,61   | ,04   | -1,14  | -1,11  | -1,10  |
| 2     | 19,90                      | 1,50                  | 1,38  | 1,45  | ,86   | ,99   | ,02   | -2,22  | -2,22  | -2,23  |
| 3     | 29,90                      | 2,17                  | 2,01  | 2,08  | 1,23  | 1,38  | ,04   | -3,33  | -3,34  | -3,36  |
| 4     | ,35                        | ,12                   | ,10   | ,14   | ,14   | ,12   | ,11   | -1,16  | -0,93  | -1,12  |
| 5     | 10,10                      | ,77                   | ,68   | ,73   | ,37   | ,51   | -,02  | -,02   | -1,10  | -,05   |
| 6     | 20,00                      | 1,41                  | 1,31  | 1,33  | ,74   | ,85   | -,06  | -,08   | -2,20  | -1,15  |
| 7     | 29,95                      | 2,02                  | 1,88  | 1,89  | 1,08  | 1,18  | -,07  | -1,17  | -3,31  | -2,26  |
| 8     | 39,95                      | 2,67                  | 2,49  | 2,51  | 1,44  | 1,55  | -1,10 | -2,26  | -4,42  | -3,38  |
| 9     | 49,90                      | 3,32                  | 3,14  | 3,15  | 1,79  | 1,99  | -1,14 | -3,36  | -5,54  | -4,50  |
| 10    | 59,95                      | 3,94                  | 3,73  | 3,73  | 2,15  | 2,26  | -1,16 | -4,45  | -6,66  | -5,62  |
| 11    | 70,05                      | 4,58                  | 4,31  | 4,32  | 2,47  | 2,59  | -2,20 | -5,50  | -7,77  | -6,74  |
| 12    | 80,00                      | 5,16                  | 4,87  | 4,87  | 2,76  | 2,87  | -2,25 | -6,62  | -8,89  | -7,86  |
| 13    | 89,95                      | 5,79                  | 5,46  | 5,47  | 3,08  | 3,19  | -2,26 | -7,75  | -10,07 | -8,97  |
| 14    | 99,85                      | 6,41                  | 6,08  | 6,04  | 3,51  | 3,45  | -2,27 | -8,84  | -12,21 | -10,11 |
| 15    | 109,90                     | 7,09                  | 6,70  | 6,70  | 3,77  | 3,84  | -2,28 | -9,94  | -14,34 | -12,28 |
| 16    | 119,90                     | 7,89                  | 7,43  | 7,49  | 4,19  | 4,31  | -3,30 | -10,07 | -16,54 | -14,47 |
| 17    | 129,90                     | 8,64                  | 8,13  | 8,22  | 4,51  | 4,74  | -3,37 | -11,09 | -18,69 | -16,67 |
| 18    | 139,85                     | 9,49                  | 8,94  | 9,06  | 4,96  | 5,21  | -4,45 | -12,11 | -20,85 | -18,89 |
| 19    | 149,60                     | 10,40                 | 9,84  | 9,95  | 5,43  | 5,77  | -5,57 | -13,13 | -23,03 | -21,07 |

Nota: Os relógios comparadores Pto 6 e Pto 7 referencial externo a viga  
 Os relógios comparadores Pto 8 e Pto 9 tem a viga como referencial  
 Sinais ver Figura do posicionamento dos relógios comparadores



MODELO - VIGA IV

RESULTADOS DOS ENSAIOS

. ENSAIO 2

- DEFORMAÇÕES

EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA

.UNIAXIAIS

.ROSETAS

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 1

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                     |
| 10.43         | 9.41          | +52.                   | +54.                   | +55.                   | +44.                   | +38.                   | -67.                   | -66.                   | -68.                   | -54.                   | -48.                    |
| 20.63         | 19.16         | +105.                  | +108.                  | +111.                  | +87.                   | +76.                   | -136.                  | -133.                  | -136.                  | -109.                  | -99.                    |
| 30.83         | 29.15         | +159.                  | +163.                  | +167.                  | +131.                  | +115.                  | -206.                  | -200.                  | -205.                  | -164.                  | -150.                   |
| 0.59          | 0.00          | +9.                    | +8.                    | +7.                    | +7.                    | +7.                    | -3.                    | -4.                    | -6.                    | -4.                    | -3.                     |
| 10.55         | 9.64          | +58.                   | +59.                   | +60.                   | +47.                   | +42.                   | -70.                   | -69.                   | -72.                   | -57.                   | -51.                    |
| 20.63         | 19.40         | +109.                  | +111.                  | +114.                  | +89.                   | +78.                   | -137.                  | -134.                  | -138.                  | -110.                  | -100.                   |
| 30.83         | 29.15         | +160.                  | +163.                  | +169.                  | +132.                  | +115.                  | -206.                  | -200.                  | -205.                  | -164.                  | -150.                   |
| 41.27         | 38.79         | +212.                  | +216.                  | +224.                  | +175.                  | +153.                  | -274.                  | -267.                  | -274.                  | -218.                  | -200.                   |
| 51.35         | 48.55         | +264.                  | +270.                  | +279.                  | +218.                  | +191.                  | -342.                  | -333.                  | -343.                  | -272.                  | -250.                   |
| 61.43         | 58.54         | +316.                  | +324.                  | +336.                  | +263.                  | +229.                  | -409.                  | -400.                  | -414.                  | -328.                  | -301.                   |
| 71.75         | 68.06         | +369.                  | +377.                  | +392.                  | +307.                  | +268.                  | -475.                  | -467.                  | -484.                  | -383.                  | -351.                   |
| 82.30         | 77.58         | +421.                  | +431.                  | +448.                  | +352.                  | +307.                  | -539.                  | -533.                  | -557.                  | -440.                  | -401.                   |
| 91.68         | 88.04         | +476.                  | +489.                  | +510.                  | +400.                  | +349.                  | -607.                  | -603.                  | -630.                  | -497.                  | -453.                   |
| 102.34        | 97.44         | +533.                  | +548.                  | +571.                  | +450.                  | +391.                  | -673.                  | -672.                  | -707.                  | -555.                  | -502.                   |
| 111.84        | 107.67        | +592.                  | +610.                  | +635.                  | +500.                  | +436.                  | -739.                  | -744.                  | -788.                  | -615.                  | -553.                   |
| 121.92        | 118.00        | +662.                  | +680.                  | +707.                  | +557.                  | +485.                  | -805.                  | -822.                  | -884.                  | -683.                  | -606.                   |
| 132.36        | 127.41        | +726.                  | +746.                  | +778.                  | +611.                  | +532.                  | -862.                  | -896.                  | -982.                  | -752.                  | -656.                   |
| 142.32        | 137.40        | +793.                  | +816.                  | +853.                  | +666.                  | +581.                  | -907.                  | -975.                  | -1099.                 | -832.                  | -707.                   |
| 153.11        | 146.46        | +855.                  | +887.                  | +935.                  | +716.                  | +632.                  | -918.                  | -1045.                 | -1269.                 | -936.                  | -754.                   |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECao 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>(μE) | 2<br>(μE) | 3<br>(μE) | 4<br>(μE) | 5<br>(μE) | 6<br>(μE) | 7<br>(μE) | 8<br>(μE) | 9<br>(μE) | 10<br>(μE) |
|------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.       | +0.       | +0.       | +0.       | +1.       | +1.       | +1.       | +0.       | +1.       | +1.        |
| 10.43                  | 9.41                   | +52.      | +54.      | +55.      | +44.      | +38.      | -67.      | -66.      | -68.      | -54.      | -48.       |
| 20.63                  | 19.16                  | +105.     | +108.     | +111.     | +87.      | +76.      | -136.     | -133.     | -136.     | -109.     | -99.       |
| 30.83                  | 29.15                  | +159.     | +163.     | +167.     | +131.     | +115.     | -206.     | -200.     | -205.     | -164.     | -150.      |
| 0.59                   | 0.00                   | +9.       | +8.       | +7.       | +7.       | +7.       | -3.       | -4.       | -6.       | -4.       | -3.        |
| 10.55                  | 9.64                   | +58.      | +59.      | +60.      | +47.      | +42.      | -70.      | -69.      | -72.      | -57.      | -51.       |
| 20.63                  | 19.40                  | +109.     | +111.     | +114.     | +89.      | +78.      | -137.     | -134.     | -138.     | -110.     | -100.      |
| 30.83                  | 29.15                  | +160.     | +163.     | +169.     | +132.     | +115.     | -206.     | -200.     | -205.     | -164.     | -150.      |
| 41.27                  | 38.79                  | +212.     | +216.     | +224.     | +175.     | +153.     | -274.     | -267.     | -274.     | -218.     | -200.      |
| 51.35                  | 48.55                  | +264.     | +270.     | +279.     | +218.     | +191.     | -342.     | -333.     | -343.     | -272.     | -250.      |
| 61.43                  | 58.54                  | +316.     | +324.     | +336.     | +263.     | +229.     | -409.     | -400.     | -414.     | -328.     | -301.      |
| 71.75                  | 68.06                  | +369.     | +377.     | +392.     | +307.     | +268.     | -475.     | -467.     | -484.     | -383.     | -351.      |
| 82.30                  | 77.58                  | +421.     | +431.     | +448.     | +352.     | +307.     | -539.     | -533.     | -557.     | -440.     | -401.      |
| 91.68                  | 88.04                  | +476.     | +489.     | +510.     | +400.     | +349.     | -607.     | -603.     | -630.     | -497.     | -453.      |
| 102.34                 | 97.44                  | +533.     | +548.     | +571.     | +450.     | +391.     | -673.     | -672.     | -707.     | -555.     | -502.      |
| 111.84                 | 107.67                 | +592.     | +610.     | +635.     | +500.     | +436.     | -739.     | -744.     | -788.     | -615.     | -553.      |
| 121.92                 | 118.00                 | +662.     | +680.     | +707.     | +557.     | +485.     | -805.     | -822.     | -884.     | -683.     | -606.      |
| 132.36                 | 127.41                 | +726.     | +746.     | +778.     | +611.     | +532.     | -862.     | -896.     | -982.     | -752.     | -656.      |
| 142.32                 | 137.40                 | +793.     | +816.     | +853.     | +666.     | +581.     | -907.     | -975.     | -1099.    | -832.     | -707.      |
| 153.11                 | 146.46                 | +855.     | +887.     | +935.     | +716.     | +632.     | -918.     | -1045.    | -1269.    | -936.     | -754.      |
| 0.94                   | 0.23                   | +104.     | +92.      | +81.      | +86.      | +68.      | -31.      | -46.      | -118.     | -69.      | -38.       |



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAD 2

| $F_1$<br>(kN) | $F_{\bar{1}}$<br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|---------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00          | 0.00                  | +1.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                     |
| 10.43         | 9.41                  | +26.                   | +27.                   | +38.                   | +12.                   | +19.                   | -34.                   | -36.                   | -39.                   | -31.                   | -28.                    |
| 20.63         | 19.16                 | +53.                   | +56.                   | +77.                   | +22.                   | +38.                   | -72.                   | -74.                   | -77.                   | -61.                   | -58.                    |
| 30.83         | 29.15                 | +80.                   | +84.                   | +116.                  | +33.                   | +58.                   | -111.                  | -112.                  | -115.                  | -93.                   | -87.                    |
| 0.59          | 0.00                  | +8.                    | +7.                    | +7.                    | +7.                    | +4.                    | -3.                    | -3.                    | -3.                    | -3.                    | -2.                     |
| 10.55         | 9.64                  | +32.                   | +32.                   | +44.                   | +16.                   | +20.                   | -37.                   | -40.                   | -42.                   | -33.                   | -31.                    |
| 20.63         | 19.40                 | +56.                   | +57.                   | +80.                   | +24.                   | +38.                   | -74.                   | -76.                   | -79.                   | -63.                   | -59.                    |
| 30.83         | 29.15                 | +80.                   | +84.                   | +116.                  | +33.                   | +57.                   | -112.                  | -113.                  | -116.                  | -94.                   | -88.                    |
| 41.27         | 38.79                 | +105.                  | +111.                  | +153.                  | +42.                   | +76.                   | -150.                  | -151.                  | -154.                  | -125.                  | -118.                   |
| 51.35         | 48.55                 | +131.                  | +138.                  | +190.                  | +51.                   | +96.                   | -188.                  | -188.                  | -192.                  | -156.                  | -148.                   |
| 61.43         | 58.54                 | +157.                  | +166.                  | +228.                  | +60.                   | +115.                  | -227.                  | -226.                  | -230.                  | -189.                  | -179.                   |
| 71.75         | 68.06                 | +182.                  | +195.                  | +267.                  | +70.                   | +135.                  | -265.                  | -263.                  | -268.                  | -221.                  | -209.                   |
| 82.30         | 77.58                 | +208.                  | +224.                  | +305.                  | +78.                   | +155.                  | -302.                  | -300.                  | -307.                  | -253.                  | -240.                   |
| 91.68         | 88.04                 | +237.                  | +257.                  | +350.                  | +91.                   | +181.                  | -348.                  | -341.                  | -346.                  | -287.                  | -274.                   |
| 102.34        | 97.44                 | +268.                  | +291.                  | +393.                  | +102.                  | +206.                  | -392.                  | -380.                  | -381.                  | -319.                  | -305.                   |
| 111.84        | 107.67                | +302.                  | +328.                  | +440.                  | +118.                  | +234.                  | -440.                  | -423.                  | -421.                  | -355.                  | -338.                   |
| 121.92        | 118.00                | +347.                  | +373.                  | +495.                  | +137.                  | +263.                  | -490.                  | -470.                  | -469.                  | -394.                  | -369.                   |
| 132.36        | 127.41                | +385.                  | +416.                  | +551.                  | +151.                  | +291.                  | -535.                  | -515.                  | -515.                  | -432.                  | -396.                   |
| 142.32        | 137.40                | +426.                  | +462.                  | +615.                  | +165.                  | +321.                  | -581.                  | -563.                  | -568.                  | -477.                  | -425.                   |
| 153.11        | 146.46                | +457.                  | +507.                  | +685.                  | +168.                  | +354.                  | -625.                  | -611.                  | -620.                  | -525.                  | -448.                   |
| 0.94          | 0.23                  | +122.                  | +92.                   | +97.                   | +70.                   | +52.                   | -58.                   | -54.                   | -56.                   | -49.                   | -12.                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV      ENSAIO No.2      DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 3

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>(μE) | 2<br>(μE) | 3<br>(μE) | 4<br>(μE) | 5<br>(μE) | 6<br>(μE) |
|------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.       | +0.       | +0.       | +1.       | +1.       | +1.       |
| 10.43                  | 9.41                   | +19.      | +27.      | +11.      | -35.      | -37.      | -29.      |
| 20.63                  | 19.16                  | +42.      | +54.      | +22.      | -71.      | -71.      | -58.      |
| 30.83                  | 29.15                  | +63.      | +81.      | +33.      | -108.     | -107.     | -87.      |
| 0.59                   | 0.00                   | +7.       | +8.       | +5.       | -4.       | -5.       | -2.       |
| 10.55                  | 9.64                   | +24.      | +32.      | +13.      | -37.      | -39.      | -30.      |
| 20.63                  | 19.40                  | +44.      | +57.      | +23.      | -73.      | -73.      | -58.      |
| 30.83                  | 29.15                  | +63.      | +82.      | +33.      | -109.     | -107.     | -88.      |
| 41.27                  | 38.79                  | +84.      | +108.     | +44.      | -145.     | -142.     | -117.     |
| 51.35                  | 48.55                  | +104.     | +135.     | +53.      | -181.     | -177.     | -147.     |
| 61.43                  | 58.54                  | +124.     | +162.     | +62.      | -217.     | -212.     | -177.     |
| 71.75                  | 68.06                  | +146.     | +190.     | +71.      | -253.     | -248.     | -207.     |
| 82.30                  | 77.58                  | +166.     | +218.     | +80.      | -290.     | -285.     | -238.     |
| 91.68                  | 88.04                  | +186.     | +249.     | +90.      | -328.     | -322.     | -268.     |
| 102.34                 | 97.44                  | +210.     | +280.     | +102.     | -366.     | -364.     | -300.     |
| 111.84                 | 107.67                 | +233.     | +313.     | +116.     | -406.     | -408.     | -332.     |
| 121.92                 | 118.00                 | +266.     | +352.     | +140.     | -450.     | -460.     | -369.     |
| 132.36                 | 127.41                 | +291.     | +391.     | +154.     | -494.     | -512.     | -403.     |
| 142.32                 | 137.40                 | +313.     | +432.     | +166.     | -538.     | -565.     | -437.     |
| 153.11                 | 146.46                 | +321.     | +474.     | +166.     | -583.     | -621.     | -474.     |
| 0.94                   | 0.23                   | +87.      | +83.      | +77.      | -49.      | -60.      | -35.      |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 4

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) | 7<br>( $\mu\epsilon$ ) | 8<br>( $\mu\epsilon$ ) | 9<br>( $\mu\epsilon$ ) | 10<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                     |
| 10.43                  | 9.41                   | +3.                    | +12.                   | +23.                   | +7.                    | +6.                    | -24.                   | -26.                   | -32.                   | -27.                   | -20.                    |
| 20.63                  | 19.16                  | +7.                    | +24.                   | +45.                   | +14.                   | +11.                   | -55.                   | -53.                   | -58.                   | -52.                   | -42.                    |
| 30.83                  | 29.15                  | +12.                   | +36.                   | +65.                   | +20.                   | +16.                   | -85.                   | -81.                   | -85.                   | -77.                   | -63.                    |
| 0.59                   | 0.00                   | +7.                    | +7.                    | +7.                    | +6.                    | +7.                    | -2.                    | -3.                    | -4.                    | -3.                    | -2.                     |
| 10.55                  | 9.64                   | +7.                    | +17.                   | +29.                   | +10.                   | +8.                    | -26.                   | -28.                   | -33.                   | -28.                   | -21.                    |
| 20.63                  | 19.40                  | +9.                    | +26.                   | +46.                   | +15.                   | +12.                   | -56.                   | -54.                   | -59.                   | -53.                   | -43.                    |
| 30.83                  | 29.15                  | +12.                   | +36.                   | +66.                   | +20.                   | +16.                   | -86.                   | -81.                   | -85.                   | -78.                   | -64.                    |
| 41.27                  | 38.79                  | +16.                   | +47.                   | +86.                   | +26.                   | +20.                   | -117.                  | -109.                  | -111.                  | -103.                  | -85.                    |
| 51.35                  | 48.55                  | +20.                   | +58.                   | +107.                  | +33.                   | +25.                   | -148.                  | -137.                  | -137.                  | -128.                  | -107.                   |
| 61.43                  | 58.54                  | +21.                   | +69.                   | +128.                  | +39.                   | +29.                   | -179.                  | -165.                  | -163.                  | -153.                  | -129.                   |
| 71.75                  | 68.06                  | +25.                   | +81.                   | +150.                  | +46.                   | +33.                   | -211.                  | -194.                  | -190.                  | -179.                  | -151.                   |
| 82.30                  | 77.58                  | +27.                   | +92.                   | +174.                  | +54.                   | +36.                   | -242.                  | -222.                  | -218.                  | -205.                  | -172.                   |
| 91.68                  | 88.04                  | +25.                   | +108.                  | +210.                  | +66.                   | +39.                   | -275.                  | -252.                  | -246.                  | -232.                  | -195.                   |
| 102.34                 | 97.44                  | +31.                   | +123.                  | +239.                  | +77.                   | +46.                   | -306.                  | -281.                  | -277.                  | -261.                  | -217.                   |
| 111.84                 | 107.67                 | +37.                   | +141.                  | +268.                  | +91.                   | +54.                   | -337.                  | -313.                  | -310.                  | -292.                  | -241.                   |
| 121.92                 | 118.00                 | +56.                   | +166.                  | +305.                  | +111.                  | +69.                   | -372.                  | -348.                  | -349.                  | -327.                  | -268.                   |
| 132.36                 | 127.41                 | +59.                   | +188.                  | +351.                  | +132.                  | +75.                   | -408.                  | -382.                  | -385.                  | -360.                  | -294.                   |
| 142.32                 | 137.40                 | +57.                   | +213.                  | +408.                  | +154.                  | +80.                   | -448.                  | -416.                  | -417.                  | -391.                  | -321.                   |
| 153.11                 | 146.46                 | +28.                   | +238.                  | +496.                  | +178.                  | +72.                   | -497.                  | -450.                  | -443.                  | -417.                  | -344.                   |
| 0.94                   | 0.23                   | +75.                   | +75.                   | +83.                   | +74.                   | +65.                   | -41.                   | -52.                   | -72.                   | -57.                   | -17.                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 SECAO 5

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | +1.                    | +0.                    |
| 10.43         | 9.41          | +7.                    | +10.                   | +8.                    | -27.                   | -32.                   | -21.                   |
| 20.63         | 19.16         | +12.                   | +21.                   | +17.                   | -56.                   | -61.                   | -42.                   |
| 30.83         | 29.15         | +18.                   | +33.                   | +25.                   | -85.                   | -90.                   | -62.                   |
| 0.59          | 0.00          | +5.                    | +5.                    | +5.                    | -2.                    | -3.                    | +0.                    |
| 10.55         | 9.64          | +9.                    | +13.                   | +11.                   | -30.                   | -35.                   | -22.                   |
| 20.63         | 19.40         | +13.                   | +22.                   | +17.                   | -58.                   | -63.                   | -43.                   |
| 30.83         | 29.15         | +18.                   | +33.                   | +23.                   | -86.                   | -90.                   | -63.                   |
| 41.27         | 38.79         | +21.                   | +43.                   | +31.                   | -114.                  | -118.                  | -84.                   |
| 51.35         | 48.55         | +28.                   | +55.                   | +38.                   | -143.                  | -146.                  | -103.                  |
| 61.43         | 58.54         | +34.                   | +66.                   | +46.                   | -173.                  | -174.                  | -123.                  |
| 71.75         | 68.06         | +39.                   | +78.                   | +54.                   | -201.                  | -201.                  | -142.                  |
| 82.30         | 77.58         | +45.                   | +90.                   | +62.                   | -229.                  | -227.                  | -161.                  |
| 91.68         | 88.04         | +53.                   | +108.                  | +73.                   | -261.                  | -253.                  | -180.                  |
| 102.34        | 97.44         | +62.                   | +125.                  | +84.                   | -292.                  | -276.                  | -198.                  |
| 111.84        | 107.67        | +73.                   | +145.                  | +100.                  | -325.                  | -302.                  | -218.                  |
| 121.92        | 118.00        | +91.                   | +172.                  | +124.                  | -364.                  | -334.                  | -241.                  |
| 132.36        | 127.41        | +102.                  | +195.                  | +143.                  | -399.                  | -361.                  | -260.                  |
| 142.32        | 137.40        | +112.                  | +222.                  | +161.                  | -437.                  | -392.                  | -281.                  |
| 153.11        | 146.46        | +110.                  | +247.                  | +170.                  | -474.                  | -411.                  | -299.                  |
| 0.94          | 0.23          | +88.                   | +83.                   | +96.                   | -48.                   | -48.                   | +5.                    |

---

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

---

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
VIGA IV            ENSAIO No.2            DATA: 27/03/91  
DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
SECAD 6

---

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                    | +1.                    | +0.                    |
| 10.43         | 9.41          | +53.                   | +52.                   | +53.                   |
| 20.63         | 19.16         | +108.                  | +104.                  | +106.                  |
| 30.83         | 29.15         | +163.                  | +157.                  | +160.                  |
| 0.59          | 0.00          | +8.                    | +8.                    | +6.                    |
| 10.55         | 9.64          | +58.                   | +57.                   | +57.                   |
| 20.63         | 19.40         | +110.                  | +106.                  | +108.                  |
| 30.83         | 29.15         | +162.                  | +157.                  | +161.                  |
| 41.27         | 38.79         | +215.                  | +209.                  | +214.                  |
| 51.35         | 48.55         | +271.                  | +261.                  | +267.                  |
| 61.43         | 58.54         | +328.                  | +315.                  | +321.                  |
| 71.75         | 68.06         | +386.                  | +369.                  | +375.                  |
| 82.30         | 77.58         | +445.                  | +423.                  | +430.                  |
| 91.68         | 88.04         | +507.                  | +483.                  | +490.                  |
| 102.34        | 97.44         | +569.                  | +541.                  | +549.                  |
| 111.84        | 107.67        | +636.                  | +604.                  | +611.                  |
| 121.92        | 118.00        | +712.                  | +675.                  | +681.                  |
| 132.36        | 127.41        | +782.                  | +744.                  | +750.                  |
| 142.32        | 137.40        | +855.                  | +815.                  | +824.                  |
| 153.11        | 146.46        | +922.                  | +890.                  | +905.                  |
| 0.94          | 0.23          | +113.                  | +95.                   | +74.                   |

---

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
VIGA IV      ENSAIO No.2      DATA: 27/03/91  
DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
SECAD 7

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    |
| 10.43                  | 9.41                   | +53.                   | +52.                   | +55.                   |
| 20.63                  | 19.16                  | +106.                  | +105.                  | +111.                  |
| 30.83                  | 29.15                  | +160.                  | +158.                  | +166.                  |
| 0.59                   | 0.00                   | +9.                    | +8.                    | +7.                    |
| 10.55                  | 9.64                   | +58.                   | +56.                   | +60.                   |
| 20.63                  | 19.40                  | +109.                  | +107.                  | +113.                  |
| 30.83                  | 29.15                  | +160.                  | +159.                  | +166.                  |
| 41.27                  | 38.79                  | +213.                  | +211.                  | +222.                  |
| 51.35                  | 48.55                  | +265.                  | +264.                  | +276.                  |
| 61.43                  | 58.54                  | +318.                  | +316.                  | +332.                  |
| 71.75                  | 68.06                  | +371.                  | +370.                  | +387.                  |
| 82.30                  | 77.58                  | +424.                  | +424.                  | +444.                  |
| 91.68                  | 88.04                  | +480.                  | +481.                  | +506.                  |
| 102.34                 | 97.44                  | +537.                  | +539.                  | +566.                  |
| 111.84                 | 107.67                 | +599.                  | +600.                  | +631.                  |
| 121.92                 | 118.00                 | +668.                  | +669.                  | +702.                  |
| 132.36                 | 127.41                 | +733.                  | +733.                  | +773.                  |
| 142.32                 | 137.40                 | +800.                  | +802.                  | +849.                  |
| 153.11                 | 146.46                 | +862.                  | +870.                  | +933.                  |
| 0.94                   | 0.23                   | +104.                  | +88.                   | +80.                   |

---

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

---

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
VIGA IV            ENSAIO No.2            DATA: 27/03/91  
DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
SECAO 8

---

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|---------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                    | +0.                    | +1.                    |
| 10.43         | 9.41          | +51.                   | +52.                   | +56.                   |
| 20.63         | 19.16         | +103.                  | +106.                  | +113.                  |
| 30.83         | 29.15         | +155.                  | +159.                  | +168.                  |
| 0.59          | 0.00          | +8.                    | +8.                    | +8.                    |
| 10.55         | 9.64          | +56.                   | +58.                   | +61.                   |
| 20.63         | 19.40         | +105.                  | +108.                  | +115.                  |
| 30.83         | 29.15         | +155.                  | +160.                  | +168.                  |
| 41.27         | 38.79         | +206.                  | +211.                  | +225.                  |
| 51.35         | 48.55         | +257.                  | +264.                  | +280.                  |
| 61.43         | 58.54         | +309.                  | +318.                  | +338.                  |
| 71.75         | 68.06         | +362.                  | +373.                  | +396.                  |
| 82.30         | 77.58         | +419.                  | +428.                  | +454.                  |
| 91.68         | 88.04         | +480.                  | +490.                  | +520.                  |
| 102.34        | 97.44         | +543.                  | +550.                  | +585.                  |
| 111.84        | 107.67        | +609.                  | +615.                  | +652.                  |
| 121.92        | 118.00        | +686.                  | +687.                  | +727.                  |
| 132.36        | 127.41        | +756.                  | +757.                  | +801.                  |
| 142.32        | 137.40        | +829.                  | +831.                  | +880.                  |
| 153.11        | 146.46        | +897.                  | +906.                  | +966.                  |
| 0.94          | 0.23          | +111.                  | +95.                   | +85.                   |

---

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 MONTANTE 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    | +0.                    |
| 10.43                  | 9.41                   | +8.                    | -14.                   | -33.                   | +14.                   | -14.                   | -39.                   |
| 20.63                  | 19.16                  | +18.                   | -29.                   | -70.                   | +31.                   | -28.                   | -78.                   |
| 30.83                  | 29.15                  | +28.                   | -45.                   | -107.                  | +46.                   | -41.                   | -118.                  |
| 0.59                   | 0.00                   | +7.                    | +3.                    | -2.                    | +10.                   | +2.                    | -5.                    |
| 10.55                  | 9.64                   | +13.                   | -13.                   | -35.                   | +20.                   | -13.                   | -42.                   |
| 20.63                  | 19.40                  | +20.                   | -29.                   | -71.                   | +33.                   | -27.                   | -80.                   |
| 30.83                  | 29.15                  | +29.                   | -45.                   | -108.                  | +46.                   | -41.                   | -119.                  |
| 41.27                  | 38.79                  | +38.                   | -60.                   | -146.                  | +61.                   | -56.                   | -158.                  |
| 51.35                  | 48.55                  | +48.                   | -76.                   | -184.                  | +77.                   | -69.                   | -198.                  |
| 61.43                  | 58.54                  | +60.                   | -93.                   | -224.                  | +92.                   | -83.                   | -237.                  |
| 71.75                  | 68.06                  | +71.                   | -109.                  | -263.                  | +107.                  | -97.                   | -277.                  |
| 82.30                  | 77.58                  | +83.                   | -124.                  | -303.                  | +123.                  | -110.                  | -316.                  |
| 91.68                  | 88.04                  | +99.                   | -142.                  | -350.                  | +163.                  | -119.                  | -369.                  |
| 102.34                 | 97.44                  | +115.                  | -158.                  | -393.                  | +183.                  | -130.                  | -408.                  |
| 111.84                 | 107.67                 | +132.                  | -173.                  | -436.                  | +203.                  | -140.                  | -446.                  |
| 121.92                 | 118.00                 | +165.                  | -184.                  | -486.                  | +230.                  | -151.                  | -489.                  |
| 132.36                 | 127.41                 | +177.                  | -197.                  | -520.                  | +253.                  | -159.                  | -524.                  |
| 142.32                 | 137.40                 | +189.                  | -211.                  | -555.                  | +279.                  | -165.                  | -558.                  |
| 153.11                 | 146.46                 | +201.                  | -227.                  | -594.                  | +312.                  | -169.                  | -592.                  |
| 0.94                   | 0.23                   | +64.                   | +29.                   | -4.                    | +93.                   | +30.                   | -24.                   |



UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 MONTANTE 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | 1<br>( $\mu\epsilon$ ) | 2<br>( $\mu\epsilon$ ) | 3<br>( $\mu\epsilon$ ) | 4<br>( $\mu\epsilon$ ) | 5<br>( $\mu\epsilon$ ) | 6<br>( $\mu\epsilon$ ) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +1.                    | +0.                    | +1.                    | +1.                    | +0.                    | +0.                    |
| 10.43                  | 9.41                   | -34.                   | -13.                   | +13.                   | -35.                   | -16.                   | +4.                    |
| 20.63                  | 19.16                  | -71.                   | -28.                   | +23.                   | -70.                   | -31.                   | +8.                    |
| 30.83                  | 29.15                  | -107.                  | -43.                   | +33.                   | -103.                  | -45.                   | +13.                   |
| 0.59                   | 0.00                   | -1.                    | +2.                    | +6.                    | +2.                    | +3.                    | +4.                    |
| 10.55                  | 9.64                   | -35.                   | -12.                   | +15.                   | -34.                   | -14.                   | +6.                    |
| 20.63                  | 19.40                  | -72.                   | -28.                   | +23.                   | -69.                   | -30.                   | +9.                    |
| 30.83                  | 29.15                  | -107.                  | -44.                   | +32.                   | -103.                  | -45.                   | +13.                   |
| 41.27                  | 38.79                  | -143.                  | -59.                   | +39.                   | -137.                  | -59.                   | +17.                   |
| 51.35                  | 48.55                  | -179.                  | -75.                   | +46.                   | -171.                  | -73.                   | +22.                   |
| 61.43                  | 58.54                  | -215.                  | -91.                   | +55.                   | -204.                  | -87.                   | +27.                   |
| 71.75                  | 68.06                  | -253.                  | -108.                  | +62.                   | -238.                  | -101.                  | +32.                   |
| 82.30                  | 77.58                  | -290.                  | -124.                  | +71.                   | -271.                  | -115.                  | +38.                   |
| 91.68                  | 88.04                  | -326.                  | -140.                  | +77.                   | -294.                  | -124.                  | +42.                   |
| 102.34                 | 97.44                  | -363.                  | -155.                  | +87.                   | -323.                  | -136.                  | +48.                   |
| 111.84                 | 107.67                 | -404.                  | -171.                  | +102.                  | -352.                  | -147.                  | +56.                   |
| 121.92                 | 118.00                 | -441.                  | -183.                  | +119.                  | -380.                  | -156.                  | +65.                   |
| 132.36                 | 127.41                 | -489.                  | -198.                  | +143.                  | -410.                  | -164.                  | +79.                   |
| 142.32                 | 137.40                 | -542.                  | -214.                  | +168.                  | -439.                  | -170.                  | +96.                   |
| 153.11                 | 146.46                 | -596.                  | -232.                  | +191.                  | -465.                  | -173.                  | +117.                  |
| 0.94                   | 0.23                   | -21.                   | +19.                   | +69.                   | +53.                   | +37.                   | +27.                   |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 TIRANTE 1

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | S1.1<br>(µε) | S1.2<br>(µε) | S2.1<br>(µε) | S2.2<br>(µε) | S3.1<br>(µε) | S3.2<br>(µε) |
|------------------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.00                   | 0.00                   | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          | +0.          | -1.          |
| 10.43                  | 9.41                   | +62.         | +71.         | +67.         | +61.         | +68.         | +68.         |
| 20.63                  | 19.16                  | +126.        | +144.        | +135.        | +126.        | +141.        | +137.        |
| 30.83                  | 29.15                  | +191.        | +216.        | +204.        | +191.        | +216.        | +204.        |
| 0.59                   | 0.00                   | -5.          | -6.          | -5.          | -6.          | -12.         | +6.          |
| 10.55                  | 9.64                   | +57.         | +70.         | +65.         | +59.         | +61.         | +69.         |
| 20.63                  | 19.40                  | +123.        | +143.        | +134.        | +125.        | +138.        | +137.        |
| 30.83                  | 29.15                  | +190.        | +217.        | +204.        | +191.        | +214.        | +205.        |
| 41.27                  | 38.79                  | +256.        | +290.        | +271.        | +256.        | +288.        | +274.        |
| 51.35                  | 48.55                  | +323.        | +360.        | +339.        | +321.        | +361.        | +343.        |
| 61.43                  | 58.54                  | +388.        | +430.        | +405.        | +386.        | +433.        | +412.        |
| 71.75                  | 68.06                  | +454.        | +500.        | +472.        | +450.        | +506.        | +480.        |
| 82.30                  | 77.58                  | +520.        | +568.        | +538.        | +514.        | +576.        | +548.        |
| 91.68                  | 88.04                  | +589.        | +649.        | +606.        | +579.        | +646.        | +616.        |
| 102.34                 | 97.44                  | +649.        | +709.        | +665.        | +637.        | +711.        | +678.        |
| 111.84                 | 107.67                 | +702.        | +763.        | +719.        | +689.        | +768.        | +734.        |
| 121.92                 | 118.00                 | +731.        | +794.        | +753.        | +722.        | +808.        | +774.        |
| 132.36                 | 127.41                 | +776.        | +841.        | +797.        | +765.        | +853.        | +819.        |
| 142.32                 | 137.40                 | +816.        | +883.        | +835.        | +803.        | +894.        | +859.        |
| 153.11                 | 146.46                 | +853.        | +922.        | +871.        | +838.        | +932.        | +898.        |
| 0.94                   | 0.23                   | -138.        | -114.        | -126.        | -121.        | -137.        | -138.        |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS UNIAXIAIS  
 TIRANTE 2

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | S1.1<br>(µE) | S1.2<br>(µE) | S2.1<br>(µE) | S2.2<br>(µE) | S3.1<br>(µE) | S3.2<br>(µE) |
|------------------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.00                   | 0.00                   | -1.          | +0.          | -1.          | +0.          | -1.          | +0.          |
| 10.43                  | 9.41                   | +72.         | +70.         | +71.         | +65.         | +77.         | +64.         |
| 20.63                  | 19.16                  | +141.        | +136.        | +138.        | +128.        | +152.        | +122.        |
| 30.83                  | 29.15                  | +210.        | +203.        | +204.        | +193.        | +232.        | +177.        |
| 0.59                   | 0.00                   | -4.          | -7.          | -5.          | -7.          | -24.         | +7.          |
| 10.55                  | 9.64                   | +69.         | +63.         | +66.         | +60.         | +68.         | +62.         |
| 20.63                  | 19.40                  | +139.        | +132.        | +135.        | +125.        | +149.        | +119.        |
| 30.83                  | 29.15                  | +211.        | +202.        | +204.        | +192.        | +231.        | +176.        |
| 41.27                  | 38.79                  | +281.        | +271.        | +271.        | +257.        | +310.        | +234.        |
| 51.35                  | 48.55                  | +349.        | +340.        | +337.        | +322.        | +388.        | +292.        |
| 61.43                  | 58.54                  | +418.        | +410.        | +403.        | +388.        | +464.        | +351.        |
| 71.75                  | 68.06                  | +487.        | +479.        | +469.        | +454.        | +539.        | +413.        |
| 82.30                  | 77.58                  | +555.        | +550.        | +535.        | +519.        | +616.        | +473.        |
| 91.68                  | 88.04                  | +596.        | +603.        | +583.        | +568.        | +675.        | +520.        |
| 102.34                 | 97.44                  | +659.        | +665.        | +643.        | +627.        | +742.        | +575.        |
| 111.84                 | 107.67                 | +716.        | +721.        | +696.        | +681.        | +801.        | +625.        |
| 121.92                 | 118.00                 | +773.        | +776.        | +746.        | +730.        | +850.        | +670.        |
| 132.36                 | 127.41                 | +819.        | +822.        | +792.        | +776.        | +902.        | +713.        |
| 142.32                 | 137.40                 | +861.        | +865.        | +835.        | +820.        | +949.        | +754.        |
| 153.11                 | 146.46                 | +903.        | +907.        | +879.        | +862.        | +996.        | +794.        |
| 0.94                   | 0.23                   | -152.        | -150.        | -140.        | -138.        | -125.        | -164.        |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 1

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +1.                               | +0.                               | +0.                               | +1.                               | -0.                               | +0.2                | +0.0                | U/C                      |
| 10.43         | 9.41          | -2.                               | +24.                              | +0.                               | +24.                              | -26.                              | +3.6                | -4.2                | +46.1                    |
| 20.63         | 19.16         | -7.                               | +46.                              | +0.                               | +46.                              | -53.                              | +6.9                | -8.8                | +46.9                    |
| 30.83         | 29.15         | -10.                              | +68.                              | -2.                               | +68.                              | -81.                              | +9.9                | -13.5               | +46.6                    |
| 0.59          | 0.00          | +3.                               | +2.                               | -1.                               | +3.                               | -1.                               | +0.6                | -0.1                | U/C                      |
| 10.55         | 9.64          | -2.                               | +25.                              | +0.                               | +25.                              | -27.                              | +3.8                | -4.3                | +46.1                    |
| 20.63         | 19.40         | -7.                               | +46.                              | -1.                               | +46.                              | -54.                              | +6.8                | -9.0                | +46.6                    |
| 30.83         | 29.15         | -10.                              | +69.                              | -3.                               | +69.                              | -82.                              | +10.0               | -13.9               | +46.4                    |
| 41.27         | 38.79         | -14.                              | +91.                              | -5.                               | +91.                              | -110.                             | +13.1               | -18.6               | +46.4                    |
| 51.35         | 48.55         | -19.                              | +114.                             | -8.                               | +114.                             | -140.                             | +16.1               | -23.9               | +46.3                    |
| 61.43         | 58.54         | -23.                              | +135.                             | -11.                              | +135.                             | -169.                             | +19.0               | -29.0               | +46.1                    |
| 71.75         | 68.06         | -26.                              | +159.                             | -15.                              | +159.                             | -200.                             | +22.3               | -34.2               | +45.8                    |
| 82.30         | 77.58         | -29.                              | +183.                             | -19.                              | +183.                             | -231.                             | +25.5               | -39.7               | +45.7                    |
| 91.68         | 88.04         | -31.                              | +206.                             | -26.                              | +206.                             | -263.                             | +28.7               | -45.3               | +45.3                    |
| 102.34        | 97.44         | -34.                              | +234.                             | -31.                              | +234.                             | -299.                             | +32.4               | -51.6               | +45.2                    |
| 111.84        | 107.67        | -36.                              | +263.                             | -38.                              | +263.                             | -337.                             | +36.5               | -58.1               | +44.9                    |
| 121.92        | 118.00        | -38.                              | +299.                             | -48.                              | +299.                             | -385.                             | +41.3               | -66.5               | +44.6                    |
| 132.36        | 127.41        | -39.                              | +335.                             | -61.                              | +335.                             | -434.                             | +46.1               | -75.2               | +44.2                    |
| 142.32        | 137.40        | -39.                              | +375.                             | -78.                              | +375.                             | -491.                             | +51.3               | -85.4               | +43.7                    |
| 153.11        | 146.46        | -39.                              | +429.                             | -105.                             | +430.                             | -573.                             | +58.0               | -100.1              | +43.1                    |
| 0.94          | 0.23          | +20.                              | +50.                              | -9.                               | +52.                              | -41.                              | +9.0                | -5.7                | +36.1                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 2

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.                               | +0.0                | +0.0                | U/C                      |
| 10.43         | 9.41          | +1.                               | +36.                              | +6.                               | +36.                              | -29.                              | +6.1                | -4.2                | +47.1                    |
| 20.63         | 19.16         | +0.                               | +67.                              | +9.                               | +67.                              | -59.                              | +11.2               | -8.7                | +46.9                    |
| 30.83         | 29.15         | -1.                               | +96.                              | +9.                               | +97.                              | -89.                              | +15.7               | -13.5               | +46.5                    |
| 0.59          | 0.00          | +5.                               | +3.                               | -3.                               | +5.                               | -3.                               | +0.9                | -0.4                | U/C                      |
| 10.55         | 9.64          | +4.                               | +36.                              | +4.                               | +36.                              | -28.                              | +6.2                | -4.0                | +45.0                    |
| 20.63         | 19.40         | +1.                               | +66.                              | +7.                               | +66.                              | -59.                              | +11.0               | -8.7                | +46.3                    |
| 30.83         | 29.15         | -1.                               | +96.                              | +9.                               | +97.                              | -89.                              | +15.7               | -13.5               | +46.5                    |
| 41.27         | 38.79         | -3.                               | +128.                             | +9.                               | +128.                             | -121.                             | +20.6               | -18.7               | +46.4                    |
| 51.35         | 48.55         | -4.                               | +158.                             | +9.                               | +158.                             | -152.                             | +25.3               | -23.7               | +46.2                    |
| 61.43         | 58.54         | -5.                               | +188.                             | +9.                               | +188.                             | -184.                             | +30.0               | -28.6               | +46.1                    |
| 71.75         | 68.06         | -6.                               | +219.                             | +9.                               | +219.                             | -215.                             | +34.7               | -33.6               | +46.0                    |
| 82.30         | 77.58         | -8.                               | +249.                             | +9.                               | +249.                             | -248.                             | +39.3               | -39.0               | +45.9                    |
| 91.68         | 88.04         | -7.                               | +279.                             | +7.                               | +279.                             | -279.                             | +44.0               | -44.0               | +45.7                    |
| 102.34        | 97.44         | -6.                               | +312.                             | +3.                               | +312.                             | -315.                             | +49.0               | -49.9               | +45.4                    |
| 111.84        | 107.67        | -4.                               | +347.                             | -2.                               | +347.                             | -353.                             | +54.4               | -56.0               | +45.1                    |
| 121.92        | 118.00        | -1.                               | +384.                             | -13.                              | +384.                             | -398.                             | +59.6               | -63.8               | +44.5                    |
| 132.36        | 127.41        | +1.                               | +420.                             | -23.                              | +420.                             | -442.                             | +64.8               | -71.2               | +44.2                    |
| 142.32        | 137.40        | +4.                               | +457.                             | -36.                              | +457.                             | -489.                             | +69.9               | -79.4               | +43.8                    |
| 153.11        | 146.46        | +5.                               | +497.                             | -59.                              | +498.                             | -552.                             | +74.8               | -90.6               | +43.3                    |
| 0.94          | 0.23          | +35.                              | +44.                              | -34.                              | +56.                              | -55.                              | +8.8                | -8.6                | +25.6                    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 3

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(μE) | ε <sub>b</sub><br>(μE) | ε <sub>c</sub><br>(μE) | ε <sub>1</sub><br>(μE) | ε <sub>2</sub><br>(μE) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +1.                    | -1.                    | +0.                    | +2.                    | -1.                    | +0.4                    | -0.1                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.41                   | -6.                    | +32.                   | +16.                   | +34.                   | -24.                   | +6.1                    | -3.1                    | +56.0    |
| 20.63                  | 19.16                  | -14.                   | +60.                   | +27.                   | +64.                   | -50.                   | +10.9                   | -7.0                    | +55.7    |
| 30.83                  | 29.15                  | -23.                   | +87.                   | +35.                   | +92.                   | -80.                   | +15.3                   | -11.7                   | +54.8    |
| 0.59                   | 0.00                   | +5.                    | +7.                    | -1.                    | +7.                    | -4.                    | +1.4                    | -0.3                    | U/C      |
| 10.55                  | 9.64                   | -4.                    | +36.                   | +15.                   | +37.                   | -26.                   | +6.7                    | -3.3                    | +53.7    |
| 20.63                  | 19.40                  | -13.                   | +61.                   | +26.                   | +65.                   | -52.                   | +11.0                   | -7.4                    | +54.7    |
| 30.83                  | 29.15                  | -23.                   | +87.                   | +35.                   | +92.                   | -80.                   | +15.3                   | -11.7                   | +54.8    |
| 41.27                  | 38.79                  | -31.                   | +114.                  | +44.                   | +120.                  | -108.                  | +19.7                   | -16.1                   | +54.6    |
| 51.35                  | 48.55                  | -40.                   | +140.                  | +52.                   | +148.                  | -135.                  | +24.1                   | -20.5                   | +54.5    |
| 61.43                  | 58.54                  | -47.                   | +166.                  | +59.                   | +175.                  | -164.                  | +28.4                   | -25.0                   | +54.1    |
| 71.75                  | 68.06                  | -56.                   | +193.                  | +65.                   | +202.                  | -193.                  | +32.6                   | -29.8                   | +53.9    |
| 82.30                  | 77.58                  | -64.                   | +219.                  | +71.                   | +229.                  | -222.                  | +36.5                   | -34.6                   | +53.7    |
| 91.68                  | 88.04                  | -71.                   | +248.                  | +75.                   | +258.                  | -255.                  | +41.0                   | -39.9                   | +53.3    |
| 102.34                 | 97.44                  | -79.                   | +277.                  | +78.                   | +288.                  | -289.                  | +45.3                   | -45.6                   | +52.9    |
| 111.84                 | 107.67                 | -85.                   | +309.                  | +80.                   | +320.                  | -325.                  | +50.2                   | -51.6                   | +52.4    |
| 121.92                 | 118.00                 | -93.                   | +342.                  | +74.                   | +352.                  | -371.                  | +54.3                   | -59.8                   | +51.7    |
| 132.36                 | 127.41                 | -99.                   | +376.                  | +68.                   | +385.                  | -417.                  | +58.7                   | -67.8                   | +51.0    |
| 142.32                 | 137.40                 | -107.                  | +410.                  | +56.                   | +417.                  | -468.                  | +62.3                   | -77.3                   | +50.3    |
| 153.11                 | 146.46                 | -118.                  | +443.                  | +29.                   | +448.                  | -537.                  | +64.7                   | -90.7                   | +49.3    |
| 0.94                   | 0.23                   | +38.                   | +71.                   | -20.                   | +77.                   | -59.                   | +13.4                   | -8.1                    | +32.5    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 4

| F <sub>1</sub><br>(kN) | F <sub>2</sub><br>(kN) | ε <sub>a</sub><br>(με) | ε <sub>b</sub><br>(με) | ε <sub>c</sub><br>(με) | ε <sub>1</sub><br>(με) | ε <sub>2</sub><br>(με) | σ <sub>1</sub><br>(MPa) | σ <sub>2</sub><br>(MPa) | θ<br>(°) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.00                   | 0.00                   | +1.                    | +0.                    | +0.                    | +1.                    | -0.                    | +0.2                    | +0.0                    | U/C      |
| 10.43                  | 9.41                   | -7.                    | +23.                   | -4.                    | +23.                   | -33.                   | +2.9                    | -5.9                    | +46.5    |
| 20.63                  | 19.16                  | -14.                   | +44.                   | -9.                    | +44.                   | -67.                   | +5.3                    | -12.2                   | +46.2    |
| 30.83                  | 29.15                  | -22.                   | +62.                   | -17.                   | +62.                   | -101.                  | +7.2                    | -18.6                   | +45.8    |
| 0.59                   | 0.00                   | +2.                    | +5.                    | +3.                    | +5.                    | -0.                    | +1.1                    | +0.3                    | U/C      |
| 10.55                  | 9.64                   | -6.                    | +25.                   | -3.                    | +25.                   | -33.                   | +3.3                    | -5.8                    | +46.4    |
| 20.63                  | 19.40                  | -14.                   | +44.                   | -9.                    | +45.                   | -68.                   | +5.4                    | -12.4                   | +46.2    |
| 30.83                  | 29.15                  | -22.                   | +63.                   | -17.                   | +63.                   | -102.                  | +7.4                    | -18.7                   | +45.8    |
| 41.27                  | 38.79                  | -30.                   | +81.                   | -26.                   | +81.                   | -138.                  | +9.0                    | -25.6                   | +45.5    |
| 51.35                  | 48.55                  | -38.                   | +100.                  | -36.                   | +100.                  | -174.                  | +10.8                   | -32.4                   | +45.2    |
| 61.43                  | 58.54                  | -46.                   | +118.                  | -47.                   | +118.                  | -212.                  | +12.3                   | -39.8                   | +44.9    |
| 71.75                  | 68.06                  | -54.                   | +135.                  | -61.                   | +135.                  | -250.                  | +13.6                   | -47.1                   | +44.5    |
| 82.30                  | 77.58                  | -62.                   | +151.                  | -75.                   | +152.                  | -289.                  | +14.6                   | -54.8                   | +44.2    |
| 91.68                  | 88.04                  | -72.                   | +166.                  | -96.                   | +166.                  | -333.                  | +14.8                   | -63.9                   | +43.6    |
| 102.34                 | 97.44                  | -80.                   | +181.                  | -117.                  | +181.                  | -379.                  | +15.2                   | -73.1                   | +43.1    |
| 111.84                 | 107.67                 | -89.                   | +195.                  | -141.                  | +196.                  | -426.                  | +15.4                   | -82.7                   | +42.6    |
| 121.92                 | 118.00                 | -95.                   | +214.                  | -165.                  | +216.                  | -475.                  | +16.5                   | -92.4                   | +42.1    |
| 132.36                 | 127.41                 | -102.                  | +226.                  | -204.                  | +230.                  | -536.                  | +15.5                   | -105.3                  | +41.2    |
| 142.32                 | 137.40                 | -110.                  | +234.                  | -260.                  | +240.                  | -610.                  | +12.9                   | -121.3                  | +39.9    |
| 153.11                 | 146.46                 | -120.                  | +230.                  | -362.                  | +245.                  | -728.                  | +6.1                    | -147.4                  | +37.8    |
| 0.94                   | 0.23                   | +13.                   | +27.                   | -15.                   | +30.                   | -32.                   | +4.6                    | -5.1                    | +31.3    |

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

ENSAIO DE VIGAS DE ACO REBITADAS  
 VIGA IV ENSAIO No.2 DATA: 27/03/91  
 DEFORMACOES DOS EXTENSOMETROS ELETRICOS DAS ROSETAS  
 ROSETA 5

| $F_1$<br>(kN) | $F_2$<br>(kN) | $\epsilon_a$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_b$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_c$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_1$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\epsilon_2$<br>( $\mu\epsilon$ ) | $\sigma_1$<br>(MPa) | $\sigma_2$<br>(MPa) | $\theta$<br>( $^\circ$ ) |
|---------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.00          | 0.00          | +1.                               | +1.                               | +0.                               | +1.                               | -0.                               | +0.2                | +0.0                | U/C                      |
| 10.43         | 9.41          | -3.                               | -27.                              | +7.                               | +32.                              | -28.                              | +5.2                | -4.1                | -49.6                    |
| 20.63         | 19.16         | -9.                               | -62.                              | +11.                              | +65.                              | -63.                              | +10.4               | -9.9                | -49.7                    |
| 30.83         | 29.15         | -16.                              | -98.                              | +14.                              | +98.                              | -100.                             | +15.3               | -15.8               | -49.4                    |
| 0.59          | 0.00          | +2.                               | -2.                               | -1.                               | +3.                               | -2.                               | +0.6                | -0.3                | U/C                      |
| 10.55         | 9.64          | -3.                               | -30.                              | +6.                               | +33.                              | -31.                              | +5.5                | -4.6                | -48.8                    |
| 20.63         | 19.40         | -9.                               | -64.                              | +9.                               | +65.                              | -65.                              | +10.3               | -10.3               | -49.2                    |
| 30.83         | 29.15         | -17.                              | -99.                              | +13.                              | +97.                              | -101.                             | +15.0               | -16.1               | -49.4                    |
| 41.27         | 38.79         | -24.                              | -135.                             | +15.                              | +128.                             | -137.                             | +19.6               | -22.1               | -49.2                    |
| 51.35         | 48.55         | -30.                              | -170.                             | +18.                              | +160.                             | -172.                             | +24.4               | -28.0               | -49.2                    |
| 61.43         | 58.54         | -38.                              | -207.                             | +19.                              | +190.                             | -209.                             | +28.7               | -34.3               | -49.1                    |
| 71.75         | 68.06         | -44.                              | -243.                             | +21.                              | +222.                             | -246.                             | +33.4               | -40.3               | -49.0                    |
| 82.30         | 77.58         | -51.                              | -279.                             | +22.                              | +252.                             | -282.                             | +37.8               | -46.4               | -48.9                    |
| 91.68         | 88.04         | -57.                              | -316.                             | +22.                              | +284.                             | -319.                             | +42.4               | -52.6               | -48.7                    |
| 102.34        | 97.44         | -60.                              | -351.                             | +21.                              | +315.                             | -354.                             | +47.0               | -58.4               | -48.5                    |
| 111.84        | 107.67        | -61.                              | -389.                             | +18.                              | +348.                             | -391.                             | +51.9               | -64.6               | -48.1                    |
| 121.92        | 118.00        | -61.                              | -429.                             | +13.                              | +382.                             | -430.                             | +57.0               | -71.1               | -47.6                    |
| 132.36        | 127.41        | -61.                              | -467.                             | +10.                              | +417.                             | -468.                             | +62.3               | -77.3               | -47.3                    |
| 142.32        | 137.40        | -61.                              | -508.                             | +6.                               | +454.                             | -509.                             | +67.8               | -84.1               | -47.0                    |
| 153.11        | 146.46        | -62.                              | -554.                             | -2.                               | +490.                             | -555.                             | +73.0               | -91.8               | -46.7                    |
| 0.94          | 0.23          | +42.                              | -9.                               | -9.                               | +52.                              | -20.                              | +10.4               | -1.0                | -22.5                    |



