

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

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS
PONTES DE EUCALIPTO CITRIODORA

JOSÉ ANTONIO MATTHIESEN

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

- São Carlos, Junho de 1987 -

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS
PONTES DE EUCALIPTO CITRIODORA

JOSÉ ANTONIO MATTHIESEN

Prof. Dr. JOÃO CESAR HELLMEISTER

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Cesar Hellmeister, pela orientação cu
dadosa ministrada durante o desenvolvimento do presente trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Madeiras e de Estrutu
ras de Madeira, pelo valioso auxílio prestado.

Aos colegas de pós-graduação pela colaboração, incentivo
e amizade.

À FAPESP e a CAPES pelo auxílio financeiro recebido.

À minha esposa Iriane e a minha filha Melina pelo cari-
nho nos momentos mais difíceis.

O autor agradece também a todos que de alguma forma cola-
boraram para a realização desse trabalho.

À Iriane
e Melina

RESUMO

Uma revisão da bibliografia especializada permitiu avaliar a elevada evolução da tecnologia da construção das pontes de madeira, nos Estados Unidos, onde existem a surpreendente soma de três mil quilômetros de pontes rodoviárias e dois mil e quatrocentos quilômetros de pontes ferroviárias de madeira.

No Brasil a tecnologia da construção das pontes de madeira está atualmente alcançando significativa evolução.

Neste trabalho foi avaliado, através de ensaio em modelos reduzidos, o comportamento de placas maciças de madeira, com vistas à sua interpretação e utilização no projeto e na construção de pontes de madeira.

A placa maciça não é viável na construção de pontes. A análise da placa maciça admitida hipoteticamente como constituída por vigas interligadas lateralmente em uma peça única, deu origem a idéia do esquema estrutural em dimensões maciças, constituído por vigas de madeira serrada, interligadas lateralmente por parafuso ou por anéis metálicos partidos. Este esquema estrutural apresentou excelentes resultados experimentais.

Mas as vigas de madeira serrada são, geralmente, curtas para utilização em pontes. Em uma nova tentativa, pensou-se na utilização de postes de Eucalipto Citriodora, solidarizadas lateralmente por anéis metálicos partidos, formando seção transversal simples ou nervurada. Os ensaios evidenciaram a viabilidade destes esquemas estruturais para pontes.

A análise final com a apresentação de um modelo matemático para o cálculo, considerando a estrutura com grelha, comprovou significativamente a eficiência deste esquema estrutural para o projeto e para a execução de pontes de madeira, constituídas por postes solidarizados lateralmente por anéis metálicos.

Neste esquema estrutural não é utilizado o tabuleiro convencional das pontes de madeira.

ABSTRACT

A review of the specialized bibliography permitted to evaluate the high evolution of the technology of the construction of wooden bridges, in the United States, where there is the astonishing amount of thirty hundred kilometers of highway bridges and twenty for hundred kilometers of railroad wooden bridges.

In Brasil the techonology of construction of the wooden bridges is actualles reaching significant evolution.

In this work was analysed trough tests of reduced models the behavior of solid wooden plates, having in mind its interpretation and utilization in the project and in the construction of wooden bridges.

A solid wooden plate is not feasible to bridge construction. The analisys of the solid wooden plate, hypothetically admitted as made of sawn wooden beams, side connected in a solid unit, gave origin to the idea of the structural scheme in larger dimensions, constituted by sawn wooden beams, side connected by screws or by metallic split rings. This strucutral scheme presented excellent experimental results.

But the sawn wooden bems are usually short for utilization in bridges. In a new approach, it was thought in the utilization of poles of Eucalipto Citriodora, side connected by metallic split rings, making simple or nervured cross sections. The tests shown the viability of these structural schemes for bridges.

The final analisys, with the presentation of a mathematical scheme for the calculus, considering the structure as a grilla ge, confirmed significantly the efficiency of this structural scheme for the wooden bridge design and for the wooden bridge made of poles side connected by split metal rings.

In this structural scheme it is not utilized the conventional deck of the wooden bridges.

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	1
2- REVISÃO DA LITERATURA	2
2.1- Pontes de Troncos de Árvores	2
2.1.1- Segurança das pontes de troncos	3
2.1.2- Programa cooperativo de pesquisa	3
2.1.3- Ensaio de campo de troncos de árvores	4
2.1.4- Prova de carga das pontes atuais	7
2.1.5- Investigação analítica das pontes	9
2.1.6- Investigação experimental em modelos de pontes	11
2.1.7- Formulação do critério de distribuição de carga	13
2.2- Estudo das Pontes de Madeira Serrada no FPL	14
2.3- Pontes de Madeira no LaMEM	16
3- PONTES DE MADEIRA EM PLACA	19
3.1- Introdução	19
3.2- Modelos de Placa de Madeira Maciça	19
3.2.1- Ensaio do modelo 1:33,3	20
3.2.1.1- Análise preliminar do modelo reduzido 1:33,3	28
3.2.2- Ensaio do modelo 1:20	30
3.2.2.1- Análise preliminar do modelo reduzido 1:20	47
4- ESTUDO DE MODELOS COMPOSTOS POR VIGAS	53
4.1- Introdução	53
4.2- Modelo de Ponte Composta por Viga de Peroba Rosa ..	53
4.3- Estudo das Ligações Transversais nas Vigas por Anéis Metálicos	55
4.3.1- Cálculo do anel para o modelo em vigas	56
4.3.2- Cálculo do espaçamento das linhas de anéis.	58
4.3.3- Ensaio do modelo de dez vigas interligadas por barras de aço	58
4.3.3.1- Modelo com sete barras	58

4.3.3.2-	Modelo com onze barras	63
4.3.3.3-	Comparação dos resultados dos ensaios dos modelos interligados por sete e por onze barras de aço	63
4.3.3-	Ensaio do modelo de dez vigas interligadas por anéis metálicos	66
4.3.4.1-	Montagem do modelo	66
4.3.4.2-	Realização dos ensaios. Resultados.	66
4.3.4.3-	Análise do modelo de dez vigas interligadas por anéis metálicos	67
4.3.5-	Montagem do modelo de uma faixa de tráfego .	70
4.3.5.1-	Ensaio do modelo composto por 19 vigas. Uma carga concentrada	72
4.3.5.2-	Ensaio do modelo composto por 19 vigas, tendo duas cargas concentradas	77
4.3.5.3-	Análise do modelo de dezenove vigas interligadas por anéis metálicos , uma faixa de tráfego	78
4.4-	Relação Modelo - Protótipo - Dezenove Vigas	90
4.4.1-	Relação entre flechas	90
4.4.2-	Verificação de tensões no modelo	94
4.4.2.1-	Tensões devidas à flexão	94
4.4.2.2-	Tensões devidas ao cisalhamento ...	95
4.4.3-	Relação entre flechas e tensões para carga concentrada	96
4.4.3.1-	Relação entre tensão de flexão e flecha	96
4.4.3.2-	Relação entre a tensão de cisalhamento e de flexão	96
4.4.4-	Relação entre flechas, tensões para carga acidental concentrada e permanente distribuída	98
4.4.4.1-	Relação entre flecha e tensão normal na flexão	98
4.4.4.2-	Relação entre as tensões de flexão e cisalhamento	98
4.5-	Ensaio até a Ruptura do Modelo Constituído por 19 vigas	99
5-	ESTUDO DE MODELOS COMPOSTOS POR POSTES	103

5.1-	Introdução	103
5.2-	Estimativa de Vãos em Função do Diâmetro dos Postes	103
5.3-	Cálculo Simplificado da Ponte de Poste de Eucalipto	112
5.3.1-	Cálculo do diâmetro do anel	112
5.3.2-	Cálculo da altura do anel	113
5.3.3-	Cálculo da carga permanente	113
5.3.4-	Cálculo da carga acidental.....	115
5.3.5-	Verificação da resistência das vigas simples e bicirculares quanto à flexão	116
5.3.6-	Verificação das vigas simples e bicirculares quanto ao cisalhamento	117
5.3.7-	Verificação da flecha	119
5.4-	Montagem do Modelo Reduzido	122
5.4.1-	Introdução	122
5.4.2-	Características geométricas do modelo	123
5.4.3-	Composição das vigas no modelo	123
5.4.4-	Preparação das vigas para montagem	124
5.4.5-	Montagem do modelo de seção simples	126
5.4.6-	Montagem do modelo de seção nervurada	127
5.5-	Ensaio dos Modelos	127
5.5.1-	Preparação dos ensaios (seção simples e seção nervurada)	127
5.5.2-	Ensaio do modelo de seção simples	129
5.5.3-	Ensaio do modelo de seção nervurada	150
5.6-	Análise Preliminar do Modelo de Seção Simples e de Seção Nervurada	174
5.7-	Ruptura do Modelo	174
5.7.1-	Análise do ensaio de ruptura do modelo	178
6-	INVESTIGAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	179
6.1-	Introdução	179
6.2-	Análise Teórica da ponte pela Analogia de Grelha ..	179
6.2.1-	Modelo composto por 19 vigas retangulares ..	180
6.2.2-	Modelos compostos por postes	193
6.2.2.1-	Ensaio de torção em postes	193
6.2.2.2-	Estudos dos modelos compostos por postes como grelhas	195
6.3-	Conclusões do Modelo de Grelha	206
7-	CONCLUSÕES	211

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 212

9- BIBLIOGRAFIA 215

1- INTRODUÇÃO

No Brasil, as pontes de madeira são encontradas na sua maioria, com pequenos vãos livres, entre 4 e 6 metros, em estradas vicinais. Sua construção por carpinteiros, feita sem nenhum cálculo estrutural, é, geralmente, muito precária.

A necessidade de estradas vicinais interligando milhares de pequenas comunidades entre si, ou interligando-as às estradas principais para dar maior vazão aos produtos agrícolas, é muito grande. A construção destas estradas implicará na construção de muitas pontes de madeira, as quais por sua vez, deverão ser dimensionadas para caminhões pesados, mas para tráfego de baixa frequência.

A disponibilidade de madeira para pontes, no Brasil, é assegurada pela grande concentração de florestas nativas em todo o norte do país e pela ilimitada capacidade de reflorestamento de regiões atualmente inservíveis para a agricultura.

Manejo florestal adequado a cada caso garante permanência desta situação por longo tempo.

Assim, sendo a madeira um material renovável, fazendo-se tratamento preservativo contra fungos apodrecedores e insetos xilófagos, as pontes de madeira ganharão uma durabilidade muito grande, geralmente superior à sua vida funcional.

O Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, vem estudando, já há algum tempo, as pontes de postes de eucalipto citriodora.

A utilização de postes de madeira ganhou significativa expressão com a proposta de Hellmeister do emprego de postes interligados constituindo as vigas de seção bicircular.

A perspectiva de utilizar estas vigas em pontes mais longas, em torno de vinte metros de vão livre, estimulou a pesquisa de novas soluções para o projeto e a construção das pontes de madeira no Brasil.

O estudo se desenvolveu a partir da eventual possibilidade da construção de uma estrutura semelhante à ponte em laje de concreto.

Os ensaios preliminares, em modelo reduzido de placas maciças de madeira apresentaram resultados satisfatórios. A partir destes resultados cuidou-se da montagem de modelos pouco reduzidos utilizando vigas e postes de madeira.

2- REVISÃO DA LITERATURA

A literatura disponível a respeito das pontes de madeira é escassa. A revisão apresentada a seguir tem por finalidade destacar o desenvolvimento atingido atualmente no assunto.

2.1- PONTES DE TRONCOS DE ÁRVORES

A primeira ponte de madeira só pode ter sido feita de troncos de árvores em passado distante e desconhecido.

Sanders, Muchmore e Tuomi (1) apresentaram em 1978 um estudo relativo ao emprego de troncos de árvores, em construção simples, de pontes de madeira no Alaska.

Construídas com troncos de Sitka Spruce ou de Western Hemlock, colocados lado a lado e cobertos com uma camada solo e rocha britada disponível na localidade, estas pontes serviram por 10 anos, ou mais, apresentam custo diminuído.

O procedimento usado em sua análise, baseou-se em informações limitadas e avaliações aproximadas. Isto aplica-se particularmente ao critério de distribuição de carga. Foi desenvolvido um programa de pesquisa visando obter as informações necessárias e providenciar melhor avaliação das informações. Esse programa de pesquisa incluiu quatro fases:

- 1- Avaliação da resistência dos troncos;
- 2- Testes de distribuição de cargas de 4 pontes em serviço (vãos de 11,6 a 28,0 m);
- 3- Testes de laboratório de modelos típicos da ponte;
- 4- Avaliação analítica dos dados dos testes da ponte e desenvolvimento na revisão do critério de distribuição de carga.

A análise de pontes reais e de resultados experimentais obtidos em laboratório permitiram adotar distribuição de cargas superior as dos projetos então correntes.

Os ensaios de resistência forneceram dados comuns da resistência última à flexão da Sitka Spruce e do Western Hemlock. O resultado final do estudo indicou a viabilidade de significativa elevação das cargas em relação às cargas previstas, anteriormente.

Segundo Sanders, Muchmore e Tuomi (1), no decorrer dos últimos 20 anos, mil pontes diferentes foram construídas com troncos nativos, na região Sudoeste do Alaska.

As pontes necessitavam de maiores vão, e havia, no local,

grande abundância de troncos de Sitka Spruce de qualidade superior, com diâmetro até 1,52 m (5 pés).

Com árvores cortadas nas proximidades do local da ponte, o custo de construção destas pontes foi de apenas US\$ 54,00 por m².

Os troncos eram posicionados com base e topo nos berços de apoio da ponte, amarrados com cabo de aço, tendo uma camada de cascalho para regularizar a superfície de rolamento e troncos nas bordas da ponte funcionando como guarda-rodas. Embora este modelo pareça primitivo, existem atualmente, centenas de pontes deste tipo em pleno uso, por dez anos ou mais. Algumas dessas pontes são admiráveis, com vãos livres chegando a 30 m e suportando grandes veículos, com pesos excedendo a 100 toneladas.

2.1.1- Segurança das pontes de troncos

Na continuação do trabalho de Sanders, Muchmore e de Tuomi (1) é examinado o problema da segurança.

Em 1968 o Federal Aid Highway Act, passou a exigir a inspeção das pontes nacionais e a avaliação do padrão de cargas. As pontes com características inferiores às novas exigências deveriam ser adaptadas aos padrões.

Lamentavelmente, o conhecimento comum das pontes de troncos, sua análise e projetos, são limitados. Pouco se conhece a respeito da resistência e da vida útil dos troncos de grande diâmetro. As recomendações das tensões admissíveis de projeto estão baseadas no procedimento desenvolvido para postes e para estacas. A distribuição de cargas das rodas entre as vigas não é bem conhecida (2).

A inspeção e avaliação das cargas em pontes existentes indica que muitas pontes de troncos de árvores são seriamente sobrecarregadas. Em vários exemplos, a carga admissível é inferior ao peso dos caminhões madeireiros que utilizam estas pontes por muitos anos. Informações novas e confiáveis são necessárias para a análise de pontes de postes de madeira.

2.1.2- Programa cooperativo de pesquisa

Para se obter as informações relativas ao comportamento das pontes de troncos, o Serviço Florestal dos Estados Unidos, região do Alaska e o Laboratório de Produtos Florestais (FPL) fizeram provas de carga de rodas em pontes existentes e avaliação da

resistência de Sitka Spruce e de Western Hemlock.

Os dados dos testes de campo para verificar a distribuição de cargas foram analisados pelo Instituto de Pesquisa em Engenharia da Iowa State University (ISU) em acordo cooperativo com o Laboratório de Produtos Florestais. Utilizando estes dados o ISU desenvolveu processos analíticos para estudar um grande número de variáveis relativas à distribuição da carga das rodas, abrangendo todos os tipos de pontes de troncos de madeira. Os resultados foram confirmados por ensaios em modelos reduzidos realizados no laboratório da ISU.

O resultado final do estudo consiste na indicação de novas tensões admissíveis e novos critérios de distribuição de cargas que indiquem mais exatamente o comportamento das pontes (Sanders, Muchmore e Tuomi(1)).

2.1.3- Ensaio de campo de troncos de árvores

Os ensaios de campo realizados por Muchmore et alli (3), 1977, abrangeram vinte e cinco troncos de Sitka Spruce, madeira verde, quinze troncos de Western Hemlock, madeira verde e vinte e oito troncos de Sitka Spruce aclimatados em carregamento até a ruptura. Estas espécies são as mais comuns para pontes de troncos, sendo a Sitka Spruce usada quase exclusivamente. Os troncos para os ensaios, como vigas, eram representativos dos troncos existentes em manipulação nos dezesseis milhões de acres (4047 m²) da Floresta Nacional de Tangass. O comprimento dos troncos variando de 14,3 até 26,2 m, com diâmetros até 1,47 m na base.

O ensaio consistiu no carregamento através de um sistema de carga capaz de aplicar até 900KN. Dois apoios móveis (ajustados para o comprimento dos troncos) eram construídos sobre uma pilha de troncos em forma de cruz, com altura aproximada de 4,9 m acima do solo. As cargas eram aplicadas através de cabos e de um sistema de roldanas, para aumentar a carga na razão 8 para 1. O tronco mais resistente suporta carga excedendo 530 KN na ruptura. Os troncos de Western Hemlock, madeira verde, frequentemente apresentaram ruptura instantânea (frágil). Os troncos de Sitka Spruce, madeira verde, rompiam gradualmente.

O procedimento comum para a determinação da carga admissível à flexão nos troncos, está contido na ASTM-D-2899(4). De acordo com este procedimento, é estimado um ponto estatístico de resistência

mínima, estabelecida com 95% de probabilidade. Os ensaios de campo confirmaram com razoável precisão os resultados obtidos em laboratório.

As características de resistência para os troncos verdes, são sumarizadas na tabela 1.

A partir da análise dos resultados obtidos os autores elaboram diagramas representativos dos limites de tolerância para as duas espécies ensaiadas, para vários níveis de confiança, figuras 1 e 2. O nível de resistência para os projetos correntes é apresentado para as duas espécies. Os níveis de projetos comuns são também demonstrados.

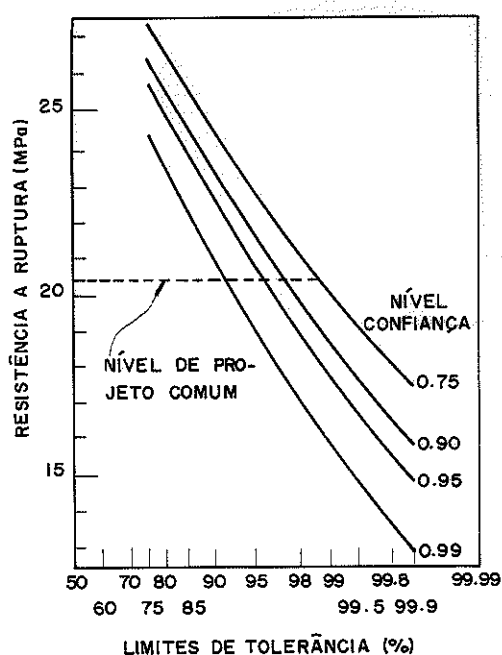


Fig. 1- Western Hemlock

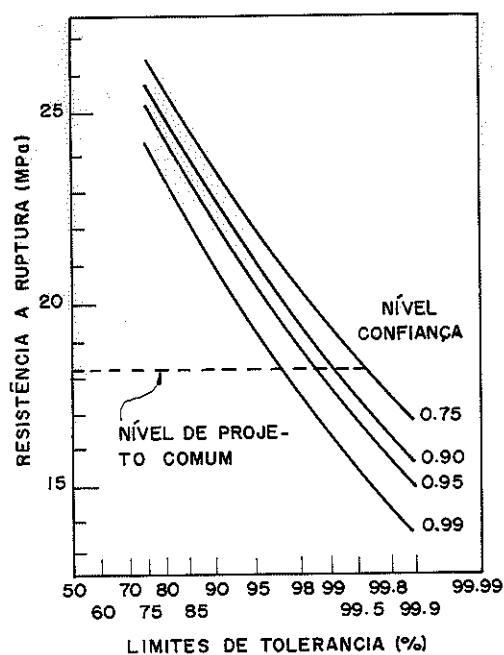


Fig. 2- Sitka Spruce

O calculista de pontes de madeira deve decidir equilibradamente entre segurança e economia, apropriadas ao projeto.

A resistência à ruptura é geralmente multiplicada pelo fator 0,62, para se obter a resistência adequada para as cargas permanentes (dez anos). Este fator é conservativo pois a maior parte das pontes de madeira atinge suas cargas de projeto por um tempo curto de utilização durante a sua vida útil.

Valores do módulo de ruptura para os troncos de Sitka Spruce, ensaiados após doze anos de serviço, foram calculados por dois métodos. Baseiam-se no módulo de resistência da seção de diâ-

TABELA 1

LOCAL	NÚMERO DE ESPÉCIMENS	MÓDULO DE RUPTURA				
		MÉDIA MPa	DESVIO PADRÃO MPa	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO %	MÁXIMO MPa	MÍNIMO MPa
WESTERN HEMLOCK						
FALSE ISLAND	4	33.0	4.8	14.4	39.4	28.0
ZAREMBO ISLAND	4	31.9	4.4	13.9	37.9	27.6
PRINCE OF WALES ISLAND	7	<u>32.1</u>	<u>6.8</u>	<u>21.2</u>	<u>40.2</u>	<u>21.9</u>
ALL HEMLOCK	15	32.3	5.4	16.7	40.2	21.9
SITKA SPRUCE						
FALSE ISLAND	8	31.3	3.7	12.0	39.0	28.1
ZAREMBO ISLAND	6	29.9	4.1	13.6	35.0	23.6
PRINCE OF WALES ISLAND	11	<u>31.9</u>	<u>7.3</u>	<u>22.8</u>	<u>47.4</u>	<u>20.8</u>
ALL SPRUCE	25	31.2	5.5	17.6	47.4	20.8

metro máximo do tronco, e indicou a resistência média de 24,0 MPa. No segundo método, considerou-se a redução de área, devido ao apodrecimento superficial, para se estimar a seção líquida não apodrecida.

A média do módulo de ruptura do material perfeito foi de 33,2 MPa.

2.1.4- Prova de carga das pontes atuais

Quatro pontes com vão livre entre 11,6 a 28,1 m, foram selecionadas para prova de distribuição de cargas das rodas do veículo tipo. As pontes foram carregadas com grandes caminhões de cascalhos pesando 39.000 kg (3).

As flechas na parte central de cada viga e nos troncos dos guarda-rodas foram registradas para nove diferentes posições do caminhão. A flecha máxima medida nas pontes de 28 m de vão foram de apenas 33 cm. Ocorreram flechas significantes nos troncos dos guarda-rodas, indicando que eles estavam contribuindo estruturalmente para comportamento das pontes. A planta e a seção transversal da ponte de troncos são mostradas nas figuras 3 e 4.

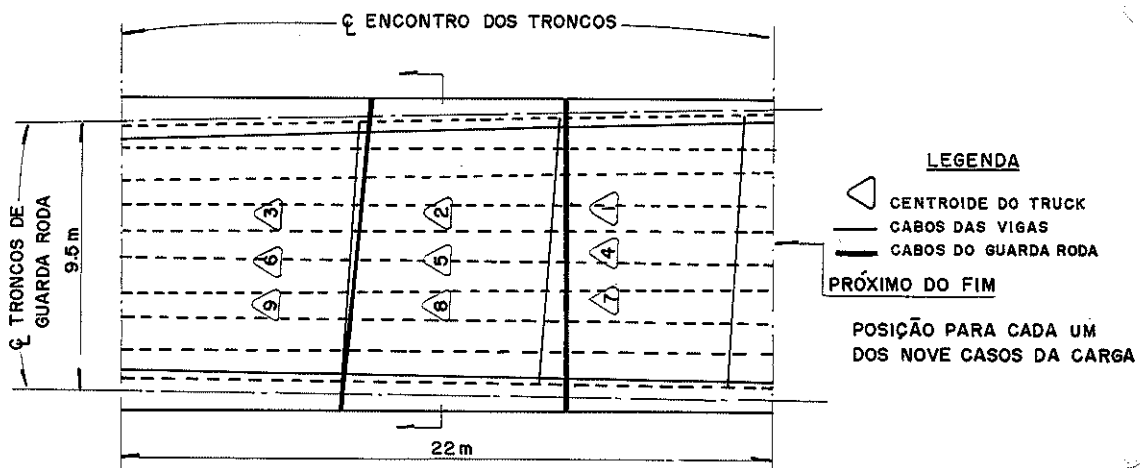


Fig. 3

Os diagramas de flecha para duas posições de carregamento são mostrados na fig. 5, para o caminhão no meio do vão. As flechas dão uma indicação da distribuição de cargas, embora sejam necessários alguns ajustes devidos à variação nos diâmetros dos tron-

COS.

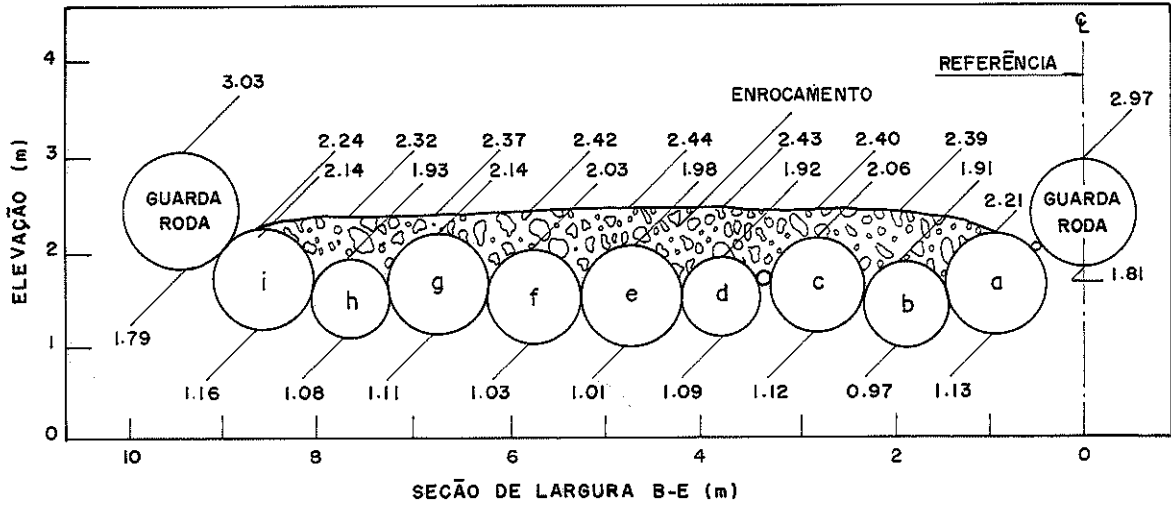


Fig. 4

O resultado obtido para três pontes foi usado para determinar a validade do procedimento analítico, e para avaliar o comportamento de um grande número de pontes de troncos de madeira. A quarta ponte rompeu-se durante a prova de carga.

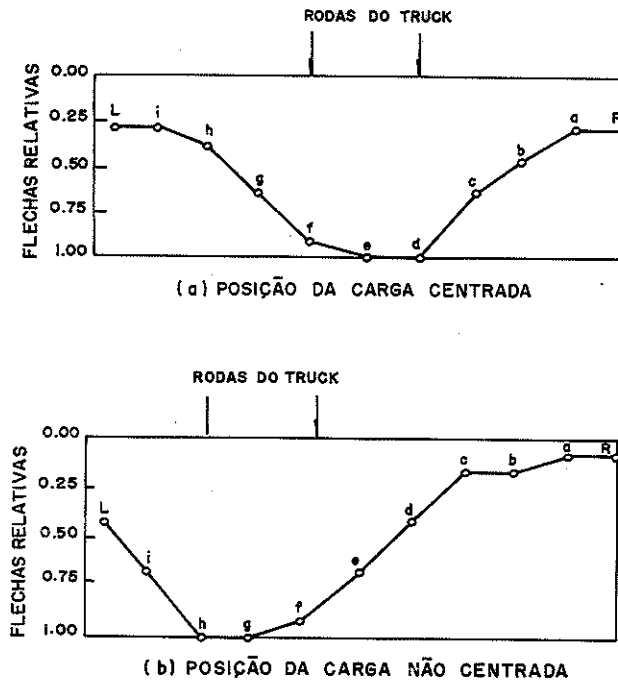


Fig. 5

2.1.5- Investigação analítica das pontes

A teoria de placas articuladas foi escolhida por Sanders e Elleby, 1970 (5), para a investigação analítica como sendo a melhor adaptação para o estudo das pontes de troncos de madeira, porque a distribuição de carga entre as vigas é acompanhada pelo atrito entre os troncos. Este tipo de comportamento indica uma distribuição de carga por cisalhamento melhor do que por flexão. Desta forma, a teoria de placa articulada parece apropriada, pois pela hipótese básica desta teoria apenas o cisalhamento age entre os elementos da ponte.

A comparação básica entre a teoria e os dados obtidos no campo é o coeficiente de momento por pé-de-tronco: K_{MPL}

Este coeficiente é determinado a partir da razão entre o momento por pé de largura da ponte e o momento médio por pé de largura da ponte. Para comparar a distribuição teórica de carga com a distribuição de carga dos ensaios de campo, o parâmetro mais importante para a determinação da distribuição transversal de carga de rodas é ϕ .

$$\phi = 1,5 \frac{W}{L}$$

sendo

W = largura efetiva da ponte em metros (largura da ponte, mais o diâmetro dos postes dos guarda-rodas).

L = comprimento do vão, em metros

Os valores de K_{MPL} para as vigas das pontes foram calculados com os dados das flechas obtidas nos ensaios de campo. Os casos da carga no meio do vão foram de particular interesse porque a análise teórica, apenas considera pontes com carregamento no meio do vão. Depois que os valores de K_{MPL} foram calculados a partir dos testes de campo, os valores teóricos para K_{MPL} para as mesmas vigas de algumas pontes, foram calculados usando-se a teoria de placas articuladas. A distribuição típica de carga dos testes de campo de pontes com vãos de 22 m e a análise de cálculo usando a teoria de placas articuladas, com $\phi = 1,5 \frac{W}{L}$ são mostradas na fig. 6.

A comparação das curvas de distribuição de cargas para os casos apresentados, mostra que a análise teórica se ajusta favoravelmente aos resultados dos ensaios de campo.

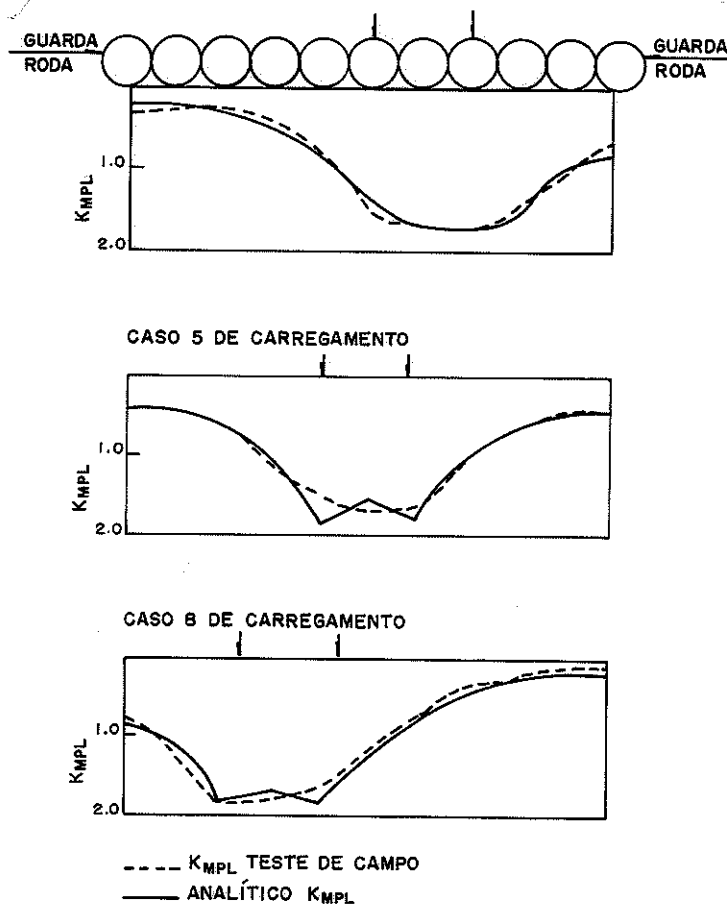


Fig. 6

Não apenas as curvas tomam a mesma forma em cada caso de carregamento, mas, também, os valores máximos de K_{MPL} para a análise teórica e para os testes de campo são quase idênticos e ocorrem ao redor das mesmas posições nas duas análises. Estas relações foram típicas nos casos estudados.

Devido à distribuição teórica de carga na ponte ser baseada no comprimento e largura da ponte foi necessário determinar as dimensões das atuais pontes de troncos do Alaska. Baseados nos resultados da inspeção de campo, realizada por Willis, 1975, (6) obteve-se a variação das dimensões das vigas, número de vigas, vãos das pontes, altura da camada de cascalho e configuração dos troncos. Estabeleceu-se que a ponte característica teria a largura por volta de 4,6 m e vão de 9,1 a 15,2 m, sendo formada por 8 a 10 troncos mais os guarda-rodas.

Usando estes dados, os limites superior e inferior foram fixados com largura e comprimento das pontes. Estes contornos fixaram os valores de ϕ entre 0,25 e 2,50 com o valor característico de 0,75.

O cálculo da distribuição de cargas foi feito através de computador a teoria de placas articuladas. Todavia, em vez de se usar o carregamento pelo caminhão, usou-se na geração das curvas de distribuição da carga teórica, a carga teórica de norma (unitária), concentrada. Esta carga padrão no programa do computador (de teoria de placas articuladas) era então usada para gerar as curvas de distribuição de cargas centradas ou não no meio da seção transversal para um grande número de pontes, fig. 7.

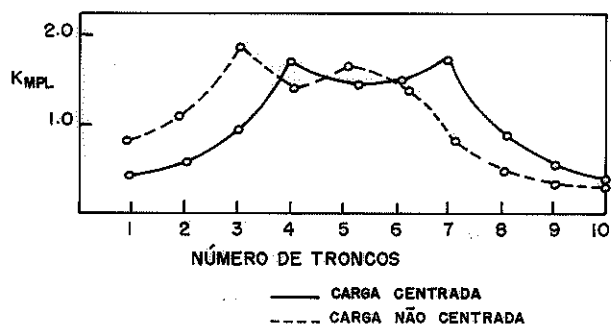


Fig. 7

2.1.6- Investigação experimental nos modelos de pontes

Muchmore et alii, 1977 (3), realizaram significativa experimentação em modelos.

A comparação de resultados obtidos nas provas de carga e na sua análise através de computador mostrou-se favorável. Contudo mostrou-se necessário um trabalho experimental antes da generalização da natureza de distribuição de cargas nas vigas. O trabalho experimental consistiu na realização de ensaios em modelos de pontes em laboratório.

Os modelos foram construídos com 7,6 m utilizando postes com diâmetros variando entre 20,3 a 26,7 cm. Os modelos foram construídos em escalas de 1:5 ou 1:4, dependendo do diâmetro do tronco e do vão livre a ser estudado. Mais de vinte e cinco modelos de pontes foram ensaiados. Os parâmetros significativos foram: a largura da ponte e a consideração dos troncos dos guarda-rodas estabilizadores transversais.

Um dos objetivos da investigação experimental foi a obtenção de dados de distribuição de cargas adicionadas, para suplementar as informações provenientes dos ensaios das pontes no campo. Estes dados adicionais foram necessários para verificar a hipótese feita no estudo da distribuição teórica das cargas.

Outro objetivo foi isolar o efeito dos troncos de guarda-rodas e transversina na distribuição das cargas.

A comparação dos ensaios de laboratório, provas de carga e distribuição teórica de carga é apresentada na fig. 8. Os testes de distribuição de cargas no laboratório foram feitos com cálculo baseado no diâmetro dos postes e na flecha das vigas do modelo. A distribuição teórica foi determinada através do programa de carregamento padrão, partindo da largura e do número de troncos. O teste de distribuição no campo foi tomado a partir da análise das pontes como placas articuladas. As três curvas apresentadas na fig. 8 tem a mesma forma, e as porcentagens de carga máxima suportadas por uma viga em cada ponte é aproximada.

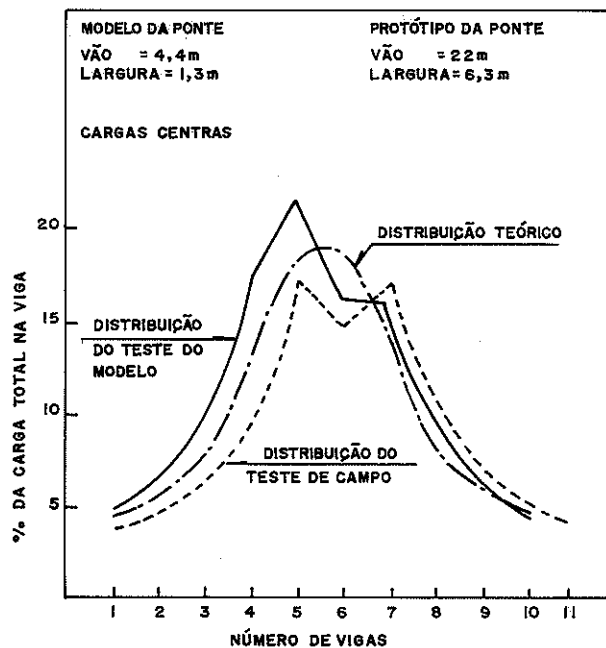


Fig. 8

As porcentagens máximas teórica e de campo da carga total em uma viga são 18,8 e 17,5% respectivamente, tendo uma diferença de 7%. A máxima porcentagem de carga, nos testes experimentais de laboratório e uma viga, é ligeiramente maior, 21,5%. Comparando todas as três distribuições, a porcentagem máxima da carga total, em cada viga da ponte, é cerca de 20%.

O primeiro objetivo na investigação experimental foi alcançado, isto é, a distribuição de carga obtida nos ensaios de laboratórios mostrou-se compatível com a distribuição de carga dos testes de campo e do estudo teórico. Desta forma, a configuração prévia dos resultados teóricos além de ser considerada válida para

as pontes ensaiadas no campo, é também válida para uma grande variedade de pontes semelhantes às representadas nos modelos. Os modelos das pontes apresentam também os efeitos dos troncos do guarda rodas e das transversinas na distribuição da carga. Redução na porcentagem da carga máxima na viga crítica está entre 5% e 15% com a adição dos troncos do guarda-rodas. A redução na porcentagem da carga de carregamento na viga crítica, no modelo, com a adição da transversina, está entre 6 e 27%.

Os troncos dos guarda-rodas são elementos estruturais essenciais nas pontes, podendo diminuir o valor da carga de carregamento na viga crítica, em média, 10%. As transversinas podem também contribuir para a distribuição de carga. Quando uma transversina é instalada no meio do vão da ponte, a rigidez da ponte é aumentada, diminuindo a quantidade de carga recebida pela viga crítica em torno de 10%. Para a transversina distribuir a carga através da largura da ponte, é importante que a transversina faça contato com todas as vigas. Na realidade, isto é difícil, fazendo seu uso prático questionável.

2.1.7- Formulação do critério de distribuição de carga

Muchmore et alii, 1977 (3), prosseguindo em seu estudo, depois de completada a investigação analítica e experimental da distribuição de carga, a fase final do estudo na Universidade Estadual de Iowa consistiu na adoção de um novo critério de distribuição de cargas. A investigação analítica mostrou que o comportamento das pontes estudadas poderia ser teoricamente explicado usando uma forma modificada da teoria de placas articuladas. Conhecida a distribuição de cargas nas pontes, uma série de curvas da distribuição teórica de cargas foi preparada para representar o comportamento das pontes comumente em uso. A investigação experimental em laboratório permitiu implementar os resultados de campo e justificar as hipóteses da investigação teórica.

A etapa final do processo da investigação analítica consistiu na apresentação das curvas de distribuição de carga teórica ajustada para as pontes de troncos. Os valores máximos de K_{MPL} para uma grande variação de vãos de pontes foram acrescentados para os casos de carga centradas ou não na linha mediana da seção transversal. Para casos com configuração realista, esses valores são apresentados na fig. 9. A relação é apresentada em função do fator

de distribuição K_{MPL}/W com o vão da ponte e através de um ajustamento dos mínimos quadrados, para os dados relativos do fator de distribuição com o vão.

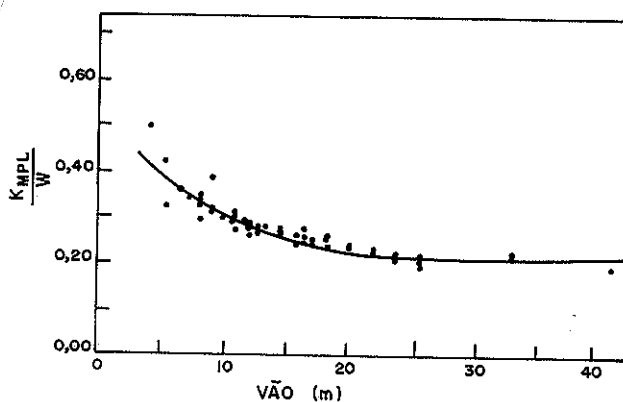


Fig. 9

O momento máximo produzido pelo veículo, por tronco, pode ser calculado:

$$M_L = \frac{K_{MPL}}{W} \cdot M_V \cdot d$$

sendo:

M_L = momento máximo, por tronco

M_V = momento máximo aplicado pelo veículo

d = diâmetro dos troncos (m)

O efeito dos troncos de guarda-rodas foi mostrado para reduzir o coeficiente de momento máximo acerca de 10%. Este método indica um momento médio, na viga, por volta de 22% do momento total do caminhão, contra os 30% dos projetos e critério de distribuição correntes. Este critério pode permitir um aumento de 30% na capacidade de carga das pontes de troncos (2).

2.2- ESTUDO DAS PONTES DE MADEIRA SERRADA NO FPL

O Laboratório de Produtos Florestais (FPL) do Serviço Florestal do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, um dos mais dedicados ao estudo da madeira e das estruturas de madeira, tem apresentado significativa contribuição para o projeto e para a experimentação de pontes de madeira serrada.

Werren, 1961 (7) apresentou um estudo de pontes em vigas de

de madeira laminada e colada tendo tabuleiros pesados de madeira , em relação à rigidez, mas conclue pela diminuta contribuição do tabuleiro para a rigidez das vigas. Na verdade os tabuleiros estudados não eram rigidamente solidarizados às vigas.

Levis, 1962 (8) mencionou a existência nos Estados Unidos de aproximadamente três mil quilômetros de pontes rodoviárias de madeira, utilizadas tanto em vias principais como em vias secundárias. Destacou a grande quantidade de pontes em vigas com tabuleiros e a necessidade da frequente substituição das vigas devido ao apodrecimento e a prática crescente de tratar a madeira contra o apodrecimento e contra o ataque de insetos aumentando o tempo da madeira em serviço. O trabalho de Levis consistiu em exaustiva investigação experimental de fadiga em peças de madeira submetidas a ensaio dinâmico de repetição cíclica de carregamento.

Erickson e Romstad, 1965 (9) estudaram a distribuição da carga das rodas nas ponte. A solidarização vigas-tabuleiro não pode ser considerada rígida.

Bohannan 1972 (10), analisou a pesquisa desenvolvida no FPL. Destacou a utilização das pontes de madeira nas estradas secundárias, nas Florestas Nacionais e a existência de mais de dois mil e quatrocentos quilômetros de pontes ferroviárias. Apresentou esquemas estruturais de pontes de madeira em vigas treliçadas, em arcos e em tabuleiros apoiados sobre vigas. Destacou a importância anterior dos tabuleiros laminados e pregados, bem como a sua evolução para os tabuleiros laminados e colados. Os tabuleiros colados em painéis e estes interligados por pinos de aço.

Em 1973, McCutcheon e Tuomi (11) apresentaram um procedimento para o projeto de tabuleiros ortotópicos laminados e colados para pontes.

Youngquist et alii, 1979 (12), apresentaram um estudo relativo ao projeto, à construção, ao ensaio e à instalação de pontes de lâminas cortadas paralelamente às fibras (PLV).

Em 1983, a American Society of Civil Engineering divulgou o trabalho de Gutkowsky e Williansson (13) relativo a um exame global das pontes de madeira nos Estados Unidos, no qual são destacados : o sistema tabuleiro-vigas; o tratamento para preservação da madeira contra insetos xilófagos e fungos apodrecedores; critérios de projeto e de execução; tipos de pontes: em vigas laminadas com tabuleiros e com tabuleiros laminados colados, em arcos laminados e colados, em vigas treliçadas.

Ainda em 1983, Bakt (14) desenvolveu um estudo estatístico das pontes de madeira, apresentando a análise das propriedades da madeira, a conceituação de estados limites, efeito do valor do módulo de elasticidade na distribuição das cargas, e outros.

A Bibliotecária do LaMEM vem mantendo correspondência sistemática com o LPF-SF-USDA sediado em Madison, Wis. Os trabalhos neste item representam pesquisa teórica relevante e significativa, mas inferior ao potencial do LPF.

2.3- PONTES DE MADEIRA NO LaMEM

O Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira do Departamento de Estruturas, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, tem apresentado trabalhos significativos no desenvolvimento das pontes de madeira.

O estudo dos anéis metálicos na ligação de peças estruturais de madeira iniciou-se em 1970 com a elaboração de um trabalho de formatura de alunos de graduação (15). Evidenciou-se neste trabalho a viabilidade da utilização de anéis metálicos cortados de canos galvanizados de duas e meia e de quadro polegadas de diâmetro, imitando o padrão correspondente americano. Este trabalho se desenvolveu a seguir com a utilização destes anéis na solidarização de postes de madeira compondo vigas de seção bicircular e de seção quadrangular de elevada rigidez e possibilitando o projeto de pontes para grandes vãos, em trabalho apresentado por Hellmeister (16).

Matthiesen, 1981 (17), desenvolveu uma ampla análise teórica bibliográfica e experimental dos anéis metálicos de canos galvanizados, sistematizando e organizando todo o acervo de informação relativa ao assunto e reunido no LaMEM desde 1970.

No trabalho de Hellmeister, 1978, foi apresentada mais uma idéia a respeito da ligação lateral dos postes de madeira, através de cintas de aço circundando os postes de maneira a obter a distribuição para os postes laterais: quando é aplicada a carga em um determinado poste, figura 10.

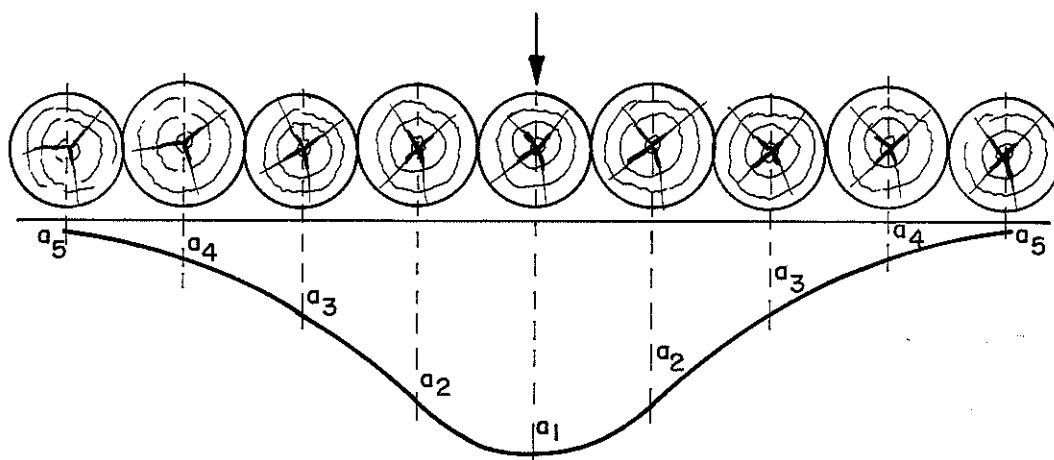


Fig. 10- Tabuleiro de postes de Eucalipto Citriodora. Hellmeister (16)

Logsdon, 1982, (18) apresentou um conjunto organizado de cálculo e dimensionamento de pontes em vigas bicirculares simples, em vigas bicirculares em pórtico e em vigas bicirculares contínuas, figura 11, 12.

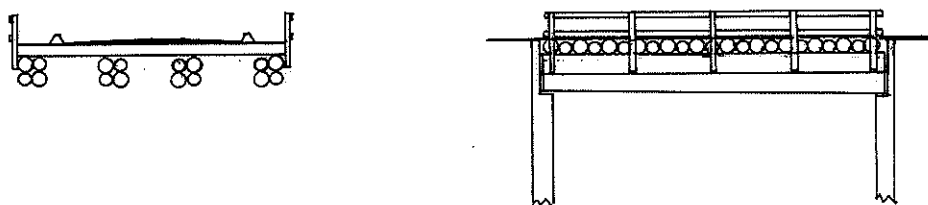


Fig. 11- Ponte de Eucalipto Citriodora em vigas simplesmente apoiadas de seção bicircular dupla.

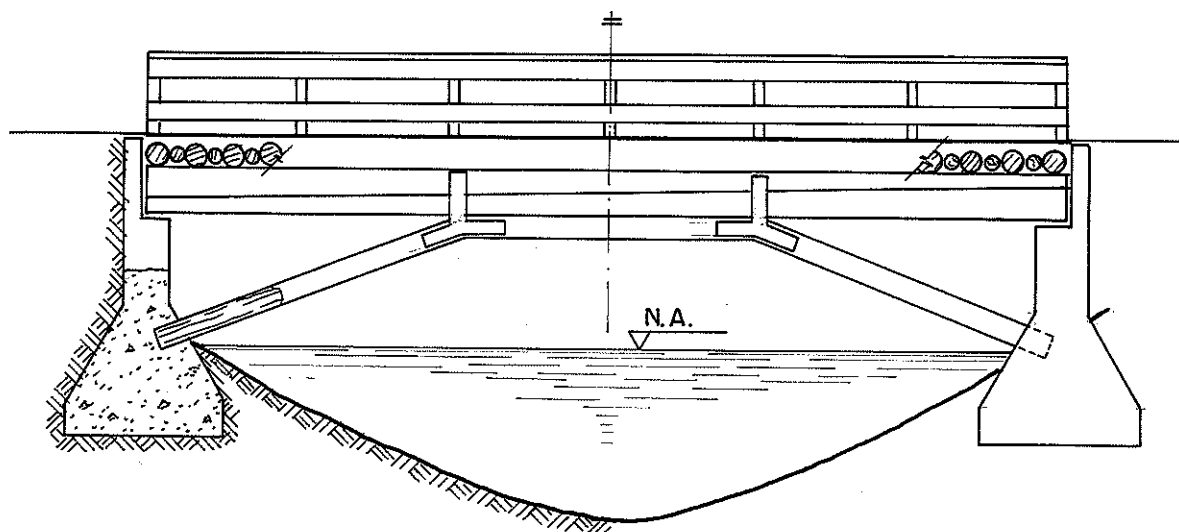


Fig. 12- Vista lateral. Ponte de postes de Eucalipto Citriodora em pórtico.

As normas brasileiras NBR 7190/82, Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira (19), e NBR 7188/84, Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestres (20), não contêm indicação de distribuição transversal das cargas do veículo tipo, não tomando em consideração eventual contribuição de continuidade do tabuleiro constituído por postes de madeira.

Dias, 1987 (21), estudou teórica e experimentalmente a distribuição transversal de cargas em tabuleiros constituídos por postes de madeira, solidarizados às vigas da ponte. As peças do tabuleiro apresentando continuidade transversal e tratadas como transversinas permitem a consideração do meio contínuo formado pelas vigas principais e pelo tabuleiro. A experimentação em modelo pouco reduzido e a análise dos resultados obtidos apresentou boa concordância com o cálculo teórico pela analogia de grelha.

3- PONTE DE MADEIRA EM PLACA

3.1- INTRODUÇÃO

O estudo da possibilidade de construção de pontes constituídas por vigas de madeira interligadas lateralmente, presumindo-se comportamento semelhante ao de placas ortotópicas teve início através de modelos de placas de madeira maciça.

3.2- MODELOS DE PLACA DE MADEIRA MACIÇA

Pensou-se inicialmente no projeto de uma placa de madeira maciça, tendo 20 m de comprimento, 9,6 m de largura, altura h , para duas faixas de tráfego, classe 36 Tf, com veículo de 360 KN.

Para facilitar a análise do modelo proposto, considerou-se o carregamento de meia faixa de tráfego, fig. 13.

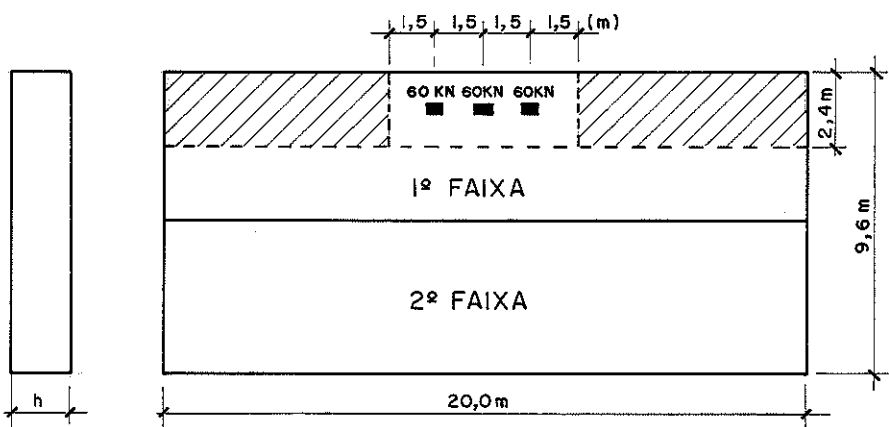


Fig. 13- Ponte da placa de madeira maciça

Calcula-se em caráter preliminar a altura h de uma peça hipotética de madeira, para construir a ponte, em função do seu comportamento como viga, com o carregamento indicado na figura 14.

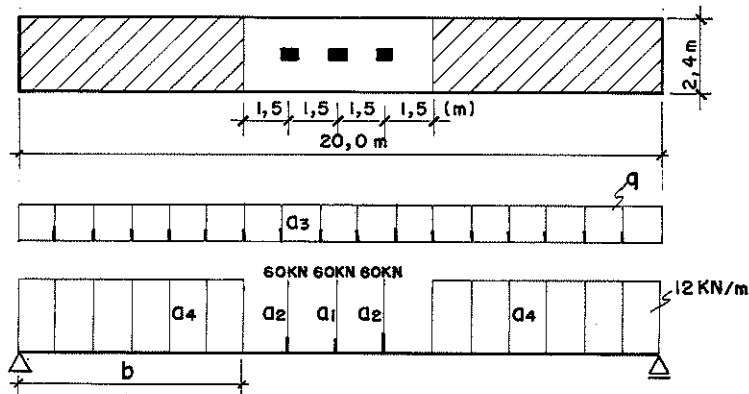


Fig. 14- Trem-tipo para meia faixa de tráfego

O momento de inércia da viga para meia faixa de tráfego , em função de h será:

$$I = \frac{bh^3}{12} = 20 h^3 \text{ cm}^4$$

Através do cálculo das flechas devidas às cargas móveis e no peso próprio, encontra-se uma altura h aproximada.

$$\text{Flecha admissível: } a = \frac{l}{350} = \frac{2000}{350} = 5,71 \text{ cm}$$

$$a_{\text{total}} = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \leq a_{\text{admissível}}$$

$$a_1 = \frac{Pl^3}{48EI} = \frac{4,999 \times 10^{10}}{E h^3}$$

$$a_2 = \frac{Pa}{24EI} (3l^2 - 4b^2) = \frac{9,679 \times 10^{10}}{Eh^3}$$

$$a_3 = \frac{5ql^4}{384EI} = \frac{19,0 \times 10^8}{Eh^2}$$

$$a_4 = 2 \cdot \frac{qb^2 (1-x)}{24 EIl} (4xl - 2x^2 - b^2) \text{ para } x > b$$

$$\text{para } x = 1/2 \quad a_4 = \frac{6,746 \times 10^{10}}{Eh^3}$$

Portanto

$$\frac{4,999 \cdot 10^{10}}{Eh^3} + \frac{9,679 \cdot 10^{10}}{Eh^3} + \frac{19,0 \cdot 10^8}{Eh^2} + \frac{6,746 \cdot 10^{10}}{Eh^3} =$$
$$= 5,71 \text{ cm}$$

Para o Pinho do Paraná $h = 85,2 \text{ cm}$

Com a altura h estimada da ponte em placa, montaram-se dois modelos reduzidos, com tábuas e pranchas de Pinho do Paraná de seção 30 x 2,5 cm e 30 x 4 cm nas escalas 1:33,3 e 1:20 fig.15.

3.2.1- Ensaio do modelo 1:33,3

O primeiro modelo, em escala 1:33,3, foi tirado de uma tábua de Pinho do Paraná, de madeira homogênea, isenta de defeitos, com as dimensões 28,8 x 60 x 2,5 cm, simulando duas faixas de tráfego.

A placa de madeira maciça foi colocada sobre dois apoios, simulando um apoio móvel e um fixo, representados nas figs.16 e 17.

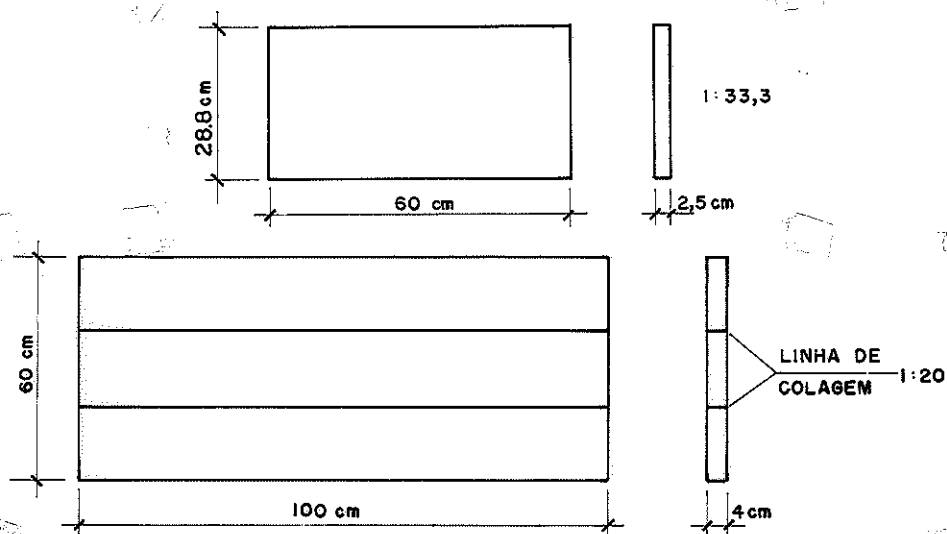


Fig. 15 - Modelos de placa de madeira maciça

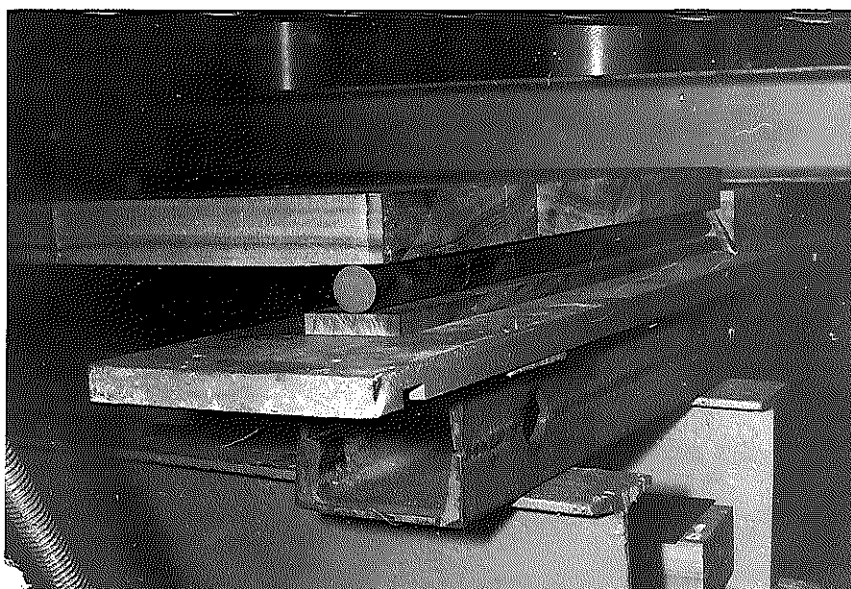


Fig. 16 - Apoio móvel

O primeiro passo foi verificar a simetria da placa de madeira no sentido longitudinal e transversal. Para isto, marcou-se o ponto central da placa e instalou-se um cilindro hidráulico de cinco toneladas e um anel dinamométrico de constante igual a 18,3N por divisão, para realizar os carregamentos. Instalaram-se relógios comparadores em seções transversais opostas, equidistantes da seção transversal central.

Realizados alguns carregamentos, fez-se a leitura dos relógios comparadores e obteve-se, para cada carregamento, flechas iguais nos pontos de simetria longitudinal e flechas bem próximas

nos pontos de simetria transversal. Desta forma constatou-se a existência de simetria da placa, permitindo assim a realização de carregamentos para 1/4 do modelo e leitura de flecha para metade do modelo.

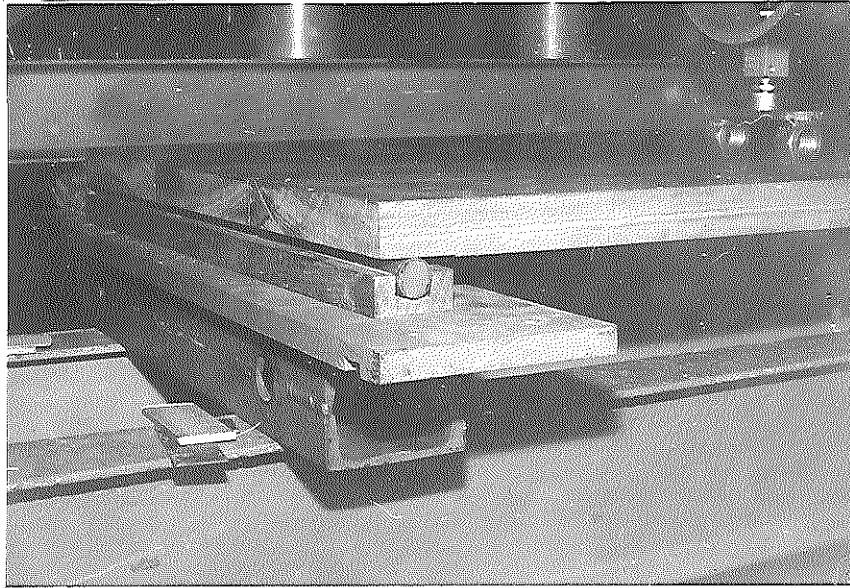


Fig.17- Apoio fixo

Este modelo foi ensaiado apenas com uma carga concentrada sendo deslocada ao longo da seção transversal central.

Para se obter os pontos de carregamento e leitura de flechas, dividiu-se a seção transversal de 7 em 7 cm e a longitudinal de 5 em 5 cm, obtendo-se, assim, trinta pontos de leitura. Fig 18.

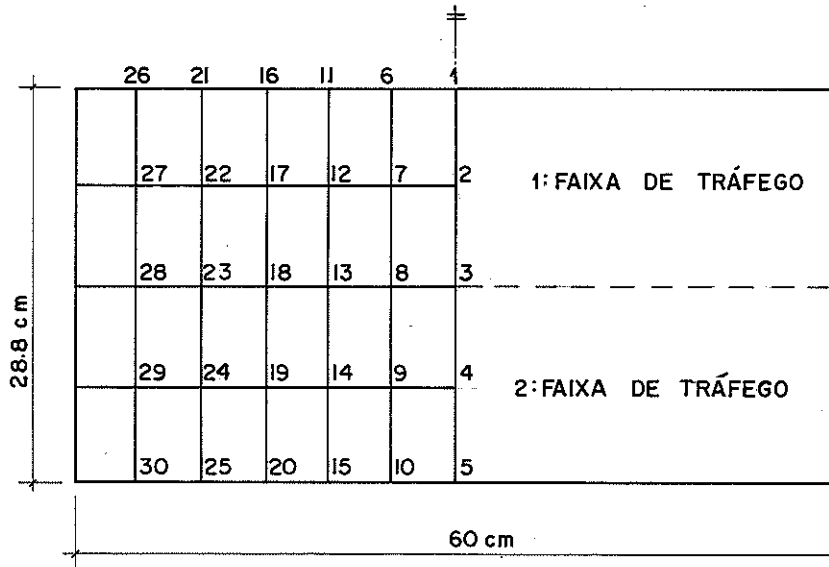


Fig. 18- Pontos de leitura de flechas

A leitura das flechas foi feita utilizando-se 10 (dez) relógios comparadores de 1 (um) cm de curso e 0,01 mm de precisão.

Instalaram-se cinco relógios comparadores, fixados em um suporte de madeira, em uma seção transversal, e os outros cinco em outra seção transversal mais distante, facilitando as leituras.

Fez-se um carregamento inicial no ponto três para a acomodação do modelo nos apoios. Em seguida, carregou-se o modelo no ponto três de 10 em 10 divisões no anel dinamométrico de constante igual a 18,3 N. Foram lidas as flechas correspondentes a cada carregamento não ultrapassando o comportamento elástico da madeira. Repetiu-se este procedimento mudando-se os relógios comparadores para outras seções transversais, repetindo-se o carregamento, com o cilindro no ponto 3, até a leitura das flechas nos trinta pontos indicados na fig. 18.

Na tabela 2 estão indicadas as flechas obtidas para o carregamento no ponto 3.

Tabela 2- Carregamento no ponto 3

FLECHAS EM 0,01 MILÍMETROS										
Pontos Carga N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	38	47	58	44	31	35	44	50	41	26
366	65	80	100	78	57	64	77	89	72	50
549	91	113	141	110	84	89	107	125	103	76
732	117	145	181	144	111	114	138	161	132	102
915	144	177	222	175	138	140	169	197	163	125
Pontos Carga N	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	29	33	40	33	23	23	30	33	27	19
366	55	64	72	60	42	46	54	59	49	37
549	79	92	105	87	63	62	77	84	70	54
732	103	119	136	113	83	82	99	109	91	68
915	125	147	166	140	110	100	120	133	112	85
Pontos Carga N	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	17	30	37	26	12	8	22	25	16	4
366	30	48	56	42	23	14	31	37	25	7
549	43	64	74	57	35	20	40	46	33	12
732	56	80	90	72	49	26	47	55	41	17
915	70	95	110	87	61	32	54	65	49	23

Para efetuar o carregamento concentrado no ponto 4, parte central de uma faixa de tráfego, deslocou-se o cilindro hidráulico sem mudar o modelo de posição.

Vários carregamentos foram realizados ultrapassando-se um

pouco a flecha admissível, sem prejuízo do comportamento elástico do modelo.

O procedimento de carregamento e leitura de flechas foi idêntico ao anterior (carregamento no ponto 3).

Na tabela 3 são apresentadas as flechas da placa de madeira, com carregamento no ponto 4.

Tabela 3 - Carregamento no ponto 4

FLECHA EM 0,01 MILÍMETRO										
Pontos Carga N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	21	35	54	57	76	15	20	41	53	51
366	46	69	97	122	130	28	40	73	95	95
549	65	95	135	159	181	42	61	103	138	141
732	85	120	171	212	233	55	81	133	178	182
Pontos Carga N	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	15	29	42	50	48	11	25	35	42	36
366	27	49	72	89	88	21	42	60	73	70
549	39	68	100	126	126	30	57	83	102	99
732	50	85	127	161	168	40	71	105	131	130
Pontos Carga N	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	8	22	29	31	23	4	15	24	21	10
366	15	33	47	52	42	7	21	37	33	20
549	21	44	63	71	63	10	27	46	43	30
732	27	53	78	90	87	13	32	54	52	41

Para se estudar o comportamento da placa de madeira com a carga aplicada em uma das bordas, fez-se o carregamento no ponto 5, seguindo-se o mesmo procedimento descrito anteriormente.

A tabela 4 apresenta os resultados do ensaio com carregamento no ponto 5.

Realizados os ensaios para a placa de madeira com duas faixas de tráfego, fez-se o estudo para uma faixa de tráfego, cortando-se 7 cm de cada borda do modelo obtendo-se uma placa de dimensões 14 x 60 cm, fig. 19.

Tabela 4- Carregamento no ponto 5

FLECHA EM 0,01 MILÍMETRO										
Pontos Carga N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	-61	-29	9	47	109	5	8	28	51	83
366	-160	-9	-7	82	200	-53	-9	28	88	161
Pontos Carga N	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	3	14	24	44	72	-5	2	16	34	16
366	-57	10	21	75	140	-65	-20	10	58	109
Pontos Carga N	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	-9	-9	10	24	39	-10	-1	4	10	21
366	-68	-41	0	38	74	-72	-27	-11	14	41



Fig. 19- Estudo de uma faixa de tráfego

Ajustou-se o modelo de uma faixa de tráfego sobre os apoios e o cilindro hidráulico para fazer o carregamento no ponto 3, centro da placa. Colocando-se os relógios comparadores, para fazer as leituras de flechas, nas seções transversais, fez-se o carregamento.

A tabela 5 apresenta os resultados do ensaio com o carregamento no ponto 3, para uma faixa de tráfego.

Tabela 5- Carregamento no ponto 3 para uma faixa de tráfego

FLECHA EM 0,01 MILÍMETRO									
Pontos Carga N	2	3	4	7	8	9	12	13	14
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	71	79	75	59	71	69	60	60	59
366	131	145	138	118	131	127	110	114	110
549	190	209	200	173	190	184	162	165	161
Pontos Carga N	17	18	19	22	23	24	27	28	29
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	46	49	48	29	32	31	17	18	16
366	86	90	89	57	60	58	30	31	29
549	127	131	129	85	88	84	44	44	40

Em seguida, mudou-se o cilindro hidráulico para a borda da placa, ponto 4.

A tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios com carregamento no ponto 4, borda a placa.

Tabela 6- Flechas - Uma faixa de tráfego ponto 4

FLECHA EM 0,01 MILÍMETRO									
Pontos Carga N	2	3	4	7	8	9	12	13	14
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	-25	33	135	-23	34	110	-14	47	113
366	-20	95	246	2	92	210	7	95	195
Pontos Carga N	17	18	19	22	23	24	27	28	29
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	-49	23	79	-22	23	68	-50	1	40
366	-61	56	145	-13	55	115	-52	15	63

A seguir, desejando conhecer o comportamento de meia faixa, nas placas de dimensões 7 x 60 cm, retiradas das bordas do modelo inicial procedendo-se ao seu carregamento no ponto central, C, figura 20.

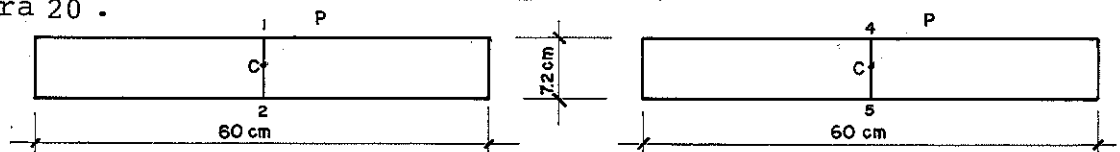


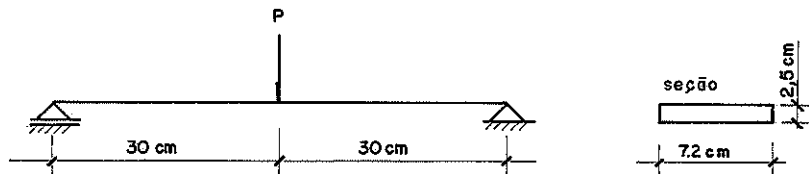
Fig. 20

A tabela 7 apresenta os resultados do ensaio para as cargas correspondentes a meia faixa de tráfego.

Tabela 7-

FLECHAS EM 0,01 MILÍMETROS							
Pontos Carga N	1	c	2		4	c	5
0	0	0	0		0	0	0
91,5	98	97	97		74	73	73
183	169	168	158		139	139	139
247,5	239	240	240		205	205	205

Neste ensaio foram obtidas flechas das bordas iguais às do ponto central. Pode-se notar o comportamento de viga na meia faixa de tráfego, determinando-se o módulo de elasticidade do modelo. Tem-se:



Módulo de elasticidade de meia faixa de tráfego.

$$E_{12} = \frac{PI^3}{48\Delta FI}$$

$$\Delta F = 0,142 \text{ cm}$$

$$P = 18,3 \text{ daN}$$

$$I = 9,114 \text{ cm}^4$$

$$E_{12} = 6363 \text{ MPa}$$

$$E_{45} = \frac{PI^3}{48\Delta FI}$$

$$\Delta F = 0,132 \text{ cm}$$

$$P = 18,3 \text{ daN}$$

$$I = 9,114 \text{ cm}^4$$

$$E_{34} = 6845 \text{ MPa}$$

Procurou-se recuperar o modelo inicial de dimensões 28,8x 60cm, colando as partes cortadas de dimensões 7 x 60 cm, recuperando-se a placa 28,8 x 60,0 cm². Fig. 21.

Instalando-se a placa de madeira sobre os apoios fez-se o carregamento no centro da placa até a ruptura do modelo.

O modelo de duas faixas de tráfego rompeu-se totalmente, com uma carga de 8,235 KN.

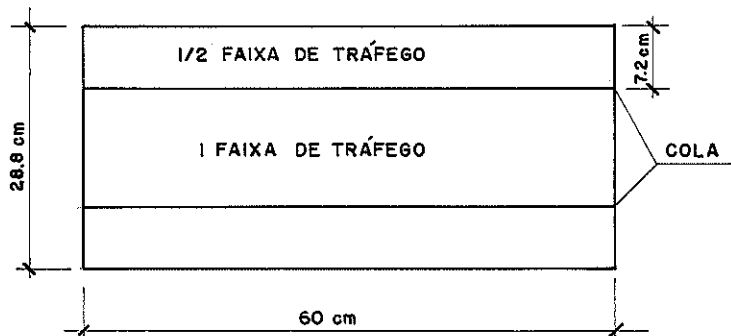


Fig. 21 - Colagem das faixas de tráfego

3.2.1.1- Análise preliminar do modelo reduzido 1:33,3

- Modelo com duas faixas de tráfego (28,8 x 60 cm)

Na tabela 2 observa-se que para o carregamento no centro da placa de madeira, há contribuição de toda a seção transversal na distribuição da carga. As flechas na borda do modelo (pontos 1 e 5) são aproximadamente 2/3 da flecha central (ponto 3). Como o conjunto apresenta a rigidez transversal, pode-se presumir que as bordas do modelo recebem grande parcela da carga aplicada no centro.

Para atingir a flecha admissível de 1,71 mm com carregamento do centro (ponto 3) do modelo foi necessário uma carga aproximada de 680 N, correspondente, no protótipo, a uma carga de 754KN.

Na tabela 3, com o carregamento no ponto 4, centro de uma faixa de tráfego, nota-se a contribuição de toda seção transversal da placa de madeira, um pouco menor na borda mais afastada do ponto de aplicação da carga.

A flecha admissível não ocorre sob o ponto de carregamento, mas na borda mais próxima deste.

Para se atingir esta flecha, 1,71 mm, com carregamento no ponto 4, foi necessária uma carga de 500 N, inferior ao carregamento no ponto 3, centro do modelo, de 680 N.

Na tabela 4, com o carregamento na borda do modelo, ponto 5, houve inversão de flechas na borda oposta. Para este tipo de carregamento não há grande contribuição da seção transversal na distribuição da carga, apresentando grandes flechas para pequenos carregamentos.

Atingiu-se a flecha admissível de 1,71 mm, com um carregamento

de aproximadamente 300 N.

- Modelo com uma faixa de tráfego (14,4 x 60 cm)

A figura 19 mostra o modelo com uma faixa de tráfego, tendo como centro o ponto 3 e as bordas, os pontos 2 e 4 da seção transversal.

Executando-se o carregamento no centro da placa de uma faixa de tráfego, observa-se (tabela 5) uma boa distribuição da carga em toda a seção transversal, ocorrendo os valores das flechas do centro do modelo de placa maciça de madeira.

Para o modelo de uma faixa de tráfego, com carregamento de 440 N, no centro da placa, atingiu-se a flecha admissível.

Na tabela 6, o carregamento em uma das bordas do modelo, apresenta uma pequena inversão da flecha na borda oposta. Atingiu-se a flecha admissível com um carregamento de 240 N.

- Modelo com meia faixa de tráfego (7,2 x 60 cm)

Os modelos com meia faixa de tráfego inicial de dimensões 28,8 x 60 cm.

Na tabela 7, observa-se que o modelo apresenta as mesmas flechas em toda seção transversal central, para um carregamento central, podendo assim admitir o seu comportamento como viga.

Com os modelos de faixa de tráfego possuem módulo de elasticidade ligeiramente diferentes, as flechas nas bordas do modelo inicial (28,8 x 60 cm) não são exatamente iguais.

A tabela 8 mostra a capacidade de carga de cada modelo, com carregamento centrado, para atingir a flecha admissível.

Tabela 8-

Faixa de Tráfego	1/2	1	2
Carga N	212	440,5	680
Porcentagem de Carga	48,2%	100%	154,4%

Na figura 22 é apresentado esquematicamente o resultado do carregamento comparativo entre as placas ensaiadas.

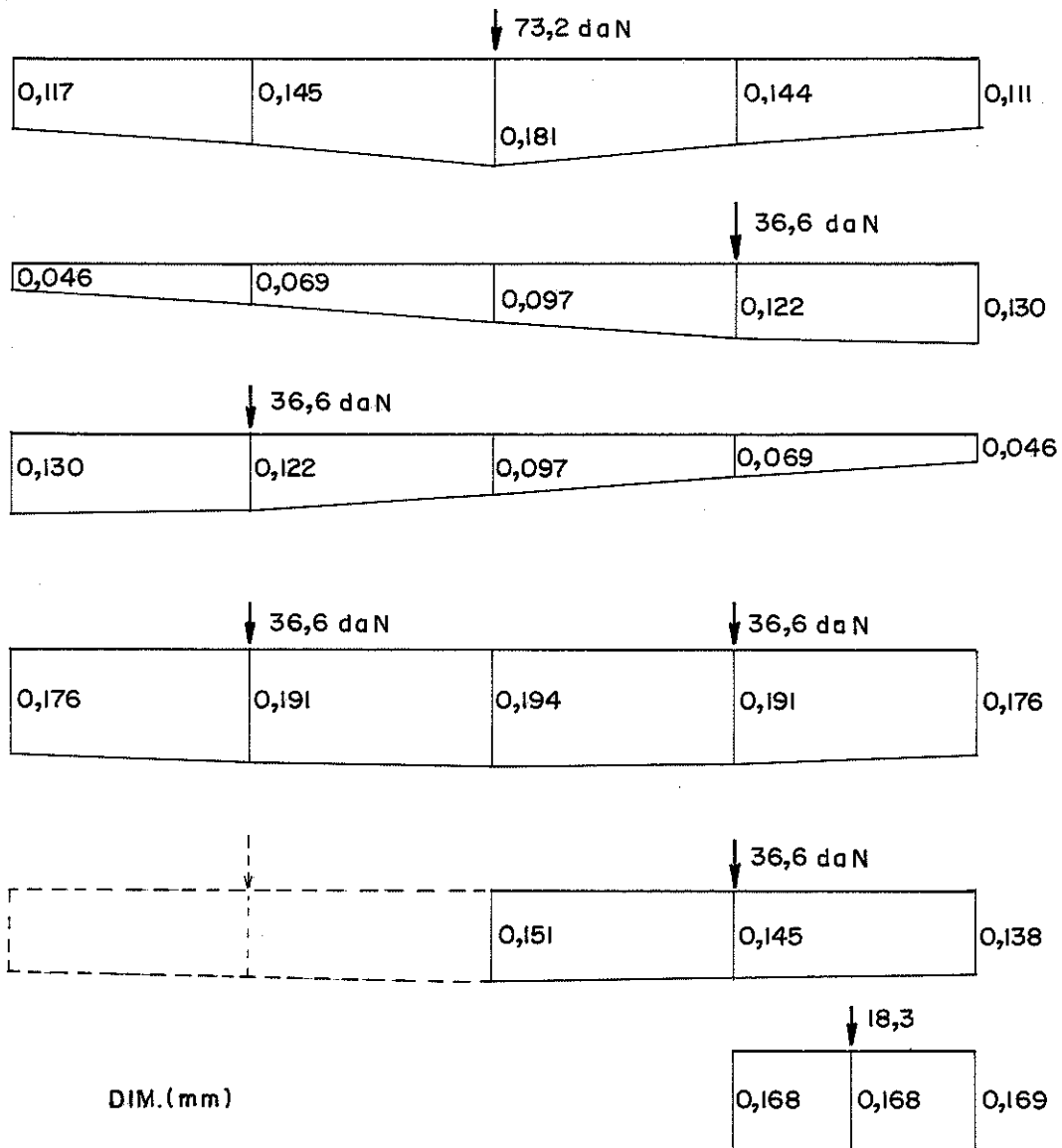


Fig. 22

3.2.2- Ensaio do modelo 1:20

O modelo reduzido (1:33,3), constituído por uma peça inteira de Pinho do Paraná, medindo 2,5 x 28,8 x 60,0 cm³ evidenciou possibilidade de comportamento como placa, capacidade elevada e incentivando a realização de um ensaio mais elaborado.

Na montagem do segundo modelo, escolheu-se, uma prancha de Pinho do Paraná isenta de defeitos, da qual foram retiradas três peças de dimensões 4 x 20 x 100 cm³. Estas peças foram aparelhadas e coladas lateralmente, formando, assim, o modelo da ponte de madeira maciça 4 x 60 x 100 cm³ representando o protótipo de

0,80 x 12,0 x 20,0 m³, na escala 1:20.

Este modelo representa duas faixas de tráfego de 4,0 m, mais duas passarelas de 2,0 m cada uma.

Considerando-se seção transversal do modelo como constituído por cinco vigas de 12 cm cada, foram traçadas as linhas R₁, R₂, R_C, R₄ e R₅ no centro de cada uma destas vigas hipotéticas. Na seção longitudinal foram marcadas as linhas L₁, L₂ ... L₉ de 10 em 10 cm. Os cruzamentos das linhas R e L das duas seções, foram escolhidos para o carregamento e para a leituras de flechas do modelo, totalizando 45 pontos, fig.23.

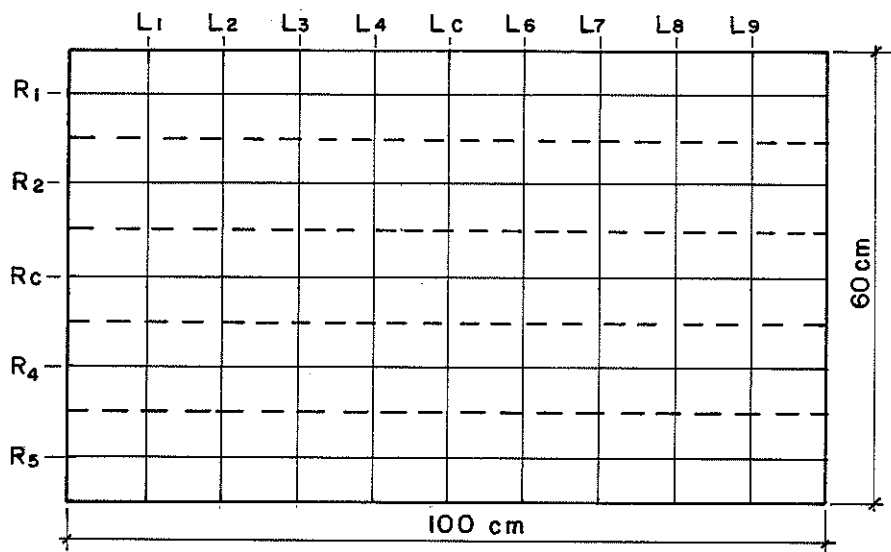


Fig. 23- Pontos de carregamento e de leituras de flechas

Neste modelo foi simulado o mesmo tipo de apoio existente no modelo 1:33,3, mostrado anteriormente nas figuras 16 e 17.

Devido à simetria do modelo, os carregamentos foram realizados em apenas meia placa, mas a leitura das flechas foi feita em toda a sua extensão.

No estudo do modelo, limitou-se o carregamento em função da flecha admissível.

Foram montadas duas peças com cinco relógios comparadores, em cada uma, para leitura das flechas no centro de cada viga hipotética da seção transversal. Fig. 24.

Para se efetuar o carregamento, utilizou-se um cilindro hidráulico de dez toneladas, um anel dinamométrico de constante igual a 47,5 N por divisão, e uma pequena peça metálica para a distribuição da carga, evitando-se, assim, esmagar as fibras da madeira do modelo. Fig. 25.

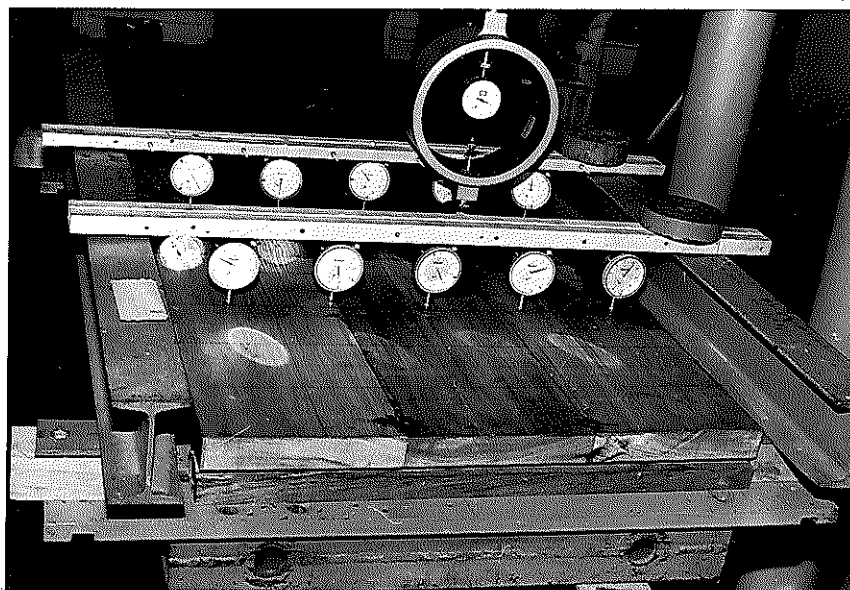


Fig.24- Leitura de flechas do modelo

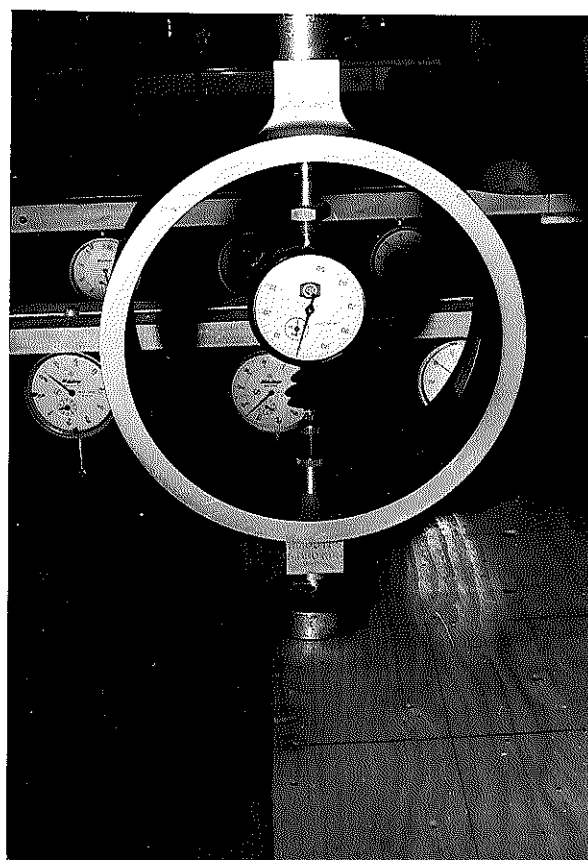


Fig. 25 - Leitura do carregamento

Nas linhas L_C e L_4 fez-se uma série de carregamento, até atingir uma flecha de 1 mm, procedendo-se à leitura de todas as flechas do modelo. Com nova série de carregamentos até atingir a flecha de 2 mm, fez-se, mais uma vez a leitura de todas as flechas do modelo. Finalmente, nova série de carregamentos até a flecha admissível, de 3 mm, permitiu a leitura de todas as flechas.

Nas linhas L_3 e L_2 foram realizados apenas dois carregamentos, para 1 e 2 mm de flecha, obtendo-se todas as flechas do modelo.

As tabelas 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 respectivas figuras 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 das linhas de flechas equivalentes apresentam os resultados dos ensaios com carregamentos concentrado nos pontos indicados.

Tabela 9- Carregamento na interseção das linhas L_C com R_C

Carga N	Linha		Leitura dos Relógios Comparadores				
	L	R	R_1 mm/100	R_2 mm/100	R_C mm/100	R_4 mm/100	R_5 mm/100
1045 2233 3468	L_1		12	14	24	23	20
			25	37	51	47	38
			39	59	77	70	53
1045 2233 3468	L_2		36	44	60	52	38
			64	89	110	94	66
			90	132	162	136	95
1045 2233 3468	L_3		35	64	79	65	47
			70	120	149	119	82
			106	179	222	176	119
1045 2233 3468	L_4		39	74	96	75	54
			79	139	185	139	94
			118	205	275	203	135
1045 2233 3468	L_C		35	68	100	73	52
			85	137	200	137	93
			119	209	300	205	135

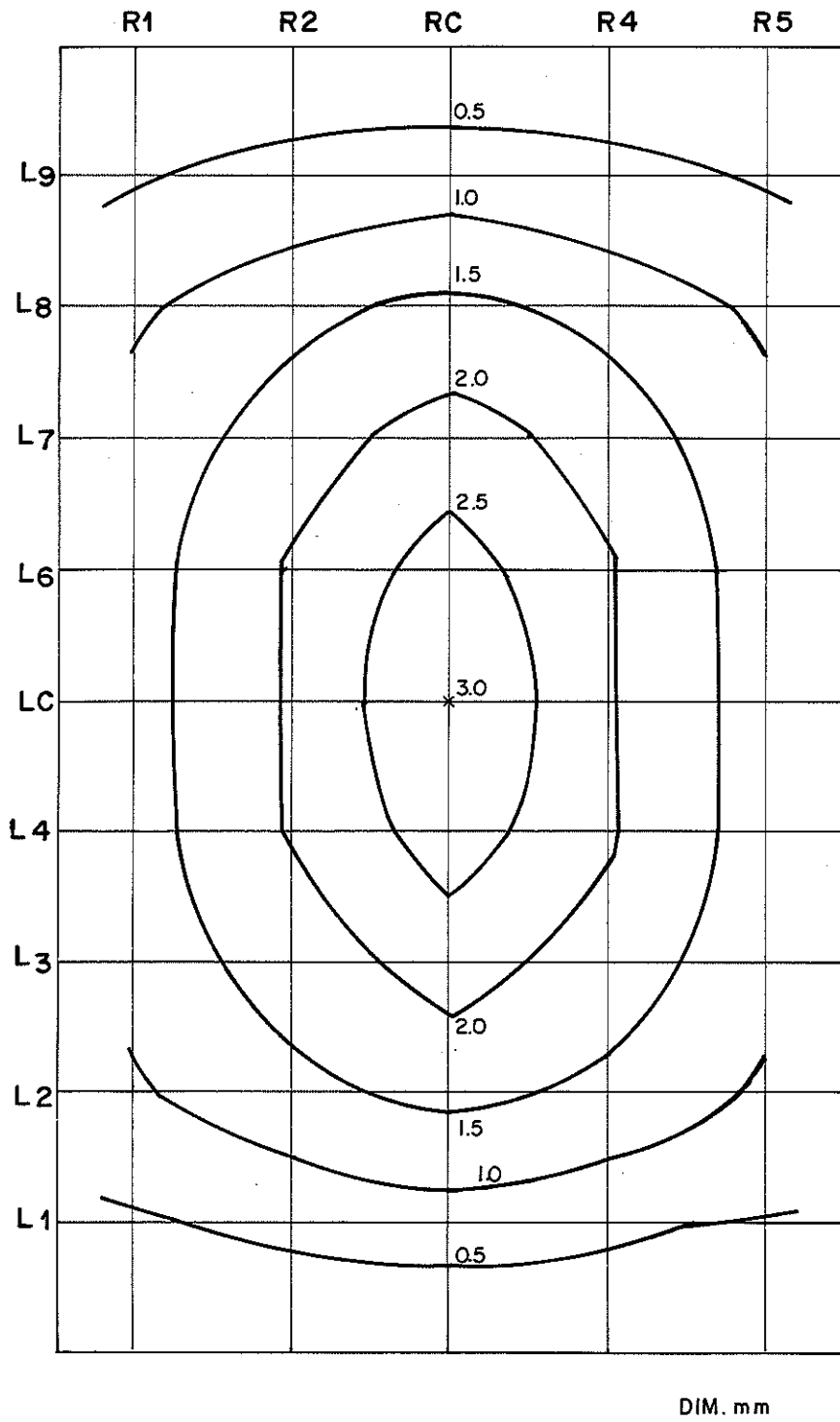


Fig. 26-Representação das curvas de nível.
Carregamento no ponto $L_c \times R_c$.

Tabela 10- Carregamento na interseção das linhas L_C com R_2

Carga N	Linha	Leitura dos Relógios Comparadores				
	R L	R_1 mm/100	R_2 mm/100	R_C mm/100	R_4 mm/100	R_5 mm/100
1092	L_1	45	37	29	20	12
2880		68	59	46	30	14
3515		91	83	64	40	15
1092	L_2	66	56	43	22	15
2880		115	105	78	46	22
3515		165	154	113	65	26
1092	L_3	67	73	52	30	14
2880		137	142	102	56	25
3515		206	213	150	81	30
1092	L_4	89	90	63	34	15
2880		173	177	123	66	28
3515		257	266	183	95	34
1092	L_C	103	100	76	44	20
2880		195	200	144	79	30
3551		286	300	212	111	37

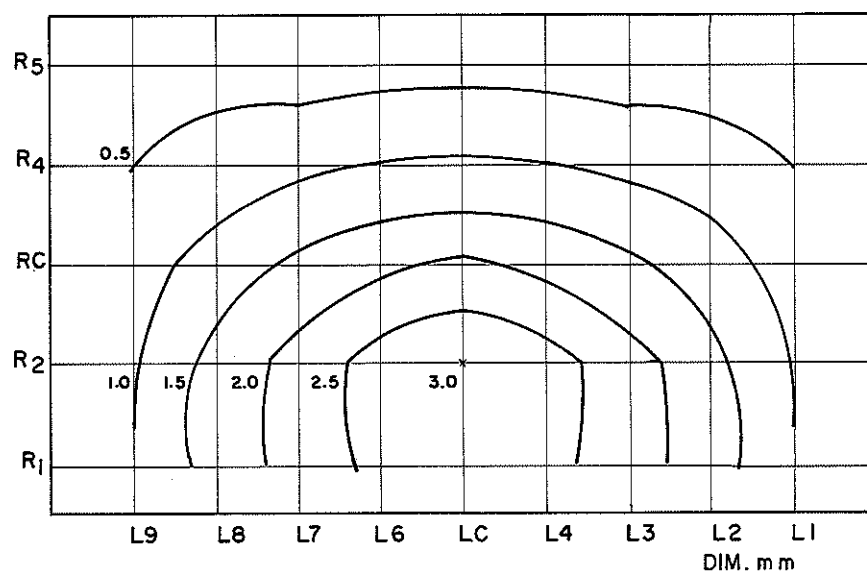


Fig.27 - Representação das curvas de nível
Carregamento no ponto L_C x R_2

Tabela 11- Carregamento na interseção das linhas L_C com R_1

Carga N	Linha	Leitura dos Relógios Comparadores				
	R L	R_1 mm/100	R_2 mm/100	R_C mm/100	R_4 mm/100	R_5 mm/100
475	L_1	48	12	-6	-33	-61
1140		75	23	-16	-68	-122
1710		92	28	-10	-70	-129
475	L_2	69	27	-3	-32	-60
1140		119	51	-7	-65	-119
1710		155	67	-7	-73	-136
475	L_3	70	23	-9	-40	-67
1140		138	54	-10	-72	-125
1710		197	84	-2	-79	-144
475	L_4	89	37	-4	-35	-61
1140		173	75	-2	-61	-121
1710		249	115	12	-73	-144
475	L_C	100	53	-9	-60	-107
1140		200	102	-4	-80	-166
1710		300	147	-3	-145	-234

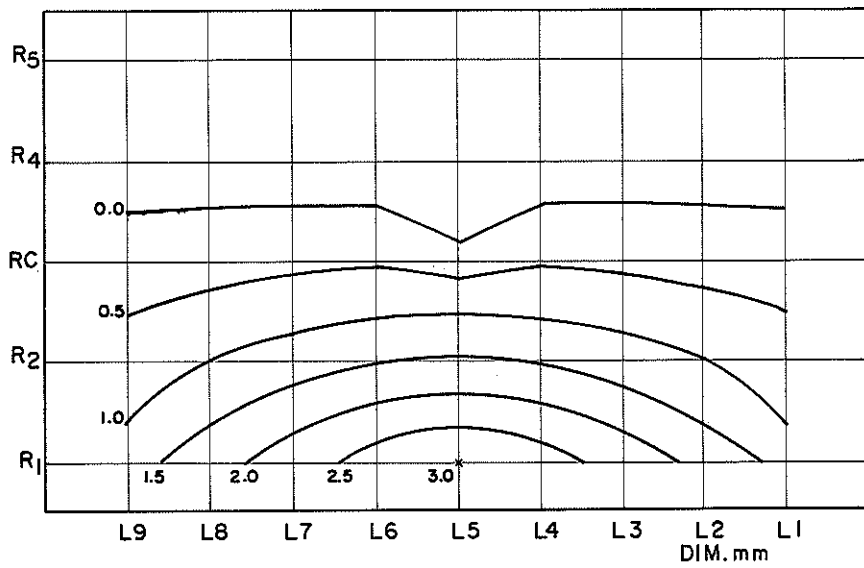


Fig. 28 - Representação das curvas de nível.
Carregamento no ponto L_C x R_1

Tabela 12- Carregamento na interseção das linhas L₄ com R_C

Carga N	Linha	Leitura dos Relógios Comparadores				
	R L	R ₁ mm/100	R ₂ mm/100	R _C mm/100	R ₄ mm/100	R ₅ mm/100
1140	L ₁	57	54	55	52	35
2375		113	114	117	110	86
3705		157	163	168	156	115
1140	L ₂	55	74	79	69	59
2375		117	147	161	135	114
3705		165	219	232	198	158
1140	L ₃	57	81	95	75	62
2375		122	165	195	155	120
3705		172	238	287	226	166
1140	L ₄	59	80	100	78	64
2375		124	159	200	151	115
3705		181	248	300	220	158
1140	L _C	60	80	100	83	57
2375		122	145	210	167	115
3705		173	237	315	246	166
1140	L ₆	57	77	94	84	59
2375		110	149	183	158	110
3705		153	215	274	228	154
1140	L ₇	45	59	74	71	58
2375		86	120	146	134	101
3705		123	174	219	193	134
1140	L ₈	35	43	57	58	51
2375		63	85	103	100	73
3705		90	121	153	142	99
1140	L ₉	18	19	29	36	39
2375		33	41	55	60	50
3705		47	65	81	84	64

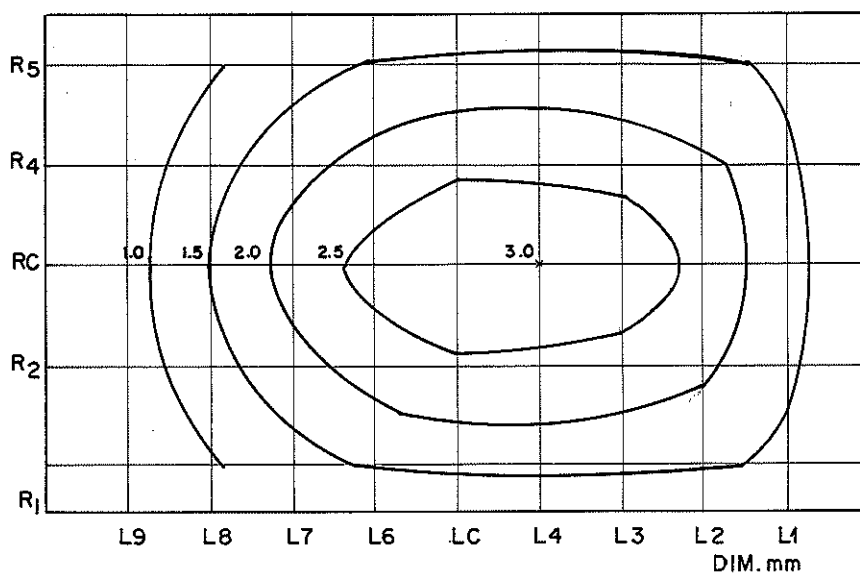


Fig. 29- Representação das curvas de nível Carregamento no ponto L₄ x L_C

Tabela 13- Carregamento na intersecção das linhas L₄ com R₁

Carga N	Linha		Leitura dos Relógios Comparadores				
	L	R	R ₁ mm/100	R ₂ mm/100	R _C mm/100	R ₄ mm/100	R ₅ mm/100
47	L ₁		87	69	54	35	29
997			149	115	85	55	28
1567			192	153	118	85	54
47	L ₂		95	73	51	33	20
997			174	128	83	45	13
1567			260	173	118	70	31
47	L ₃		101	72	58	22	5
997			198	131	75	33	-4
1567			282	186	110	51	3
47	L ₄		100	60	25	2	-18
997			200	115	39	-19	-72
1567			300	153	18	-91	-190
47	L _C		101	63	27	4	-21
997			197	126	54	8	-35
1567			296	158	87	14	-44
47	L ₆		85	58	28	6	-9
997			178	118	51	6	-25
1567			262	174	78	9	-38
47	L ₇		76	50	24	3	-8
997			154	99	40	-3	-33
1567			228	149	60	-10	-172
47	L ₈		51	33	13	-4	-16
997			123	75	28	-13	-45
1567			177	105	34	-35	-100
47	L ₉		41	21	5	-10	-23
997			91	48	10	-27	-65
1567			130	68	6	-59	-123

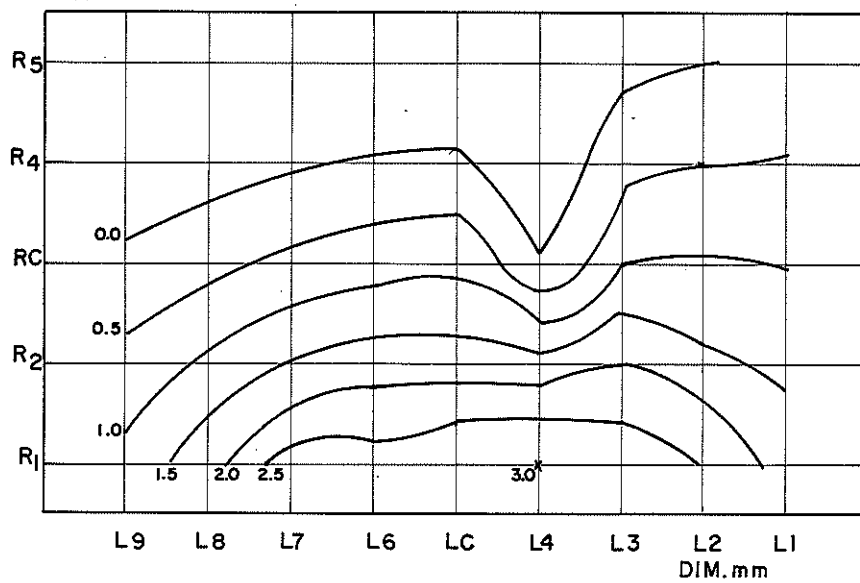


Fig. 30 - Representação das curvas de nível. Carregamento no ponto L₄ x R₁

Tabela 14- Carregamento na interseção das linhas L₃ com R_C

Carga N	Linha	Leitura dos Relógios Comparadores				
	R L	R ₁ mm/100	R ₂ mm/100	R _C mm/100	R ₄ mm/100	R ₅ mm/100
807 1900	L ₁	77 165	101 200	105 209	108 204	100 183
807 1900	L ₂	84 173	111 220	124 245	113 220	106 193
807 1900	L ₃	53 100	80 159	100 200	85 166	70 140
807 1900	L ₄	86 170	112 224	131 269	118 234	95 188
807 1900	L _C	71 148	100 204	116 245	106 218	76 165
807 1900	L ₆	65 130	92 184	112 225	105 206	82 164
807 1900	L ₇	52 103	77 151	98 195	94 186	62 133
807 1900	L ₈	30 70	60 116	79 159	75 155	51 110
807 1900	L ₉	20 40	50 89	70 128	60 71	28 52

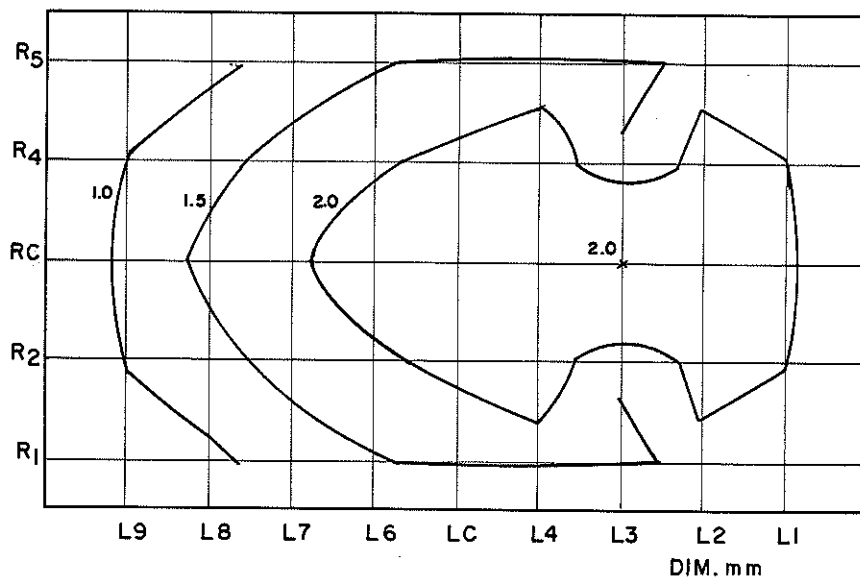


Fig. 31- Representação das curvas de nível.
Carregamento no ponto L₃ x R_C

Tabela 15- Carregamento na interseção das linhas L₃ com R₁

Carga N	Linha		Leitura dos Relógios Comparadores				
	L	R	R ₁ mm/100	R ₂ mm/100	R _C mm/100	R ₄ mm/100	R ₅ mm/100
665 1520	L ₁		75 131	64 111	50 89	39 74	29 60
665 1250	L ₂		100 183	75 131	50 90	37 68	21 45
665 1250	L ₃		100 200	68 116	36 38	12 -25	-8 -41
665 1250	L ₄		117 235	77 153	44 84	22 33	4 3
665 1250	L _C		110 226	70 146	33 70	9 18	-6 -21
665 1250	L ₆		93 178	57 114	25 49	-3 -2	-33 -44
665 1250	L ₇		84 175	51 108	20 40	-6 -15	-30 -70
665 1250	L ₈		58 128	30 70	5 11	-18 -45	-40 -97
665 1250	L ₉		56 88	20 42	-3 -9	-24 -63	-47 -120

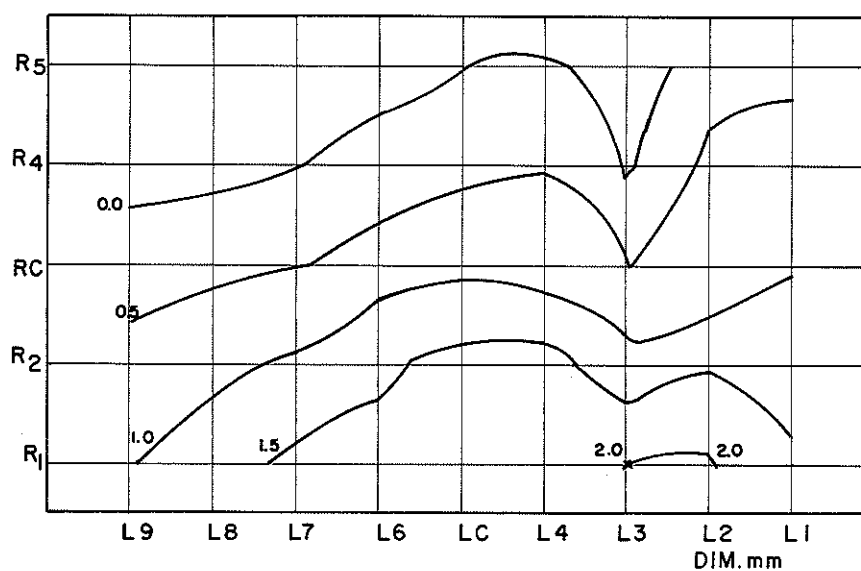


Fig. 32 - Representação das curvas de nível.
Carregamento no ponto L₃ x R₁

Numa segunda etapa, fêz-se o carregamento do modelo com a aplicação de duas cargas concentradas, simulando um trem tipo de duas rodas, tendo seu ponto central nas linhas indicadas, fig. 33.

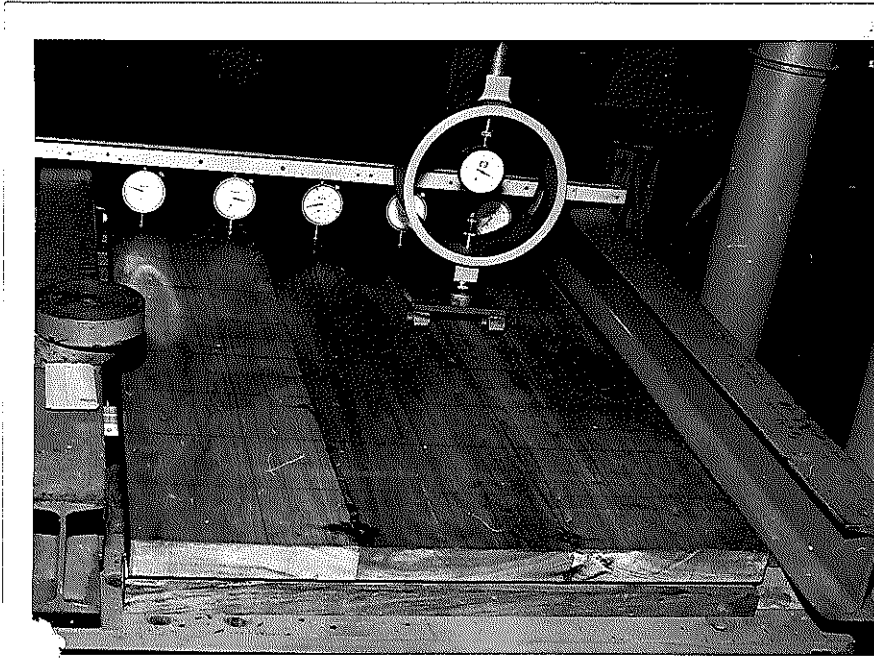


Fig. 33- Carregamento com trem-tipo de duas rodas

Os resultados dos ensaios com trem-tipo de duas rodas e as linhas de flechas equivalentes são apresentadas nas figuras 34, 35 e nas tabelas 16 e 17 respectivamente.

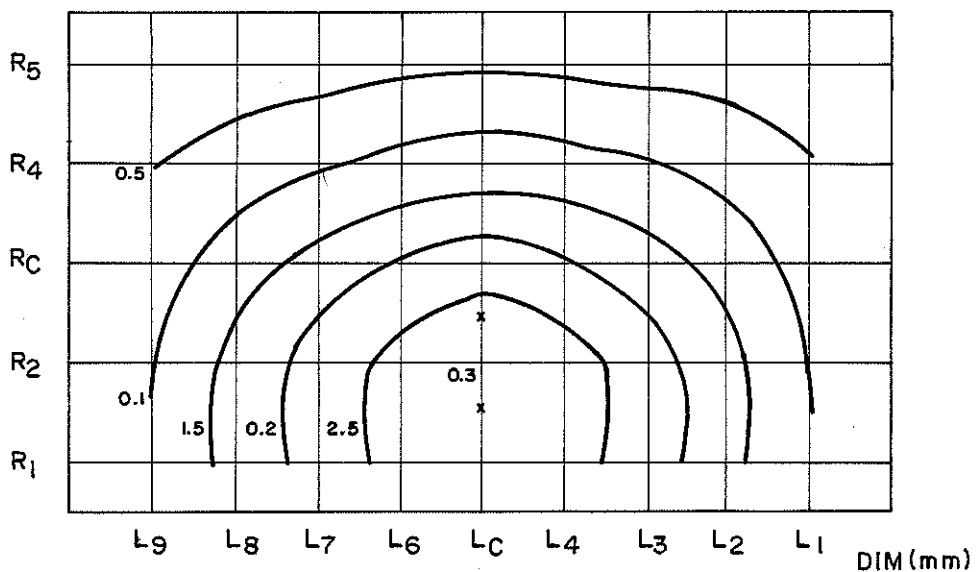


Fig. 34- Representação das curvas de nível.
Carregamento com o trem-tipo colocado na linha Lc, à esquerda.

Tabela 16- Carregamento na interseção das linhas L_C com R₂

Carga N	Linha		Leitura dos Relógios Comparadores				
	L	R	R ₁ mm/100	R ₂ mm/100	R _C mm/100	R ₄ mm/100	R ₅ mm/100
1140 2375 3610	L ₁		34	28	28	23	12
			64	55	53	43	23
			92	84	76	60	30
1140 2375 3610	L ₂		55	55	44	33	14
			110	105	88	62	22
			142	156	128	88	35
1140 2375 3610	L ₃		73	68	55	35	5
			148	142	118	72	19
			228	218	178	110	35
1140 2375 3610	L ₄		83	75	56	33	10
			172	174	130	78	30
			258	277	201	119	50
1140 2375 3610	L _C		100	100	75	35	20
			200	200	151	86	30
			299	300	229	125	45
1140 2375 3610	L ₆		90	97	71	40	16
			175	185	143	81	33
			253	269	211	123	52
1140 2375 3610	L ₇		69	70	52	22	5
			140	149	115	64	31
			207	219	174	97	35
1140 2375 3610	L ₈		65	59	47	29	11
			118	113	94	54	19
			156	163	136	80	25
1140 2375 3610	L ₉		22	34	30	20	6
			55	66	56	37	10
			90	95	80	51	11

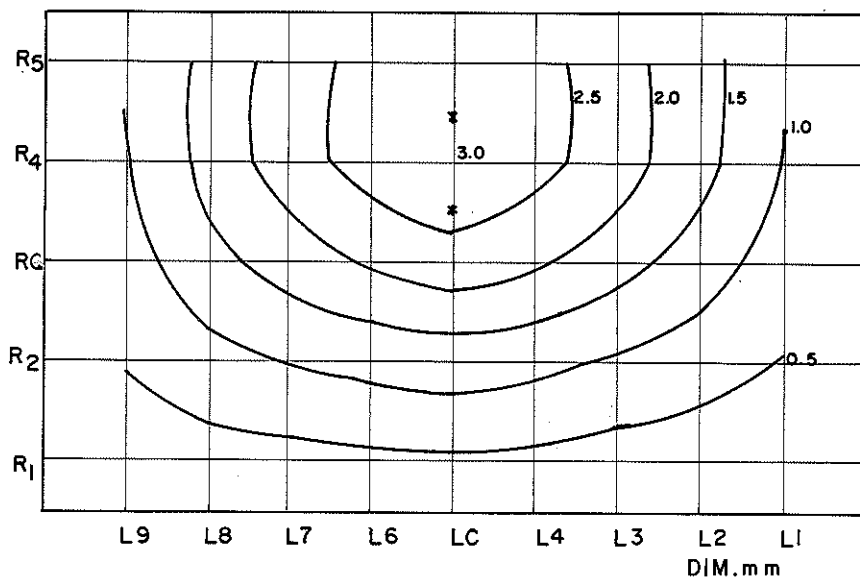


Fig. 35-Representação das curvas de nível.
Carregamento com trem-tipo colocado na linha L_C, à direita.

Tabela 17- Carregamento na interseção das linhas L_C com R_4

Carga N	Linha		Leitura dos Relógios Comparadores				
	R	L	R ₁ mm/100	R ₂ mm/100	R _C mm/100	R ₄ mm/100	R ₅ mm/100
1090 2280 3515	L ₁		3	17	30	42	41
			8	32	57	76	70
			12	48	84	110	114
1090 2280 3515	L ₂		9	26	48	62	65
			18	53	92	120	117
			26	80	137	176	179
1090 2280 3515	L ₃		5	33	58	78	58
			18	69	116	155	139
			29	101	170	231	220
1090 2280 3575	L ₄		4	35	65	90	94
			18	73	133	183	188
			31	112	201	276	280
1092 2280 3515	L _C		12	42	83	100	116
			27	81	156	200	220
			43	122	232	300	320
1092 2280 3515	L ₆		10	55	65	88	95
			22	71	131	179	188
			31	107	200	271	280
1092 2280 3515	L ₇		3	25	53	67	71
			8	55	107	143	150
			19	86	166	222	228
1092 2280 3515	L ₈		1	25	42	56	64
			8	48	85	112	123
			8	68	124	167	180
1092 2280 3515	L ₉		0	18	26	35	46
			2	34	51	70	84
			-1	47	75	100	118

Na etapa seguinte, foram cortadas as duas faixas corresponsáveis às passarelas de 10 cm cada, ficando, o modelo com as dimensões 4 x 40 x 100 cm³. Realizou-se o ensaio com o trem-tipo de duas rodas, centrado em uma faixa de tráfego. Através das flechas obtidas, pode-se avaliar a influência da passarela no modelo. Fig. 36 .

Os resultados dos ensaios com trem-tipo de duas rodas e as linhas de flechas equivalentes é apresentada na figura 37 e na tabela 18 respectivamente.

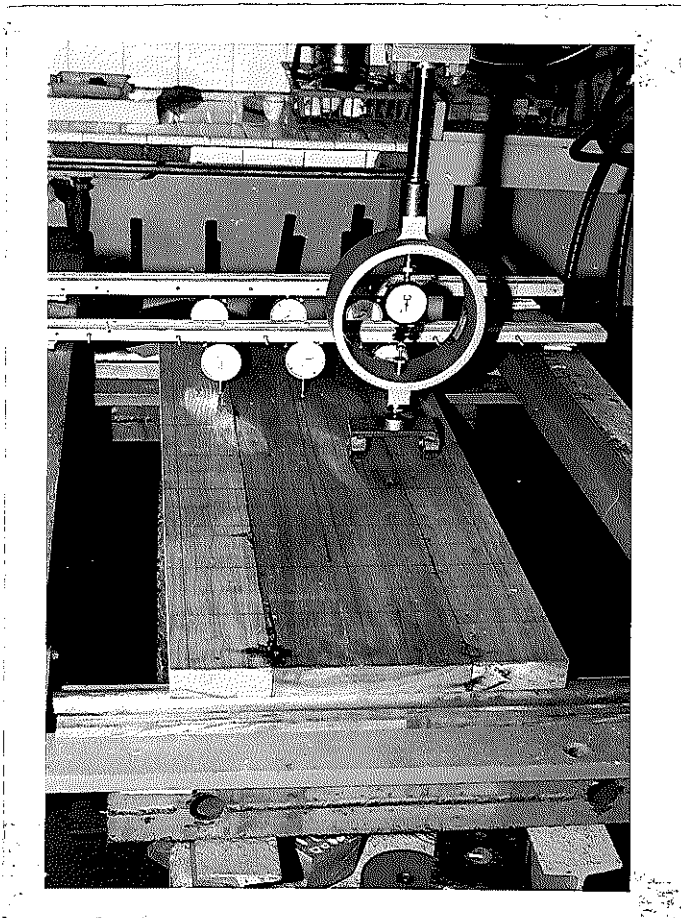


Fig. 36- Modelo sem passarela, carregamento com trem-tipo

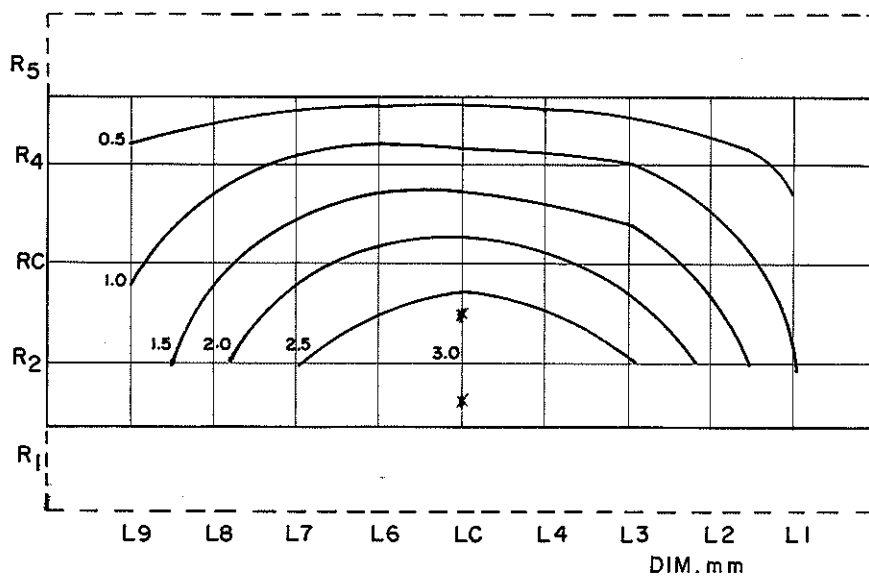


Fig. 37-Representação das curvas de nível.
Carregamento com o trem-tipo colocado na linha L_C ,
à esquerda.

Tabela 18- Carregamento na interseção das linhas L_C com R₂

Carga N	Linha		Leitura dos Relógios Comparadores				
	L	R	R ₁ mm/100	R ₂ mm/100	R _C mm/100	R ₄ mm/100	R ₅ mm/100
760 1615 2565	L ₁			48 70 105	28 50 75	16 30 41	
760 1615 2565		L ₂		65 122 184	46 88 132	27 50 73	
760 1615 2565			L ₃		85 169 251	62 119 176	33 71 96
760 1615 2565	L ₄				102 201 299	70 139 206	35 75 113
760 1615 2565		L _C			100 200 300	76 148 255	38 77 117
760 1615 2565			L ₆		99 195 290	80 150 222	48 90 130
760 1615 2565	L ₇				88 172 248	75 130 180	45 86 119
760 1615 2565		L ₈			74 135 192	60 108 150	40 69 94
760 1615 2565			L ₉		55 91 124	50 79 104	30 47 62

Um novo ensaio no modelo sem passarelas foi realizado fazendo-se o carregamento do modelo com dois trens-tipo, centrados, cada um, em uma faixa de tráfego. Fig. 38.

Este ensaio representa, dois caminhões no centro da ponte e os resultados, bem como as linhas de flechas equivalentes, são apresentados na tabela 19 e na figura 39 respectivamente.

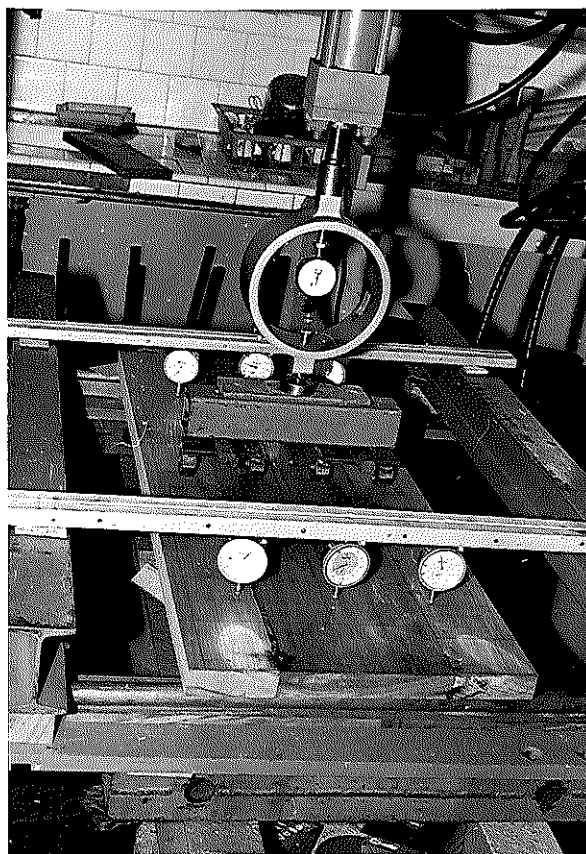


Fig. 38 - Carregamento do modelo sem passarela com trem-ti
po.

Tabela 19- Carregamento na interseção das linhas L_C com R_2 e
com R_4

Carga N	Linha	Leitura dos Relógios Comparadores				
	R L	R_1 mm/100	R_2 mm/100	R_C mm/100	R_4 mm/100	R_5 mm/100
1045	L_1		37	38	40	
2280			69	68	73	
3705			107	108	106	
1045	L_2		60	62	61	
2280			116	119	116	
3705			176	178	172	
1045	L_3		82	81	81	
2280			160	159	157	
3705			240	236	232	
1045	L_4		91	91	89	
2280			185	183	180	
3705			278	275	268	
1045	L_C		95	100	98	
2280			196	200	198	
3705			299	300	303	

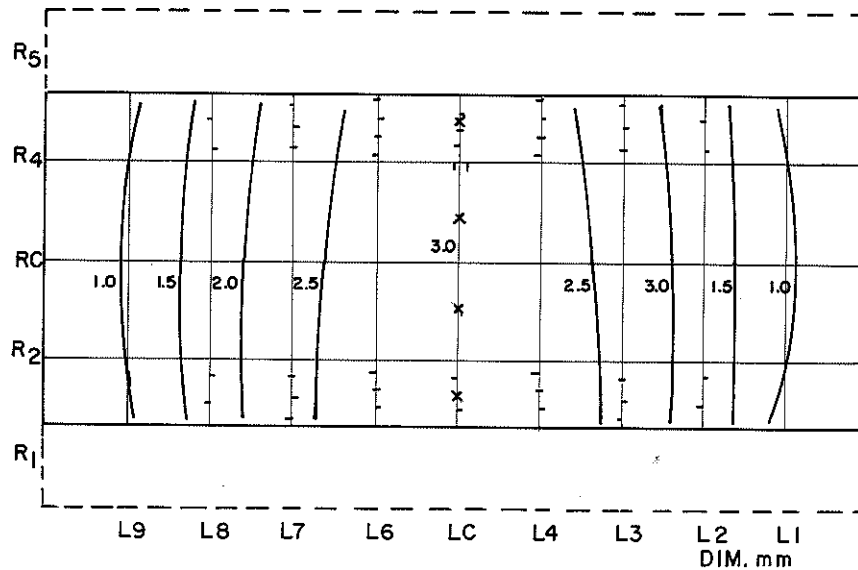


Fig. 39- Representação das curvas de nível.
Carregamento com dois trens-tipo na linha L_C

Completados todos os esquemas de carregamento e leitura de flechas, o modelo foi carregado através dos dois trens-tipo até atingir a ruptura. Colocou-se uma régua ao lado do modelo para medir a flecha no momento da ruptura.

A ruptura do modelo deu-se por compressão na parte superior, tração na parte inferior e cisalhamento. As partes coladas do modelo foram afetadas.

O modelo rompeu-se com uma carga de 30500 N e uma flecha aproximada de 2,80 cm.

A figura 40 mostra a ruptura do modelo por compressão, e a figura 41, a ruptura da parte inferior do modelo por tração.

3.2.2.1- Análise preliminar do modelo reduzido 1:20

Na figura 42, encontram-se os esquemas de carregamento e as elásticas das flechas na seção transversal central.

O modelo reduzido na escala 1:20 apresenta duas faixas de tráfego e duas passarelas, fig. 42 a.

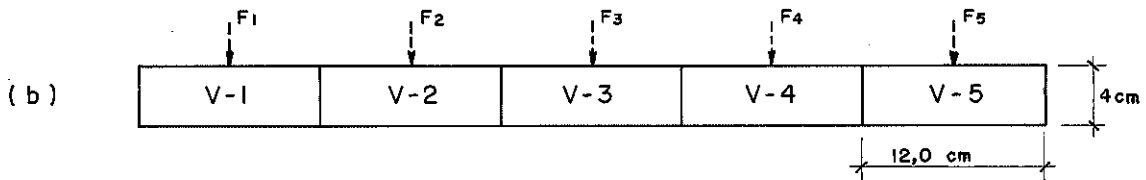
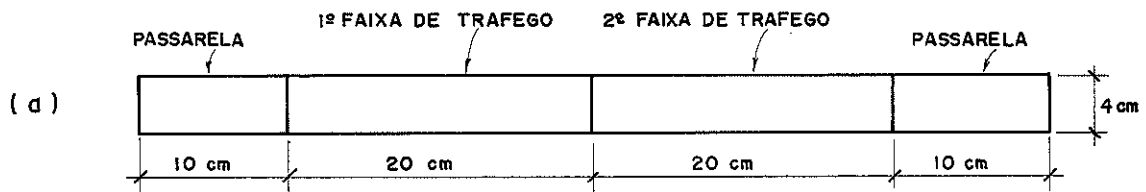


Fig. 40- Ruptura do modelo por flexão na fibra comprimida

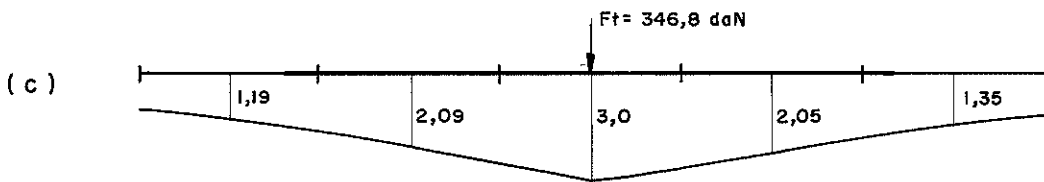


Fig. 41- Ruptura do modelo por flexão na fibra tracionada

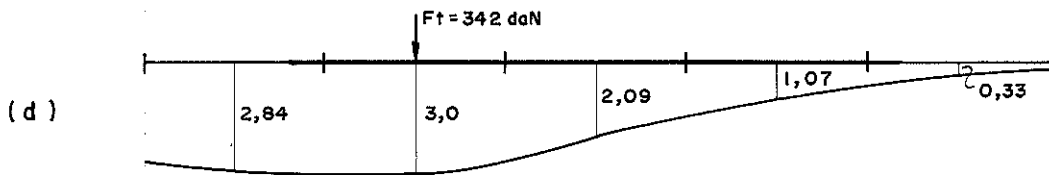
FIGURA 42 : CARREGAMENTO NA SEÇÃO TRASVERSAL - Modelo 1:20



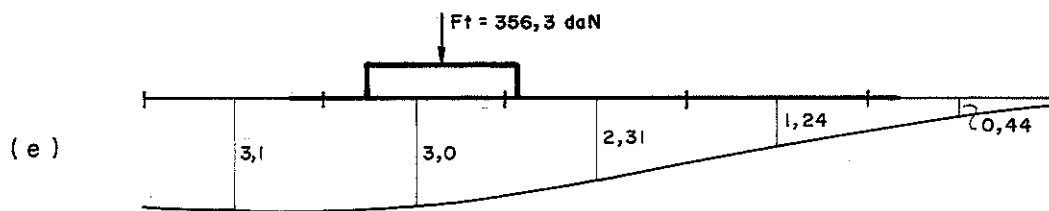
CARREGAMENTO NO CENTRO DO MODELO



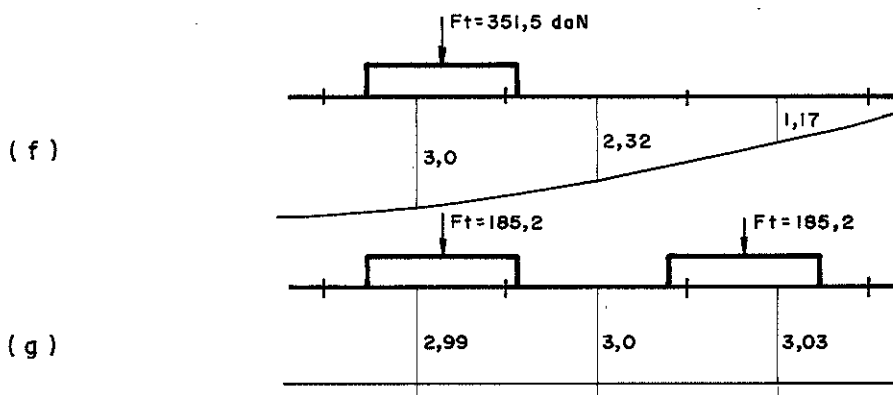
CARREGAMENTO NO CENTRO DA VIGA - 2



CARREGAMENTO COM TREM TIPO CENTRADO EM UMA FAIXA DE TRÁFEGO



MODELO SEM PASSARELA - TREM TIPO CENTRADO EM UMA FAIXA DE TRÁFEGO



Considerando-se a seção transversal como sendo composta por cinco vigas, figura 42b, pode-se calcular a parcela de carga $F_1, F_2 \dots F_5$ correspondente a cada viga através da expressão:

$$F_i = \frac{F_t \cdot a_i}{a_t} \quad \text{na qual}$$

F_i = carga no ponto desejado

F_t = carga total

a_i = flecha no ponto F_i

a_t = somatória de todas as flechas

No caso c, da fig. 42, para um carregamento de 3468 N, atingiu-se a flecha admissível com a contribuição de toda a seção transversal.

Para saber qual é a parcela de carga absorvida por uma determinada viga tem-se:

$$F_t = 3468 \text{ N} \qquad a_t = 9,68 \text{ mm} \quad \text{donde:}$$

$$\frac{F_t}{a_t} = 35,826 \quad \text{e} \quad F_i = 35,826 a_i$$

A parcela hipotética de carga correspondente a cada viga é apresentada na tabela 20 e as flechas correspondentes estão apresentadas na figura .

Tabela 20-

Viga	Flecha mm	Carga N	%
v1	1,19	426	12,2
v2	2,09	749	21,6
v3	3,00	1075	31,1
v4	2,05	734	21,2
v5	1,35	484	13,9
Soma	9,68	3468	100,0

Além da evidência experimental da distribuição não uniforme das flechas ao longo da seção transversal central da placa com carga concentrada no ponto central, destaca-se na tabela acima a distribuição de cargas equivalentes a carga total central, distribuídas ao longo da mesma seção.

No caso da carga aplicada no centro da viga v2, foi necessário um carregamento de 3420 N para se atingir a flecha admissível.

A tabela 21 apresenta a parcela de carga presumivelmente absorvida em cada viga e na figura 42 d tem-se a representação das flechas correspondentes.

Tabela 21

Viga	Carga N	%
v1	1041	30,4
v2	1100	32,2
v3	766	22,4
v4	392	11,5
v5	121	3,5

Desta maneira, pode-se estimar a contribuição previsível de cada viga, para uma carga concentrada aplicada para o centro da viga.

No caso e, da figura 42, tem-se a seção transversal com passarela carregada com o trem-tipo, simulando a existência de duas rodas.

Pode-se observar que para atingir a flecha admissível de 3,0 mm foi necessária uma carga de 3563 N, superior aos carregamentos anteriores, mostrando uma melhor distribuição com o trem-tipo.

A tabela 22 apresenta a carga absorvida pelas vigas.

Tabela 22

Viga	Carga N	%
v1	1095	30,7
v2	1095	29,7
v3	816	22,9
v4	438	12,3
v5	155	4,3

No caso f, da figura 42, tem-se a seção transversal sem as passarelas. Foi necessário um carregamento de 3515 N para se atingir a flecha admissível de 3,0 mm.

A tabela 23 apresenta a carga absorvida pelas vigas.

Tabela 23

Viga	Carga N	%
v2	1625	46,2
v3	1256	35,7
v4	634	18,0

Pode-se concluir, no caso e e f, que para atingir a mesma flecha admissível, os carregamentos são bem próximos, havendo pequena participação da passarela em relação ao valor do carregamento, mas contribuição significativa na diminuição da flecha. Entretanto a passarela só dará uma melhor contribuição quando o trem-tipo estiver bem próximo dela.

O caso g, da fig. 42, apresenta a seção transversal com dois trens-tipo, centrados, cada um, em uma faixa de tráfego.

Aplicando-se os carregamentos, a flecha manteve-se constante em toda a seção transversal. Para atingir a flecha admissível, a carga foi de 3704 N, bem superior aos ensaios anteriores.

Como as flechas tem distribuição uniforme ao longo de toda a seção transversal, pode-se admitir comportamento de viga para o modelo. Através da equação da flecha tem-se o módulo de elasticidade do modelo.

$$E = \frac{F_t \ell^3}{48 a I}$$

$$E = 12057 \text{ MPa}$$

O valor deste módulo de elasticidade é idêntico ao determinado através de um corpo de prova retirado do modelo.

4- ESTUDO DE MODELOS COMPOSTOS POR VIGAS

4.1- INTRODUÇÃO

Embora, através dos estudos anteriores a ponte de madeira em placa possa aparentar um comportamento estrutural ideal, sua construção torna-se impossível devido à inexistência de madeira nas dimensões necessárias.

Uma alternativa seria a composição de grandes vigas especiais, coladas umas às outras no sentido longitudinal constituindo, assim, a ponte de madeira em placa maciça. Entretanto, a dificuldade de fabricação de peças em tamanhos especiais tornaria a ponte muito onerosa. Construí-la com peças comerciais exigiria muitos planos de colagem, utilizando adesivos de alto custo, característica normal dos adesivos de elevada resistência ao intemperismo.

Hellmeister, 1978, apresentou a composição de tabuleiros feitos de postes de eucalipto para pontes em vigas (16).

A idéia de interligar os postes do tabuleiro através de pares de barras de aço de seção retangular de 1/4" x 2", convenientemente ajustadas, e parafusadas alternadamente nos postes, apresentou ótimos resultados.

Usando-se esse método na solidarização das vigas para compor a ponte de madeira notou-se que estas ligações não possuem a rigidez suficiente para dar o comportamento de placa ao conjunto.

Pensou-se na solidarização transversal das vigas de madeira como a próxima alternativa a ser estudada.

4.2- MODELO DE PONTE COMPOSTA POR VIGA DE PEROBA ROSA

No estudo anterior a altura da placa real de Pinho do Paraná atingiu 80 cm.

Para utilização da Peroba Rosa pensou-se nas vigas comerciais de seção 6 x 16 cm², com 5 m de comprimento, solidarizadas lateralmente.

Para construir um modelo em escala 1:4 usando 5 m de comprimento da viga de Peroba Rosa, fica-se limitado na altura da viga, a 16 cm. A largura correspondente no modelo a meia faixa de tráfego requer a utilização de 10 vigas, figura 43 .

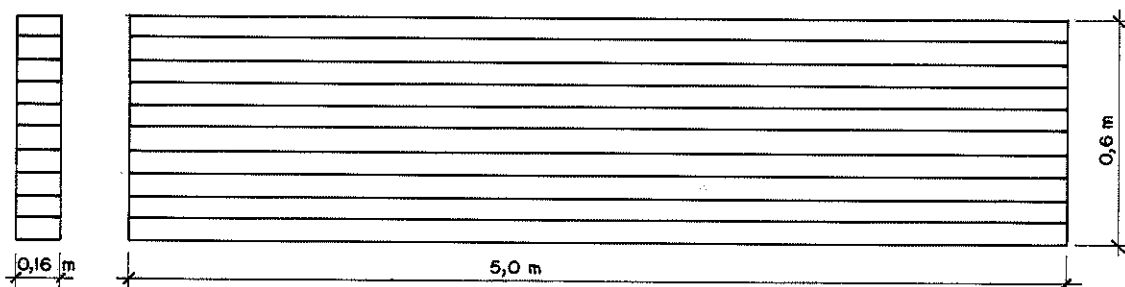


Fig. 43-Modelo Composto por 10 Vigas

Todos os modelos foram construídos com 16 cm de altura , ficando o protótipo com altura de 64 cm.

Trinta vigas de Peroba Rosa, madeira seca ao ar, foram submetidas a um ensaio não destrutivo, de flexão, figura 44.

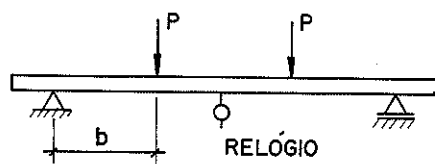


Fig. 44 -Ensaio não destrutivo, de flexão

$$E = \frac{Pb}{24\Delta_a I} (3l^2 - 4b^2)$$

$$\Delta_a = a \text{ final} - a \text{ inicial}$$

Em seguida, foram escolhidas dez vigas tendo módulos de elasticidade aproximadamente iguais, na tentativa de se obter vigas com as mesmas características físicas e mecânicas.

A tabela 24 apresenta os módulos de elasticidade e os pesos das vigas escolhidas.

Ensaiou-se, a seguir, cada viga à flexão simples até atingir a flecha admissível $a = l/350 = 1,43$ cm, medindo a carga para atingir esta flecha.

Tabela 24

Viga	E MPa	Peso N	Viga	E MPa	Peso N
1	18986	363	6	17815	350
2	17456	364	7	18989	344
3	17979	357	8	16549	359
4	18470	361	9	19581	368
5	17066	314	10	18868	339

4.3- ESTUDO DAS LIGAÇÕES TRANSVERSAIS NAS VIGAS POR ANÉIS METÁLICOS

Em trabalhos desenvolvidos no LaMEM a ligação de peças estruturais de madeira por anéis metálicos - (15,17), são apresentados os estudos relativos aos tipos de anéis, capacidade de carga, altura, espaçamentos, diâmetros mínimo e máximo, montagem e utilização dos anéis metálicos.

Os ensaios de peças de madeira interligadas por anéis metálicos demonstraram relativamente pequenas deformações nas ligações e grande capacidade de carga dos anéis.

Para interligar, lateralmente, as vigas entre si por anéis metálicos, deve-se levar em conta o espaçamento entre as linhas de anéis e os diâmetros dos anéis a serem utilizados. Fig. 45 .

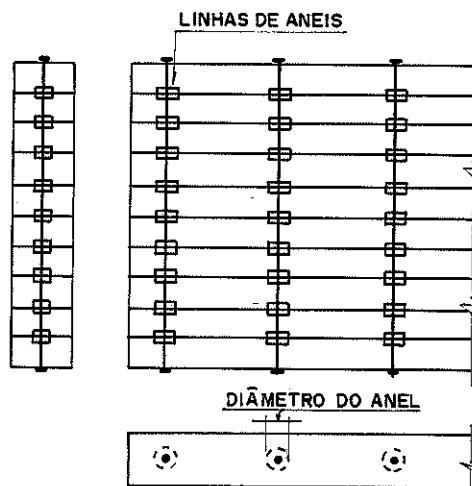


Fig. 45-Vigas interligadas por anéis metálicos

A capacidade de carga admissível do anel metálico está relacionada com seu diâmetro, e com a espécie de madeira utilizada. Existem valores tabelados para anéis de 3", 4" e 5" para as espécies de madeira: Pinho do Paraná, Peroba Rosa e Eucalipto Citriodora, (17)

Para os anéis de diâmetro maiores, ou para outras espécies de madeira a capacidade de carga admissível do anel metálico pode ser calculada pela equação geral:

$$\bar{F}_{0^0} = \frac{\pi \phi^2}{4} \bar{\tau}$$

$$\bar{F}_{90^0} = 0,6 \bar{F}_{0^0} \quad \text{sendo}$$

F_{0^0} = carga admissível (paralela às fibras)

\bar{F}_{90^0} = carga admissível (perpendicular às fibras)

ϕ = diâmetro do anel

$\bar{\tau}$ = tensão admissível de cisalhamento nas ligações

Na interligação das vigas, os anéis trabalharão com cargas perpendiculares às fibras da madeira.

Conhecendo-se a parcela de carga do trem-tipo que age em um anel, tem-se o diâmetro do anel.

$$F_{\perp} = \bar{F}_{90^0} = 0,6 \frac{\pi \phi^2}{4} \bar{\tau}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\perp}}{0,6 \pi \bar{\tau}}}$$

Construtivamente o diâmetro máximo do anel tem sido adotado no LaMEM como igual 0,8 da dimensão da peça de madeira.

A altura mínima do anel de penetração nas vigas é dada pela equação, (17).

$$h = \frac{\pi \phi \tau}{4 \sigma_c} \quad \text{sendo}$$

ϕ = diâmetro do anel

τ = tensão de ruptura por cisalhamento

σ_c = tensão de ruptura por compressão paralela às fibras.

A altura máxima do anel não deve ultrapassar a 50% da espessura das peças a serem ligadas.

4.3.1- Cálculo do anel para o modelo em vigas

Como o diâmetro do anel está relacionado com o espaçamento entre as linhas de anéis, faz-se o cálculo para o caso mais crítico.

Supondo-se que as três rodas de meio trem-tipo, classe 360 KN, estejam sobre uma única viga, entre duas linhas de anéis, acha-se a carga crítica para o anel. Fig. 46.

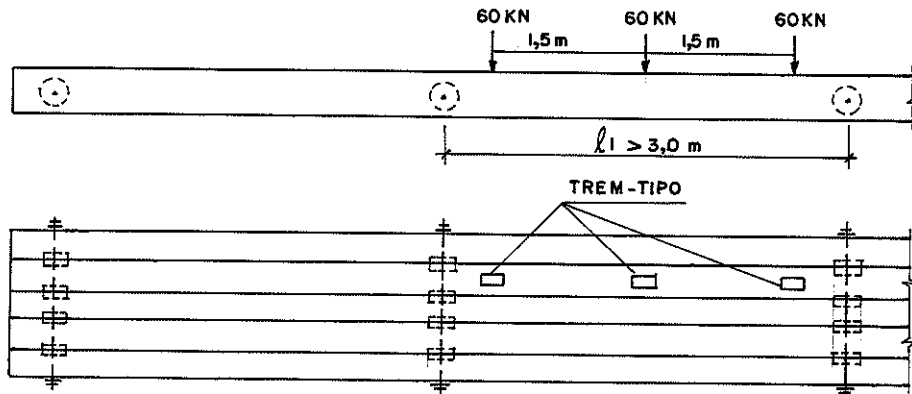


Fig. 46-Carga do trem-tipo entre duas linhas de anéis

Protótipo - 3 rodas = 180KN

Modelo 1:4-3 rodas = 11,25 KN

A carga sobre uma viga deverá por hipótese ser transmitida para as outras vigas através de quatro anéis. A parcela de carga para um anel será:

$$F_1 \text{ anel} = \frac{11250}{4} = 2812,5 \text{ N}$$

Calculando-se o diâmetro mínimo do anel a ser adotado tem-se:

$$\phi = \sqrt{\frac{4 \cdot F_i}{0,6 \pi \tau}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2812,5}{0,6 \pi \cdot 182}} = 5,726 \text{ cm ou}$$

$$\phi = 2,25 \text{ polegadas (2 1/4")}$$

$$\tau = 182 \text{ N/cm}^2 \text{ Peroba Rosa}$$

Adota-se para o modelo, um diâmetro comercial igual a 2 1/2".

Calculando-se a altura mínima do anel tem-se:

$$h = \frac{\phi \pi \tau}{4 \sigma_c} = 6,35 \frac{\pi \cdot 121}{4 \cdot 425} = 1,41 \text{ cm}$$

$$\left. \begin{array}{l} \tau = 12,1 \text{ MPa} \\ \sigma_c = 42,5 \text{ MPa} \end{array} \right\} \text{ Peroba Rosa}$$

As vigas que constituem o modelo possuem espessuras iguais a 6 cm. Como a viga receberá um anel em cada face, este poderá ter uma altura máxima de 3,0 cm, isto é, cada anel penetrará 1,5 cm na viga, totalizando 50% de sua espessura.

Na possibilidade de ocorrer algum problema de montagem ou mesmo algum empenamento na viga, no qual parte do anel possa ficar exposta, não se alojando perfeitamente em seu sulco, adotou-se como altura máxima 3 cm.

4.3.2- Cálculo do espaçamento das linhas de anéis

Determinado o diâmetro dos anéis, espera-se determinar o espaçamento entre as linhas de anéis da seção transversal, procurando-se uma boa distribuição das tensões no conjunto.

Nos ensaios iniciais fez-se a ligação transversal das vigas apenas com barras de aço, figura 47 .

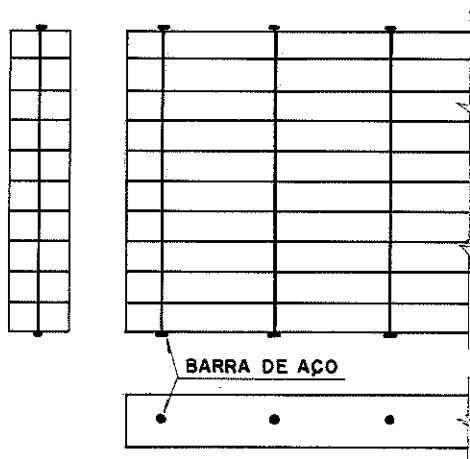


Fig.47 - Modelo com vigas interligadas por barras de aço

Determinado o espaçamento através de ensaios com barras de aço, far-se-ia a ligação transversal das vigas através dos anéis metálicos, procurando-se melhorar a rigidez nas ligações.

4.3.3- Ensaio do modelo de dez vigas interligadas por barras de aço

4.3.3.1- Modelo com sete barras

Primeiramente, as dez vigas foram ligadas transversalmente por sete barras de aço de 3/8", fig.48 .

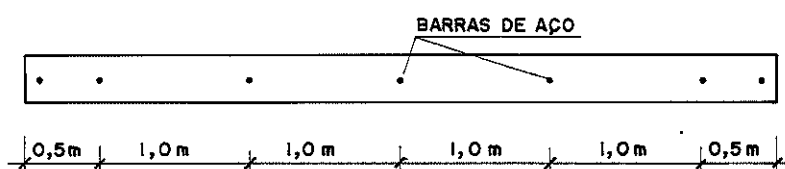


Fig. 48- Posição das barras de aço

O espaçamento de 1,0 m das barras corresponde no protótipo a 4,0 m, ou seja, as rodas do trem-tipo estariam compreendidas entre duas barras.

Foi simulado para o modelo um apoio fixo e um móvel.

Inicialmente, colocou-se um perfil de aço sobre a seção transversal central, e fez-se o carregamento, procurando-se distribuir a carga igualmente nas dez vigas.

As leituras das flechas foram realizadas através de três relógios comparadores, instalados na seção transversal central. Fig. 49 .

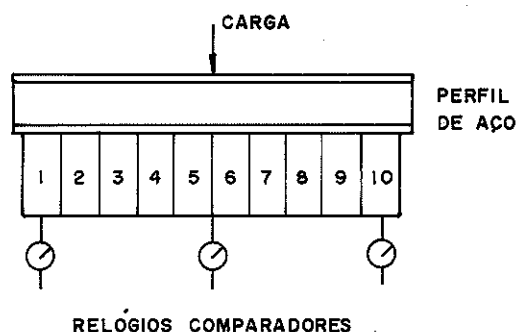


Fig. 49-Esquema do primeiro carregamento

A Tabela 25 apresenta os resultados do ensaio com o carregamento sobre as dez vigas, até atingir a flecha admissível.

Tabela 25

Carga N	Deformações mm			Carga N	Deformações mm		
	Viga 1	Viga C	Viga 10		Viga 1	Viga C	Viga 10
0	0	0	0	0	0	0	0
915	0,9	0,91	1,07	7320	7,24	8,36	8,06
1830	1,85	1,98	2,05	8235	8,17	9,40	9,06
2745	2,80	3,06	3,04	9150	9,07	10,45	10,07
3660	3,58	4,09	4,01	10065	9,98	11,46	11,01
4575	4,50	5,20	5,04	10980	10,90	12,46	12,09
5430	5,51	6,25	6,03	11895	11,88	13,50	13,07
6405	6,32	7,30	7,05	12810	12,79	14,51	14,05
				13725	14,10	15,56	15,09

Com esses resultados, pode-se estimar o módulo de elasticidade do conjunto

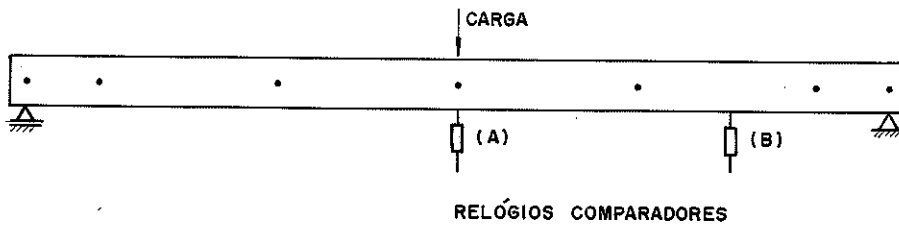
$$F = 12810 \text{ N} \quad I = 20480 \text{ cm}^4$$
$$\Delta F = 1,378 \text{ cm}$$

$$E = \frac{12810 \cdot 500^3}{48 \cdot 1.378 \cdot 20480}$$

$$E = 11820 \text{ MPa}$$

Em seguida, retirou-se o perfil de aço, fazendo aplicação de carga crescente concentrada em cada uma das vigas constituintes do modelo, ao longo de sua seção transversal central.

Dos três relógios comparadores, instalados na seção transversal central, colocou-se, sempre, um sob a viga a ser carregada e os outros dois nas vigas da borda do modelo. Mais dez relógios comparadores foram instalados no sentido da seção transversal da viga, a um metro do apoio, para analisar o comportamento do conjunto fora da seção central. Fig. 50.

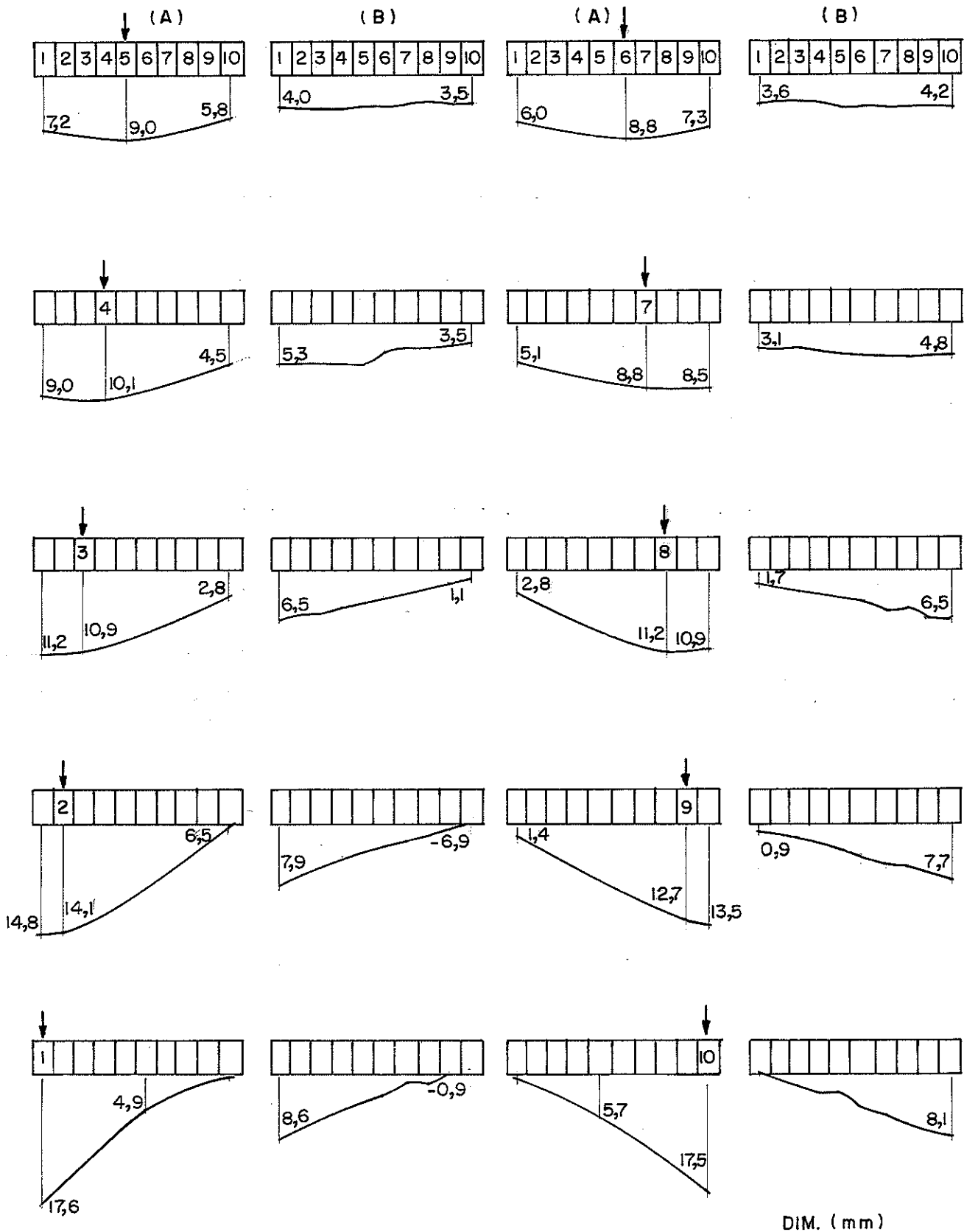


- (A) Seção transversal central
- (B) Seção transversal a 1 m do apoio

Fig. 50 - Instalação dos relógios comparadores. Ligação com 7 barras de aço

A tabela 26, e fig. 51 apresentam os resultados dos ensaios do modelo composto por dez vigas, interligadas por sete barras de aço, com carregamento sucessivos em cada uma das vigas. A tabela 26 contém todos os resultados para o carregamento na viga 6. Para os outros carregamentos são apresentados os diagramas das elásticas transversais para a carga 6400 N. Fig. 51.

FIGURA 51 ELÁSTICAS TRANSVERSAIS, CARGA 6,4 KN
 (A) SEÇÃO TRANSVERSAL CENTRAL
 (B) SEÇÃO TRANSVERSAL A 1 METRO DO APOIO



4.3.3.2- Modelo com onze barras

Em uma segunda etapa, procurou-se diminuir os espaçamentos das ligações transversais adicionando mais quatro barras de aço ao modelo. Fig. 52 .

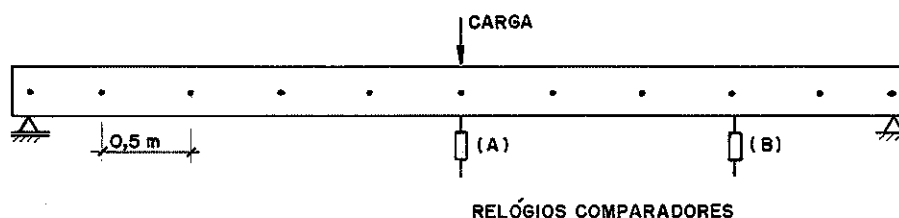


Fig.52- Ligação com 11 barras de aço

Foram repetidos os carregamentos na seção transversal central, viga por viga, até atingir a flecha admissível. Para cada carregamento realizado foram lidas as flechas nos três relógios da seção transversal central e nos dez relógios comparadores situados a 1,0 m do apoio.

A tabela 27, e a fig. 53 apresentam os resultados dos ensaios do modelo interligado por onze barras de aço, com carregamentos sucessivos em cada uma das vigas. A tabela 27 contém os resultados obtidos no carregamento da viga 6. Para os outros carregamentos são apresentados os diagramas das elásticas transversais para a carga 6400 N. Fig. 53 .

4.3.3.3- Comparação dos resultados dos ensaios dos modelos interligados por sete e por onze barras de aço

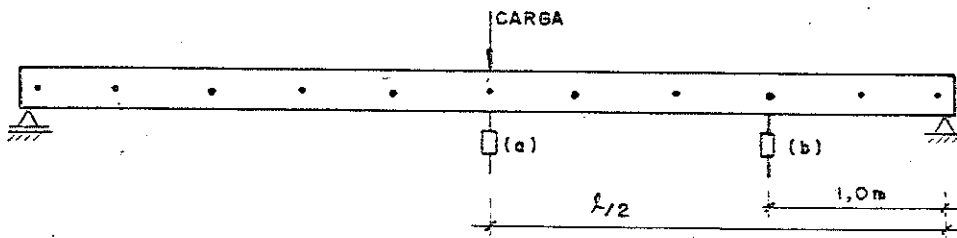
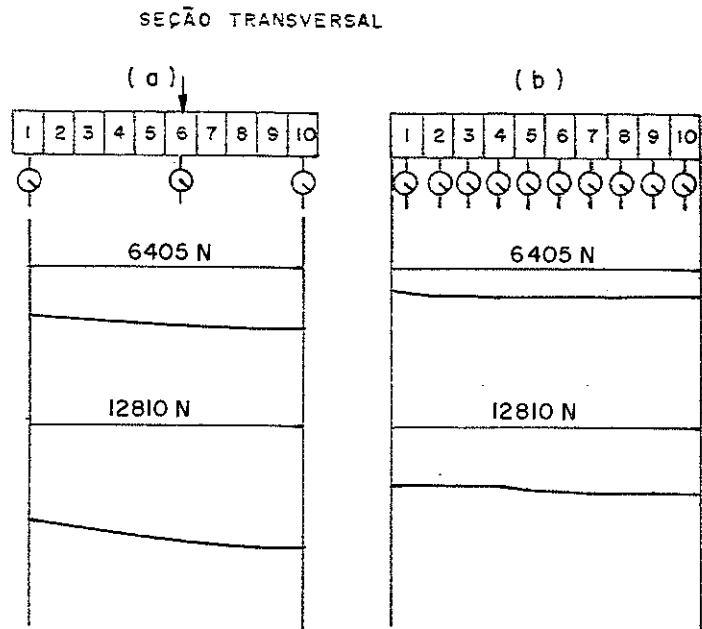
Os resultados dos ensaios do modelo com onze barras de aço mostraram-se superiores aos com sete barras.

Para atingir a flecha admissível de $l/350$, aproximadamente ,5 cm, sob a viga carregada, a carga aplicada no modelo com onze barras de aço, foi superior de 18 a 20%, em relação ao outro. Além disto, ocorreu melhor distribuição da carga nas vigas da seção transversal. As vigas das bordas no modelo com onze barras de aço apresentam flechas maiores do que as do modelo de sete barras, recebendo, portanto, maiores parcelas de carga. O conjunto interli

TABELA 27

CARREGAMENTO NA VIGA 6

CARGA N	FLECHAS EM 0.01 mm (A)		
	V-1	V-6	V-10
0	0	0	0
915	90	91	110
1830	183	200	222
2745	274	308	333
3660	365	418	443
4575	456	528	555
5430	545	637	666
6405	635	748	781
7320	727	862	897
8235	815	973	1010
9150	903	1084	1120
11065	991	1192	1230
10980	1080	1299	1341
11895	1169	1407	1454
12810	1257	1510	1561

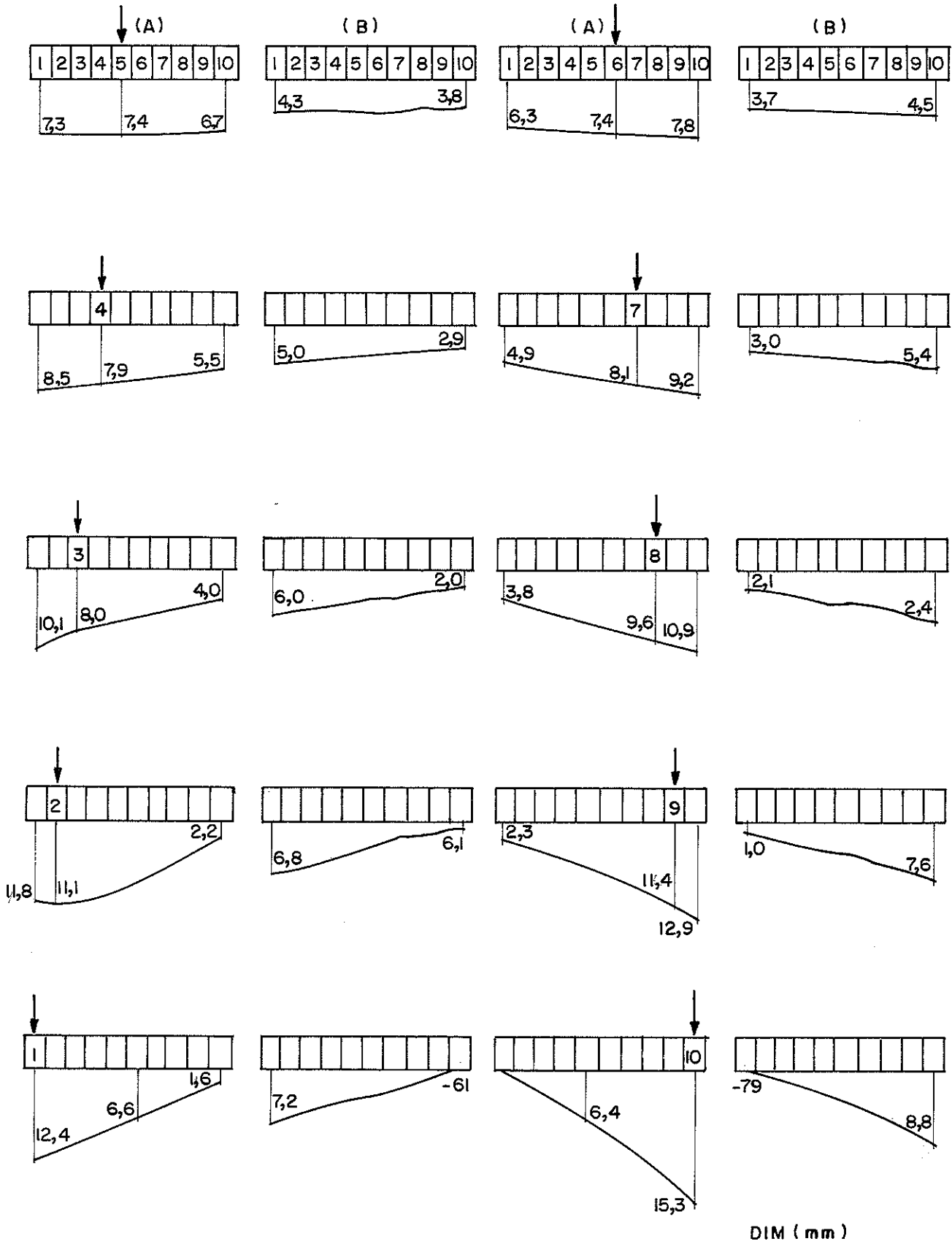


CARGA N	FLECHAS EM 0.01 mm (B)									
	V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	V-6	V-7	V-8	V-9	V-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
915	54	53	56	57	58	57	61	60	59	64
1830	109	108	115	115	119	119	124	122	125	130
2745	163	163	172	182	181	177	190	185	189	194
3660	216	216	228	232	235	235	250	248	253	255
4575	270	270	284	289	298	295	312	309	319	321
5430	322	324	339	345	354	354	373	369	383	387
6405	377	378	396	402	415	416	438	434	450	454
7320	429	432	455	460	477	476	501	495	516	520
8235	481	485	511	517	535	536	563	552	582	585
9150	531	537	534	572	595	595	626	619	645	657
10065	585	591	524	629	652	652	687	673	707	708
10980	637	664	678	684	712	711	742	733	768	770
11895	690	698	735	742	772	771	810	794	833	834
12810	741	751	790	797	830	829	869	853	895	894

FIGURA 53 - ELÁSTICAS TRANSVERSAIS, CARGA 6,4 KN

(A) SEÇÃO TRANSVERSAL CENTRAL

(B) SEÇÃO TRANSVERSAL A 1 METRO DO APOIO



gado por 11 barras apresentou maior rigidez.

Nos dois modelos houve inversão da flecha na viga da borda oposta à borda carregada.

Tal comportamento repete-se nas leituras realizadas a 1 m do apoio, demonstrando melhor distribuição da carga ao longo do modelo.

Embora não se tenha dado um aperto muito grande nas barras, evitando-se comprimir lateralmente as vigas, acredita-se na contribuição de pequena parcela da distribuição da carga ter sido dada pelo atrito lateral entre as vigas. Esta contribuição é impossível de se medir através dos ensaios.

4.3.4- Ensaio do modelo de dez vigas interligadas por anéis metálicos

4.3.4.1- Montagem do modelo

Em uma terceira etapa, fez-se a montagem do modelo composto por dez vigas, interligando-as com anéis metálicos.

O diâmetro do anel de 2,5 polegadas, foi calculado, anteriormente, para suportar uma carga no caso mais crítico.

Escolheu-se através do ensaio com barras, o espaçamento de 0,5 m, por ter apresentado melhor resultado. O diâmetro poderia ser diminuído e aumentado o número de anéis.

As vigas que compõem o modelo, possuem uma altura de 16 cm, podendo acoplar anéis de cinco polegadas. Para este estudo adotou-se o diâmetro de 2 1/2".

As barras de aço de 3/8" que interligavam as vigas têm, agora, apenas a finalidade de unir as peças. Para que não houvesse contribuição das barras de aço na interligação das vigas, aumentou-se o furo nas vigas de 3/8" para 1/2". Procurou-se evitar o atrito entre as vigas, aumentando-se, ligeiramente, a altura dos anéis, para que as vigas ficassem espaçadas uma da outra de 2 a 3 mm.

O modelo apresenta onze linhas de anéis, totalizando noventa e nove anéis metálicos na interligação das dez vigas.

4.3.4.2- Realização dos ensaios. Resultados.

O procedimento dos ensaios foi semelhante ao realizado com as barras de aço. Fig. 54.

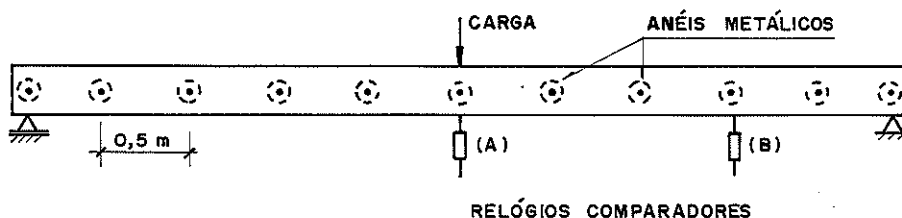


Fig. 54 -Modelo com onze linhas de anéis

A tabela 28, apresenta os resultados dos ensaios do modelo de dez vigas interligadas por onze linhas de anéis metálicos, com carregamento nas vigas 5 e 6. Para os outros carregamentos são apresentados os diagramas das elásticas transversais para carga de 6400 N. Fig. 55 .

4.3.4.3- Análise do modelo de dez vigas interligadas por anéis metálicos

Observou-se um aumento da capacidade de carga do modelo, de 8 a 9%, para os mesmos valores das flechas atingidas nas fases anteriores , evidenciando melhor transferência da carga da viga carregada para as demais.

Diminuir o espaçamento das linhas de anéis, na tentativa de melhorar a capacidade de carga e sua distribuição, tornaria a montagem do conjunto difícil.

Com o carregamento centrado, aplicando-se, simultaneamente, carga nas vigas cinco e seis, as flechas das vigas nas seções transversais são semelhantes, tanto no centro do modelo, como a um metro do apoio. Isto evidencia maior rigidez introduzida pelos anéis metálicos na ligação das vigas.

O comportamento do modelo composto de dez vigas (1/2 faixa de tráfego) como viga simples é semelhante ao do modelo de madeira maciça escala 1:33 (1/2 faixa de tráfego).

Para o carregamento nas vigas das bordas, viga nº 1 ou nº 10, elevou-se, também, a capacidade de carga.

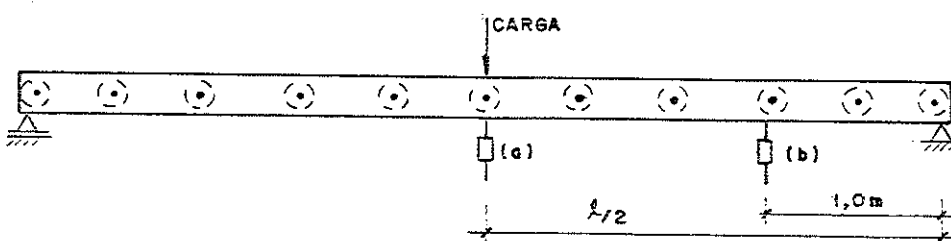
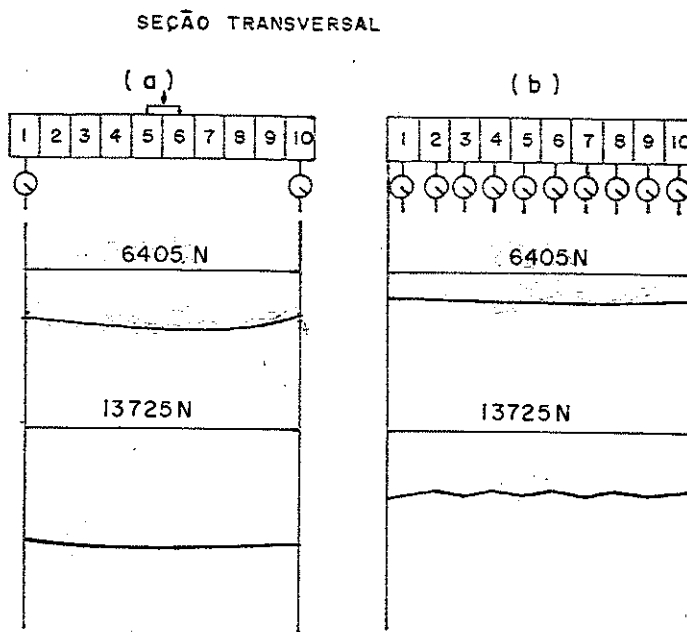
Já na viga da borda oposta à carregada não houve inversão, e sim um aumento da flecha, evidenciando melhor repartição de carga através das vigas vizinhas solidarizadas pelos anéis metálicos.

A ligação lateral das vigas, através de anéis metálicos , apresentou os melhores resultados na solidarização do conjunto.

TABELA 28

CARREGAMENTO NA VIGA 5-6

CARGA N	FLECHAS EM 0.01 mm (A)		
	V-1	V-5-6	V-10
0	0	0	0
915	90	87	77
1830	182	180	177
2745	272	295	276
3660	365	397	371
4575	464	503	470
5430	553	610	565
6405	650	715	664
7320	745	820	757
8235	840	921	852
9150	932	1024	952
10065	1022	1130	1087
10980	1115	1230	1128
11895	1209	1334	1224
12810	1300	1431	1313
13725	1495	1535	1508

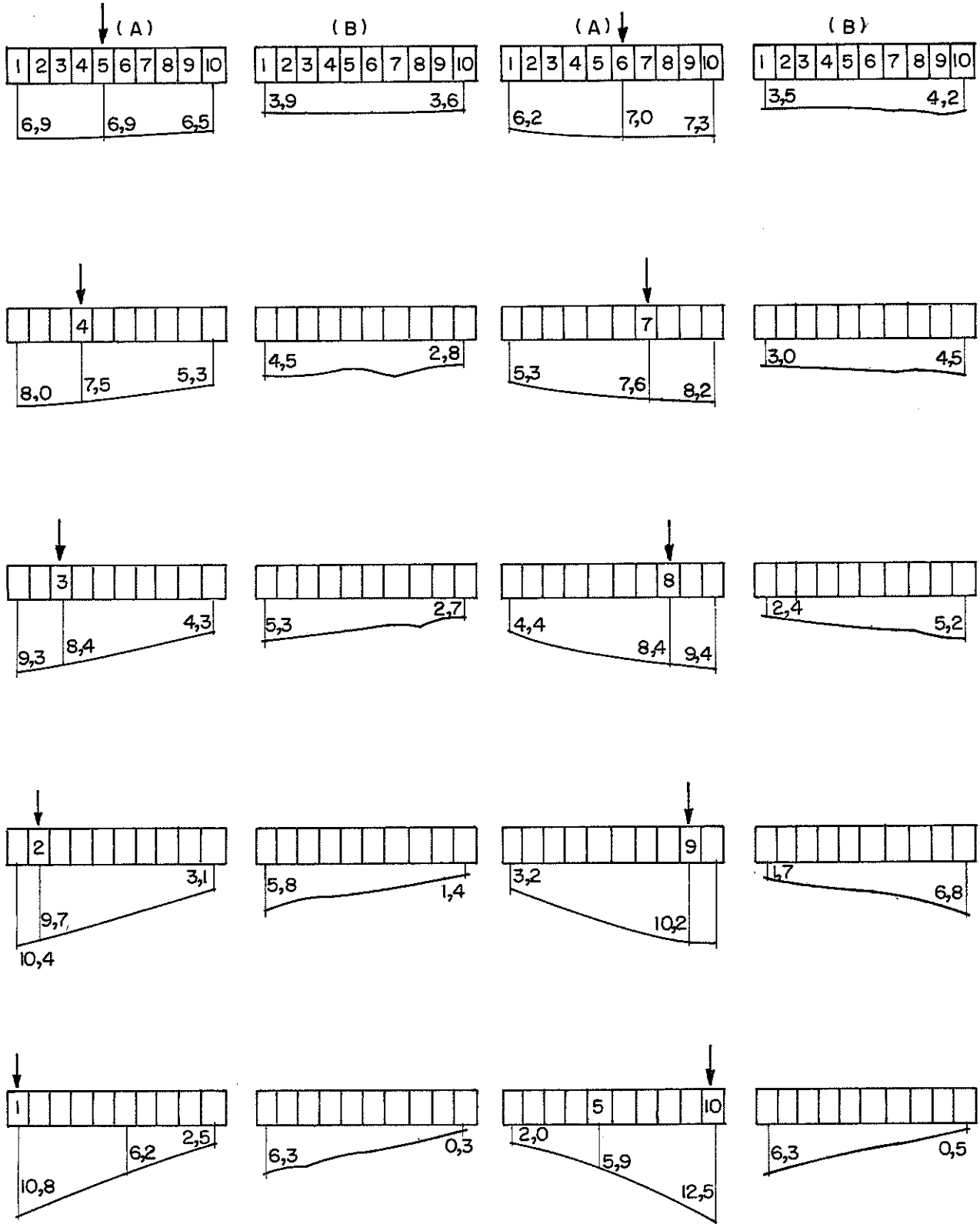


CARGA N	FLECHAS EM 0.01 mm (B)									
	V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	V-6	V-7	V-8	V-9	V-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
915	52	54	52	37	47	61	49	40	50	50
1830	105	106	108	92	106	95	106	92	107	106
2745	159	159	163	147	160	162	163	147	165	160
3660	212	211	218	200	217	203	220	201	200	213
4575	267	266	276	257	274	279	277	254	277	267
5430	319	317	326	310	328	311	330	307	331	320
6405	375	372	384	375	385	367	388	360	387	375
7320	428	425	440	419	439	420	442	411	442	425
8235	484	479	497	473	495	475	498	462	496	478
9150	537	532	550	528	549	529	552	515	550	528
10065	590	585	604	580	604	583	607	563	605	580
10980	643	636	658	632	659	643	660	612	657	629
11895	696	690	713	687	712	889	714	664	712	680
12810	749	741	766	740	767	741	767	715	766	731
13725	803	795	820	793	823	795	820	766	820	781

FIGURA 55 - ELÁSTICAS TRANSVERSAIS, CARGA 6,4 KN

(A) SEÇÃO TRANSVERSAL CENTRAL

(B) SEÇÃO TRANSVERSAL A 1 METRO DO APOIO



DIM (mm)

4.3.5- Montagem do modelo de uma faixa de tráfego

Para experimentação do modelo para uma faixa de tráfego foram acrescentadas nove vigas ao conjunto.

As nove vigas escolhidas, tendo módulos de elasticidade equivalente, foram ligadas transversalmente por oitena e oito anéis metálicos de diâmetro de 2 1/2" e onze barras de aço de 3/8".

Fez-se como anteriormente, o ensaio com carregamento simultâneo nas nove vigas, no meio do vão, para se obter o módulo de elasticidade do conjunto. A seguir, fez-se o carregamento em cada viga, lendo-se as flechas nas seções transversais central, e a 1,0 m do apoio.

Estes ensaios foram idênticos aos realizados anteriormente.

A tabela 29 apresenta os resultados dos ensaios do modelo composto por nove vigas, com carregamento na viga 5.

As ligações laterais das vigas, através de anéis metálicos, confirmaram os resultados obtidos através do modelo de dez vigas.

A determinação do módulo de elasticidade nos modelos tendo nove e dez vigas, tomando-se a flecha e carga correspondente, quando se carregam todas as vigas, apresentou os valores:

$E = 11820$ MPa para o modelo de dez vigas

$E = 10460$ MPa para o modelo de nove vigas

Os módulos de elasticidade dos dois modelos apresentam uma diferença não muito significativa. Conseqüentemente, interligando-se os dois modelos, formando o modelo de uma faixa de tráfego, com posto por dezenove vigas, pode-se esperar para uma carga centrada flechas ligeiramente maiores do lado de menor módulo de elasticidade.

Fez-se a preparação dos sulcos para a colocação dos anéis de 2 1/2" nas faces das vigas, para a interligação dos modelos de nove e de dez vigas, através de um parafuso único. Fig. 56 .

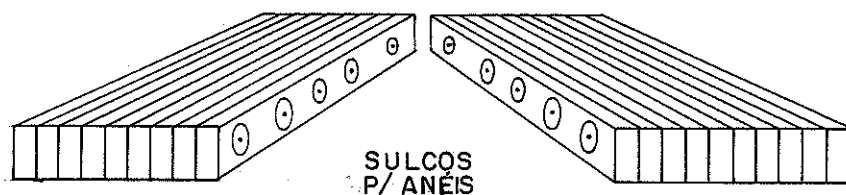


Fig. 56-Montagem do modelo constituído por dezenove vigas

Na nova numeração das vigas, os números de um a nove correspondem ao modelo de nove vigas e de dez a dezenove ao outro modelo.

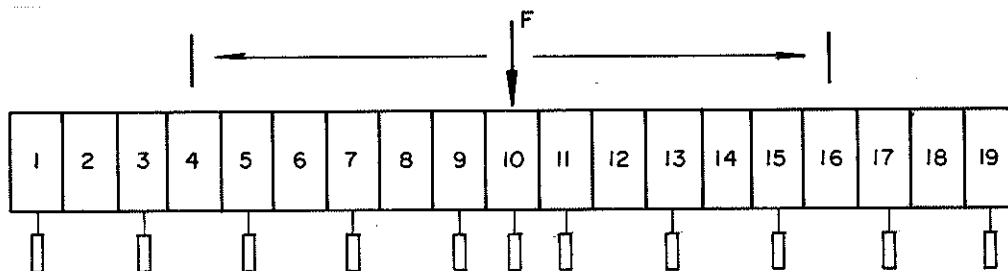
Desta forma, o modelo para uma faixa de tráfego, em escala 1:4 ficou constituído por dezenove vigas de Peroba Rosa, com as dimensões finais de 16 x 114 x 500 cm³.

4.3.5.1- Ensaio do modelo composto por 19 vigas. Uma carga concentrada

Para se realizar um ensaio mais seguro do modelo de uma faixa de tráfego, foram utilizados transdutores indutivos para a leitura das flechas. Sua utilização foi precedida pela calibração dos trinta indutivos existentes no LaMEM, através de um Palmer.

A variação encontrada nas constantes dos indutivos está na ordem de centésimo de milímetro.

Foram instalados transdutores indutivos ao longo da seção transversal central, sob as vigas, dez indutivos alternados, e um na viga central. Fig. 57.



TRANSDUTORES INDUTIVOS

Fig. 57 -Instalação dos transdutores indutivos

Fez-se, primeiramente, o carregamento simultâneo em todas as vigas da seção transversal central.

Repetiram-se os ensaios carregando-se, individualmente, cada viga, partindo da viga número quatro até a número dezesseis

A tabela 30 apresenta os resultados dos ensaios com carga simultânea central de todas as vigas e leitura das flechas no meio do vão.

A tabela 31 apresenta o carregamento da viga 10, no meio do vão e a leitura das flechas para cargas sucessivas no meio do vão.

A tabela 32 é geral, apresentando as flechas lidas na seção transversal central para o carregamento em todas as vigas si -

multaneamente e para cada viga, na seção central.

As figuras 58, 59, mostram o ensaio do modelo composto por 19 vigas com carga centrada.

A figura 60 apresenta os diagramas das elásticas transversais.

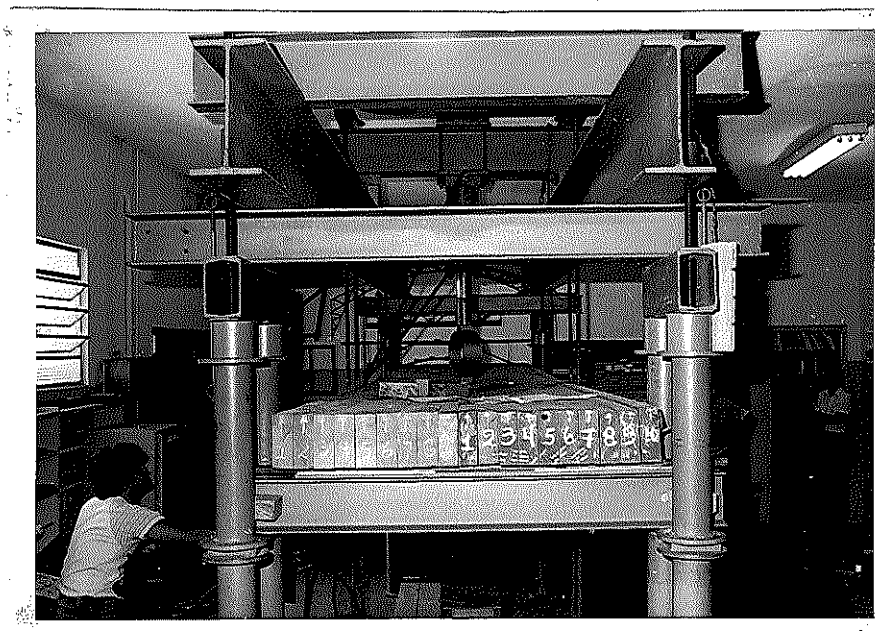


Fig. 58 - Ensaio do modelo com carga concentrada

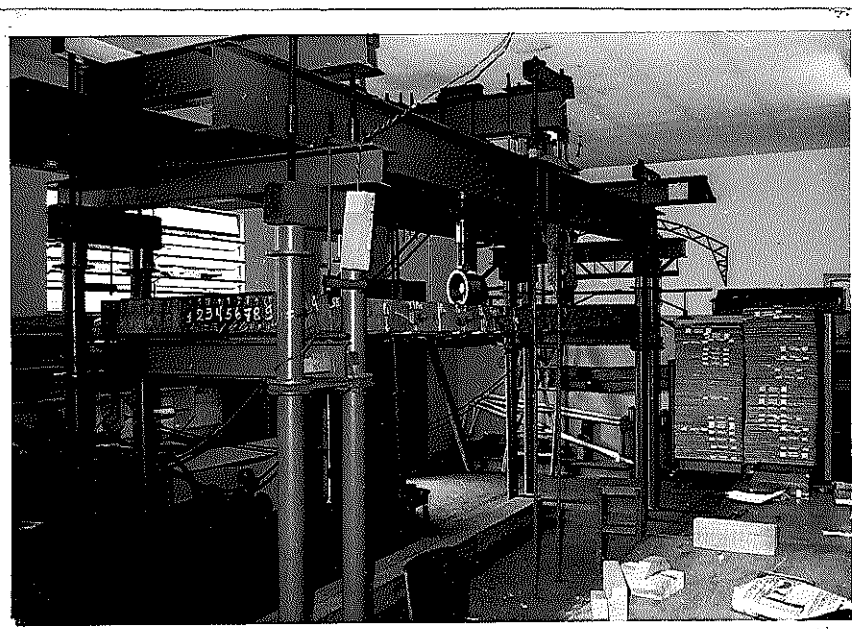


Fig. 59 - Ensaio do modelo com carga concentrada

TABELA 30 - Carregamento em Todas as Vigas Simultaneamente

Carga N	Flechas nas vigas em milímetro																	
	v-1	v-3	v-5	v-7	v-9	v-10	v-11	v-13	v-15	v-17	v-19							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
4750	314	303	281	267	271	272	267	276	284	276	264							
9500	612	596	559	542	548	552	530	548	564	546	518							
14250	903	884	834	812	823	828	787	814	834	806	768							
19000	1190	1166	1103	1079	1092	1099	1037	1073	1101	1060	1014							
23750	1497	1469	1392	1368	1380	1387	1304	1347	1381	1329	1264							

TABELA 31- Carregamento na viga 10

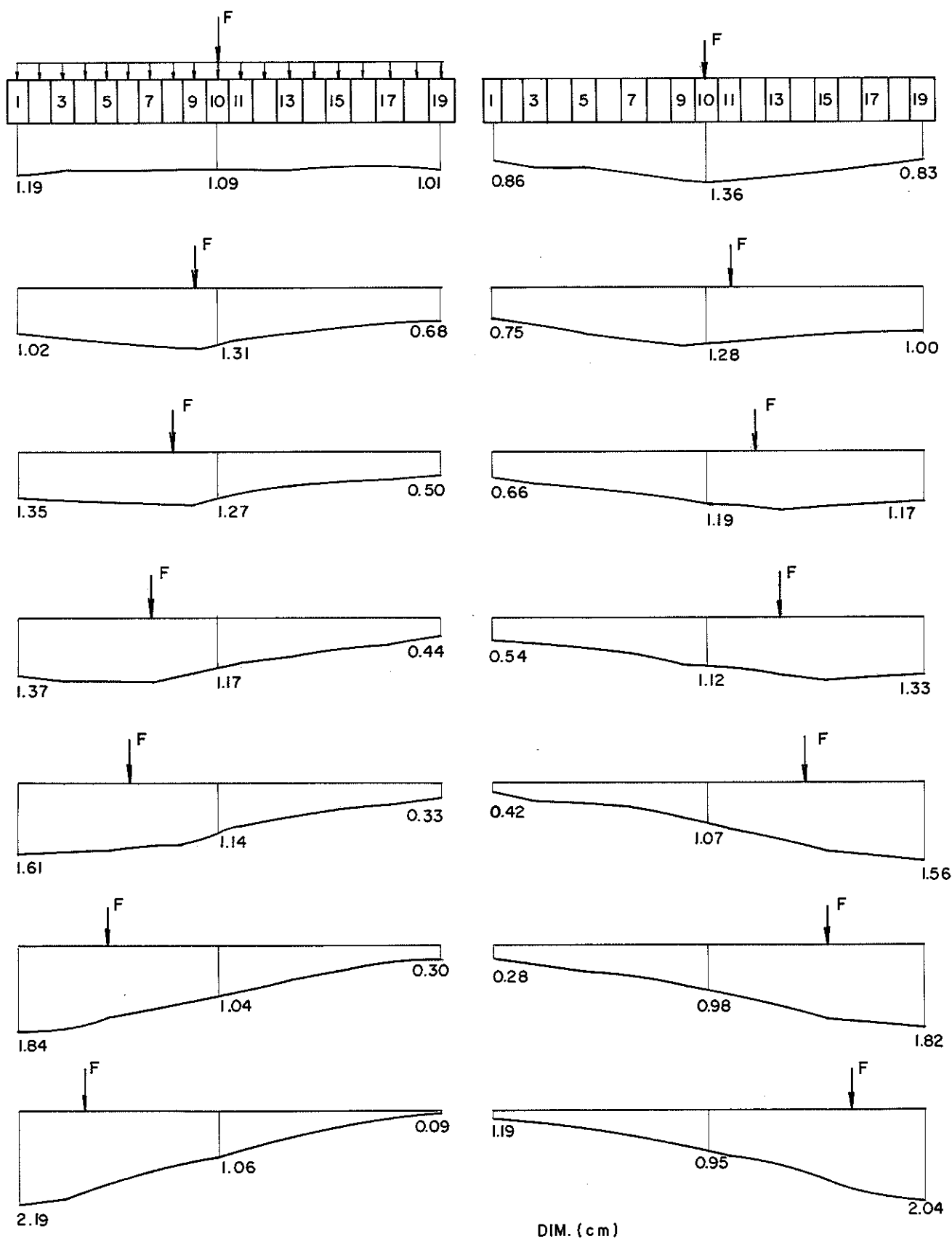
Carga N	Flechas nas vigas em milímetro																	
	v-1	v-3	v-5	v-7	v-9	v-10	v-11	v-13	v-15	v-17	v-19							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
4750	228	254	268	292	324	338	324	298	276	250	220							
9500	448	507	540	590	661	680	634	596	554	490	431							
14250	658	750	807	884	994	1020	937	887	820	726	634							
19000	867	993	1073	1179	1308	1366	1249	1171	1087	960	831							
21375	968	1112	1211	1234	1508	1556	1413	1319	1223	1073	1076							

Carregamento e leitura de flechas no meio do vão

Tabela 32 - Carga aplicada de 19KN

Carga	Flechas nas vigas em milímetros																	
	V-1	V-3	V-5	V-7	V-9	V-10	V-11	V-13	V-15	V-17	V-19							
Nas vigas	V-1	V-3	V-5	V-7	V-9	V-10	V-11	V-13	V-15	V-17	V-19							
Todas	11.90	11.66	11.03	10.79	10.92	10.99	10.37	10.73	10.01	10.60	10.14							
v-10	8.67	9.93	10.73	11.79	13.08	13.66	12.49	11.71	10.87	9.60	8.31							
v-11	7.57	8.89	10.81	12.42	13.13	12.88	12.48	11.97	10.97	10.90	10.02							
v-9	10.20	11.26	12.04	12.85	14.14	13.15	11.59	10.71	9.60	8.20	6.81							
v-12	6.61	7.77	8.75	9.66	11.39	11.99	10.99	13.26	13.06	12.40	11.71							
v-8	10.35	11.12	11.40	12.02	12.00	11.27	9.96	8.72	7.60	6.24	5.06							
v-13	5.47	6.67	7.74	8.86	10.62	11.28	11.58	13.87	14.14	13.79	13.38							
v-7	13.72	14.38	14.51	14.80	13.08	11.79	10.63	9.04	7.65	6.02	4.42							
v-14	4.26	5.48	6.57	7.75	9.76	10.72	11.10	13.36	15.16	15.55	15.63							
v-6	16.14	16.33	15.93	14.93	14.92	11.45	10.23	8.44	6.76	5.03	3.37							
v-15	2.87	4.21	5.42	6.84	8.81	9.80	10.80	13.24	16.93	17.62	18.25							
v-5	18.44	18.21	16.82	14.48	12.11	10.42	9.27	7.52	5.58	3.74	3.02							
v-16	1.93	3.36	4.70	5.88	8.53	9.50	10.55	12.91	16.85	19.03	20.41							
v-4	21.94	20.03	16.89	13.63	11.51	10.66	8.49	6.60	4.62	2.59	0.90							

FIGURA 60 - CARREGAMENTO E LEITURA DE FLECHAS NO MEIO DO VÃO
 CARGA APLICADA F = 19 KN



De maneira geral, o modelo de 1 faixa de tráfego, com carregamento concentrado viga por viga, mostrou excelente comportamento, através da distribuição de carga de uma viga para outra, devido à colocação adequada dos anéis de ligação.

Para uma investigação mais completa de comportamento do modelo, foram realizados ensaios utilizando-se carregamento semelhante ao trem-tipo.

4.3.5.2- Ensaio do modelo composto por 19 vigas, tendo duas cargas concentradas

O trem-tipo classe 360 KN possui 3 eixos com seis rodas. A montagem de um dispositivo simulando um trem-tipo em escala igual à do modelo, apresenta uma dificuldade na distribuição de carga igual para cada roda. Para simplificação do ensaio e melhor distribuição da carga nas rodas, optou-se para um trem-tipo de 1 eixo e duas rodas na proporção do modelo, figura 61.

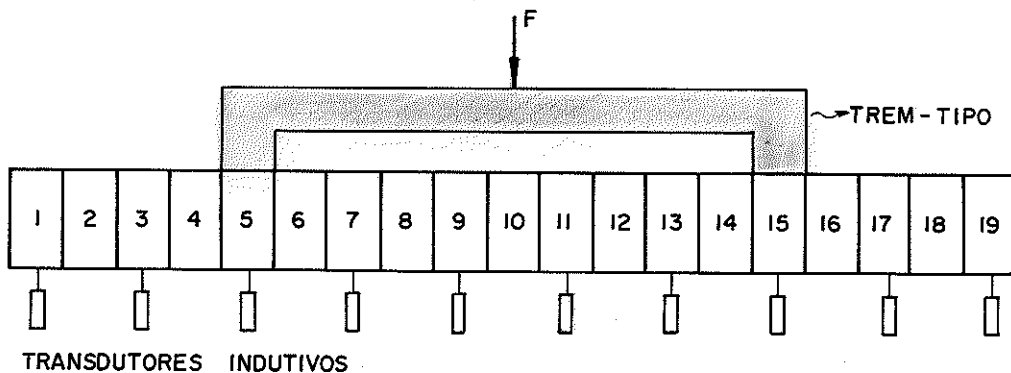


Fig. 61- Carregamento por duas rodas

O modelo experimental é constituído por dezenove vigas retangulares e possui onze linhas de anéis. Serão medidas as flechas nas nove seções transversais que contêm os anéis nos apoios.

As flechas foram lidas sob as vigas ímpares (viga 1, 3, 5, 7 17 e 19), utilizando-se dez transdutores indutivos em cada seção transversal.

Como o LaMEM possui 30 transdutores indutivos, para se obter as leituras das 9 seções transversais simultaneamente, para um dado carregamento, realizou-se o ensaio em três fases:

- 1) Instalaram-se os 30 indutivos em três seções transversais, efetuando-se três carregamentos, registrando as flechas. Des-carregando-se o conjunto e esperava-se o mesmo recuperar a flecha residual.

2) Mudando-se os indutivos para três novas seções, repetiam-se os mesmos carregamentos registrando as novas flechas.

3) Repetia-se o mesmo procedimento para as três últimas seções.

As flechas captadas pelos transdutores, lidas através do conjunto HP-3497-A, Data Acquisition Control, eram armazenadas na memória da calculadora HP-9825-B.

Através de um programa, as leituras dos transdutores em milivolts, eram transformadas em milímetros, tabeladas e registradas em diagramas indicativos das elásticas transversais.

Para aplicação da carga utilizou-se um cilindro hidráulico de 250 KN, com um anel dinamométrico de constante igual a 4,75N por divisão.

Em cada seção transversal foram feitos ensaios com o trem tipo em 9 posições diferentes, totalizando 81 pontos de carregamento.

As tabelas 33,34,35 apresentam os resultados dos ensaios com carregamento do trem-tipo na seção transversal central (seção 4), juntamente com as figs.62, 63, 64 das elásticas transversais.

As tabelas 36,37 e as figs.65,66 apresentam os resultados dos ensaios com carregamento do trem-tipo na seção 2.

4.3.5.3- Análise do modelo de dezanove vigas interligadas por anéis metálicos, uma faixa de tráfego

Para se ter uma melhor visão do comportamento do modelo da ponte para uma faixa de tráfego, constituída por 19 vigas de Peroba Rosa, com dimensões 6 x 16 cm, a fig.67 apresenta os esquemas de carregamento com carga concentrada e trem-tipo na seção transversal central.

Na fig.67a tem-se a flecha causada pelo peso próprio do modelo e através da superposição com qualquer tipo de carregamento, pode-se obter a flecha final (peso próprio + carga accidental).

A fig.67 b apresenta a carga central distribuída ao longo da seção transversal central, através de uma viga rígida.

A fig.67 c com carga concentrada na viga central, sem a interferência da viga rígida transversal, pode-se observar, através das elásticas a boa distribuição da carga, através dos anéis metálicos. As vigas das bordas possuem flechas aproximadamente iguais a 62% da flecha da viga central, recebendo portanto grandes quinhões da carga central.

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
TREM TIPO NAS VIGAS 5 E 15

Tabela 33

	CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 19,0	CARGA 28,5		CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 19,0	CARGA 28,5
	0.00	0.98	2.34	3.75		0.00	4.72	9.28	13.91
	0.00	1.10	2.66	4.22		0.00	5.09	10.05	15.11
	0.00	1.19	2.90	4.56		0.00	5.26	10.49	15.82
FLECHAS	0.00	1.24	3.02	4.74	FLECHAS	0.00	5.33	10.60	15.97
NA	0.00	1.30	3.19	5.03	NA	0.00	5.27	10.47	15.62
SECAO 0	0.00	1.28	3.12	4.91	SECAO 5	0.00	5.25	10.44	15.66
(MM)	0.00	1.20	2.91	4.57	(MM)	0.00	5.05	10.08	15.14
	0.00	1.27	3.08	4.84		0.00	5.12	10.22	15.48
	0.00	1.23	2.98	4.69		0.00	4.88	9.73	14.69
	0.00	1.24	3.00	4.68		0.00	4.73	9.50	14.33
	0.00	2.78	5.56	8.36		0.00	2.79	6.60	10.48
	0.00	3.03	6.08	9.11		0.00	2.91	6.94	11.01
	0.00	3.14	6.27	9.35		0.00	3.07	7.34	11.70
FLECHAS	0.00	3.12	6.29	9.42	FLECHAS	0.00	3.08	7.36	11.66
NA	0.00	3.29	6.64	9.93	NA	0.00	3.07	7.33	11.62
SECAO 1	0.00	3.32	6.68	9.98	SECAO 6	0.00	2.92	7.04	11.21
(MM)	0.00	3.05	6.11	9.11	(MM)	0.00	3.13	7.49	11.93
	0.00	3.08	6.23	9.34		0.00	3.03	7.24	11.41
	0.00	3.17	6.37	9.50		0.00	2.79	6.77	10.82
	0.00	3.07	6.18	9.23		0.00	2.91	6.95	10.96
	0.00	3.96	7.87	11.90		0.00	2.88	5.64	8.45
	0.00	4.17	8.33	12.60		0.00	2.94	5.79	8.67
	0.00	4.26	8.56	12.91		0.00	3.20	6.29	9.38
FLECHAS	0.00	4.39	8.83	13.35	FLECHAS	0.00	3.17	6.30	9.39
NA	0.00	4.52	9.06	13.57	NA	0.00	3.10	6.21	9.28
SECAO 2	0.00	4.52	9.06	13.59	SECAO 7	0.00	3.03	6.03	9.03
(MM)	0.00	4.22	8.41	12.59	(MM)	0.00	3.18	6.35	9.49
	0.00	4.33	8.68	13.04		0.00	3.01	5.99	8.97
	0.00	4.23	8.50	12.77		0.00	2.85	5.72	8.61
	0.00	4.19	8.39	12.60		0.00	2.83	5.72	8.60
	0.00	3.22	7.71	12.27		0.00	1.55	2.94	4.34
	0.00	3.50	8.38	13.33		0.00	1.67	3.21	4.76
	0.00	3.69	8.85	14.07		0.00	1.78	3.45	5.11
FLECHAS	0.00	3.74	8.92	14.18	FLECHAS	0.00	1.79	3.49	5.18
NA	0.00	3.68	8.79	13.96	NA	0.00	1.83	3.59	5.34
SECAO 3	0.00	3.77	9.00	14.13	SECAO 8	0.00	1.70	3.37	5.03
(MM)	0.00	3.60	8.57	13.56	(MM)	0.00	1.81	3.58	5.33
	0.00	3.59	8.66	13.86		0.00	1.67	3.31	4.94
	0.00	3.44	8.27	13.19		0.00	1.57	3.13	4.67
	0.00	3.40	8.21	13.06		0.00	1.50	3.01	4.48
	0.00	4.88	9.69	14.63					
	0.00	5.19	10.40	15.77					
	0.00	5.46	10.93	16.45					
FLECHAS	0.00	5.59	11.15	16.77					
NA	0.00	5.42	10.81	16.22					
SECAO 4	0.00	5.47	10.94	16.32					
(MM)	0.00	5.32	10.65	16.03					
	0.00	5.45	10.91	16.51					
	0.00	5.13	10.23	15.36					
	0.00	5.10	10.26	15.42					

Figura 62

ELASTICA DAS SECOES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secao 4

Trem Tipo nas vigas 5 e 15

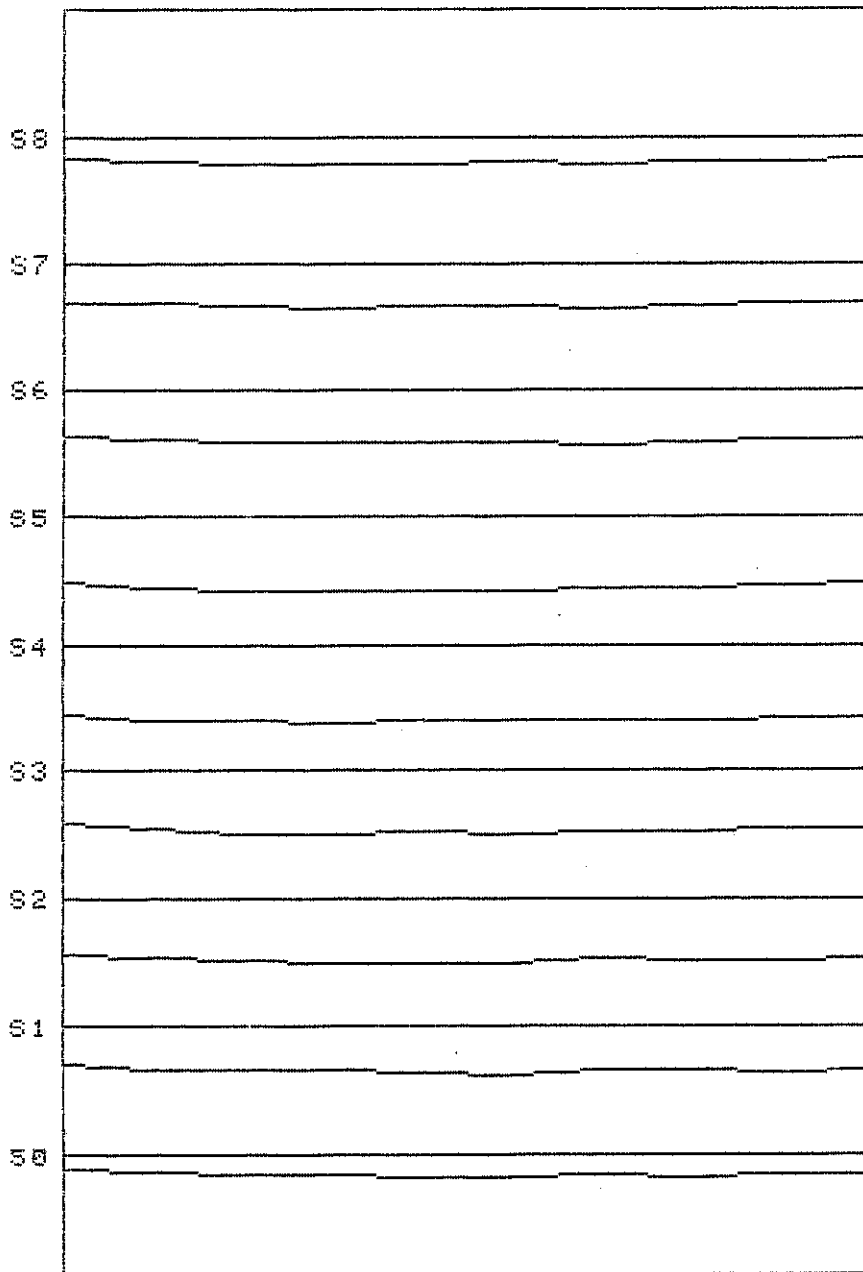


Tabela 34

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
TREM TIPO NAS VIGAS 3 E 13

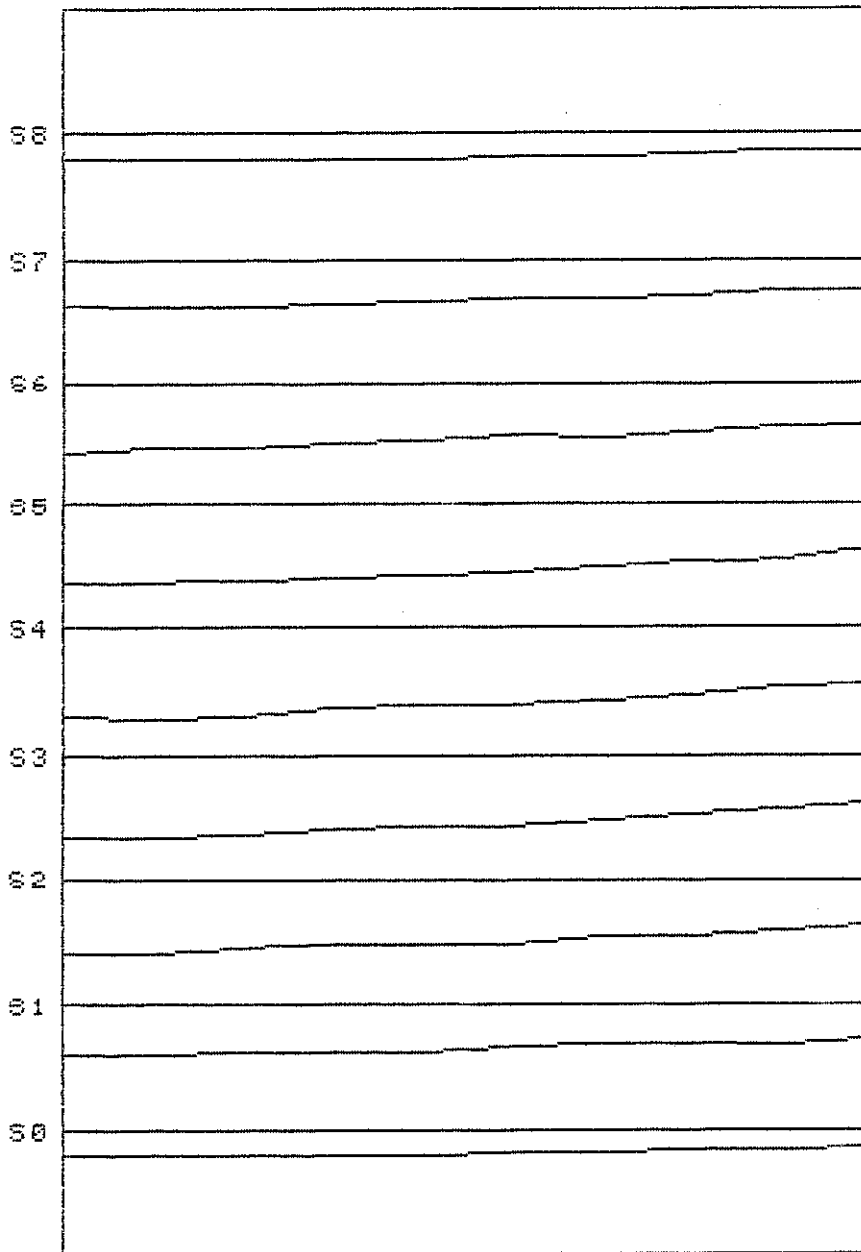
	CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 19,0	CARGA 23,75		CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 19,5	CARGA 23,75
	0.00	1.91	3.77	4.72		0.00	6.09	12.05	15.07
	0.00	1.85	3.71	4.65		0.00	5.98	11.91	14.94
	0.00	1.75	3.54	4.44		0.00	5.58	11.15	14.00
FLECHAS	0.00	1.70	3.45	4.34	FLECHAS	0.00	5.41	10.81	13.59
NA	0.00	1.76	3.59	4.52	NA	0.00	5.28	10.54	13.21
SECAO 0	0.00	1.63	3.34	4.21	SECAO 5	0.00	5.07	10.12	12.69
(MM)	0.00	1.53	3.10	3.88	(MM)	0.00	4.72	9.36	11.64
	0.00	1.44	2.96	3.73		0.00	4.46	8.73	10.83
	0.00	1.42	2.84	3.56		0.00	4.09	7.95	9.83
	0.00	1.35	2.69	3.36		0.00	3.33	6.53	8.08
	0.00	3.70	7.29	9.11		0.00	5.17	10.18	12.83
	0.00	3.61	7.16	8.97		0.00	4.82	9.54	11.99
	0.00	3.37	6.71	8.43		0.00	4.73	9.40	11.87
FLECHAS	0.00	3.32	6.66	8.38	FLECHAS	0.00	4.34	8.59	10.77
NA	0.00	3.35	6.75	8.48	NA	0.00	4.18	8.30	10.41
SECAO 1	0.00	3.09	6.20	7.76	SECAO 6	0.00	3.79	7.54	9.49
(MM)	0.00	2.94	5.82	7.25	(MM)	0.00	3.96	7.79	9.72
	0.00	2.87	5.71	7.15		0.00	3.70	7.30	9.11
	0.00	2.67	5.27	6.58		0.00	3.27	6.40	7.99
	0.00	2.41	4.71	5.87		0.00	3.20	6.27	7.81
	0.00	5.21	10.41	13.12		0.00	3.69	7.19	9.00
	0.00	5.15	10.37	13.08		0.00	3.55	6.92	8.68
	0.00	4.75	9.62	12.14		0.00	3.57	6.98	8.72
FLECHAS	0.00	4.51	9.17	11.59	FLECHAS	0.00	3.36	6.61	8.27
NA	0.00	4.50	9.08	11.40	NA	0.00	3.15	6.21	7.77
SECAO 2	0.00	4.40	8.87	11.15	SECAO 7	0.00	2.95	5.85	7.33
(MM)	0.00	3.95	7.86	9.83	(MM)	0.00	2.98	5.87	7.32
	0.00	3.96	7.84	9.77		0.00	2.72	5.33	6.65
	0.00	3.60	7.08	8.78		0.00	2.44	4.78	5.96
	0.00	3.37	6.57	8.11		0.00	2.36	4.61	5.75
	0.00	5.96	11.75	14.75		0.00	1.98	3.76	4.66
	0.00	5.97	11.95	15.13		0.00	1.91	3.66	4.54
	0.00	5.75	11.51	14.53		0.00	1.91	3.69	4.60
FLECHAS	0.00	5.40	10.81	13.67	FLECHAS	0.00	1.84	3.60	4.49
NA	0.00	5.18	10.38	13.09	NA	0.00	1.80	3.54	4.42
SECAO 3	0.00	5.19	10.42	13.09	SECAO 8	0.00	1.64	3.24	4.05
(MM)	0.00	4.76	9.41	11.79	(MM)	0.00	1.68	3.32	4.14
	0.00	4.48	8.82	11.03		0.00	1.48	2.94	3.66
	0.00	4.06	7.93	9.92		0.00	1.25	2.56	3.22
	0.00	3.73	7.20	8.98		0.00	1.21	2.42	3.01
	0.00	6.44	12.68	15.95					
	0.00	6.44	12.84	16.23					
	0.00	6.32	12.65	15.97					
FLECHAS	0.00	5.85	11.63	14.66					
NA	0.00	5.56	11.06	13.93					
SECAO 4	0.00	5.59	11.15	13.98					
(MM)	0.00	5.19	10.39	12.99					
	0.00	4.91	9.69	12.09					
	0.00	4.45	8.69	10.83					
	0.00	4.16	8.18	10.19					

Figura 63

ELASTICA DAS SECOES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secao 4

Trem Tipo nas vigas 3 e 13



CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
TREM TIPO NAS VIGAS 1 E 11

Tabela 35

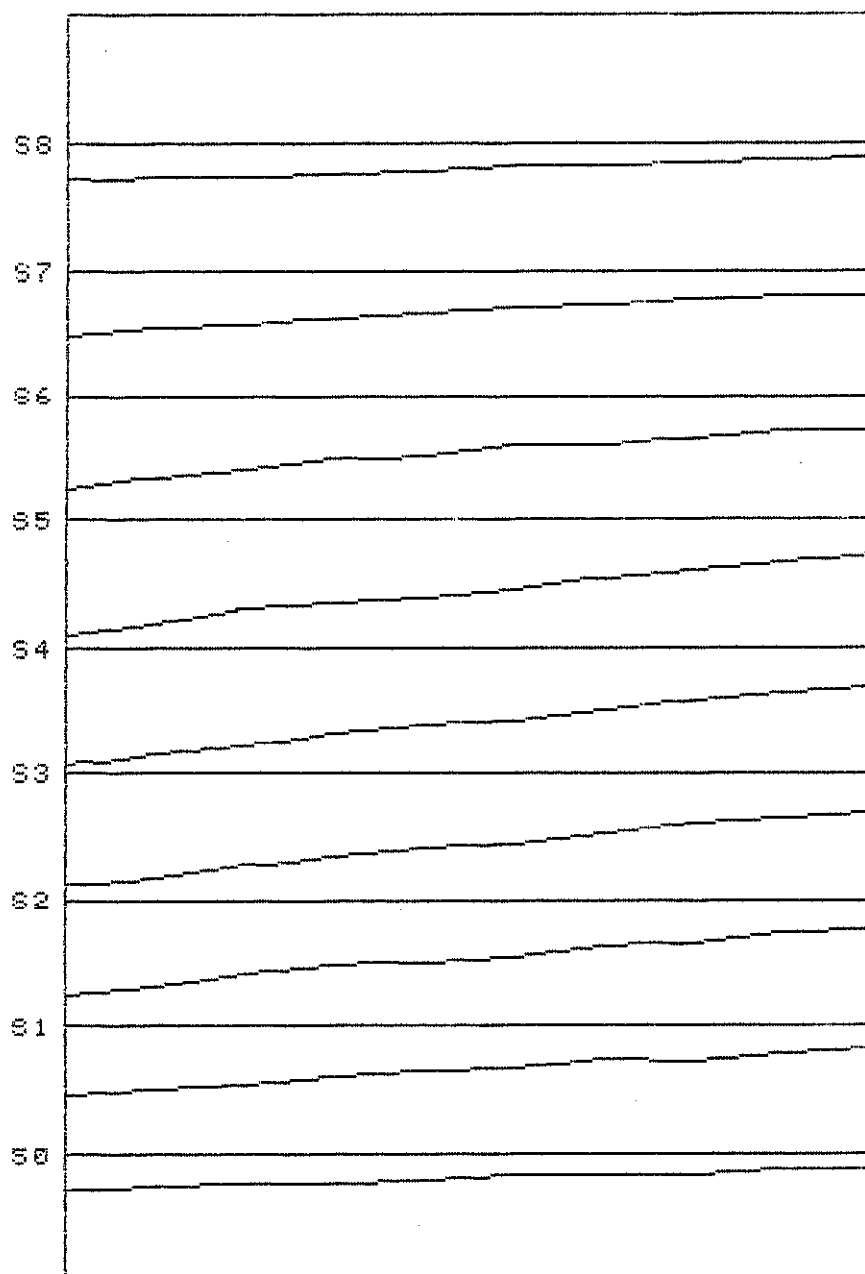
	CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0		CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0
	0.00	2.53	3.75	4.97		0.00	8.40	12.24	16.20
	0.00	2.25	3.35	4.47		0.00	7.59	11.11	14.74
	0.00	1.96	2.94	3.94		0.00	6.48	9.53	12.72
FLECHAS	0.00	1.88	2.85	3.84	FLECHAS	0.00	5.91	8.77	11.77
NA	0.00	1.70	2.58	3.47	NA	0.00	5.52	8.25	11.09
SECAO 0	0.00	1.43	2.22	3.01	SECAO 5	0.00	4.96	7.49	10.06
(mm)	0.00	1.37	2.08	2.79	(mm)	0.00	4.05	6.12	8.23
	0.00	1.30	2.02	2.74		0.00	3.53	5.31	7.06
	0.00	1.09	1.67	2.24		0.00	3.04	4.57	6.05
	0.00	0.99	1.53	2.03		0.00	2.42	3.60	4.66
	0.00	4.94	7.35	9.82		0.00	6.77	10.07	13.50
	0.00	4.45	6.64	8.86		0.00	5.97	8.83	11.77
	0.00	4.08	6.14	8.21		0.00	5.51	8.19	10.97
FLECHAS	0.00	3.49	5.27	7.09	FLECHAS	0.00	4.72	7.04	9.39
NA	0.00	3.25	4.94	6.66	NA	0.00	4.28	6.42	8.59
SECAO 1	0.00	2.93	4.47	6.01	SECAO 6	0.00	3.51	5.30	7.13
(mm)	0.00	2.41	3.64	4.83	(mm)	0.00	3.51	5.30	7.05
	0.00	2.38	3.67	4.92		0.00	2.98	4.54	6.04
	0.00	2.04	3.10	4.10		0.00	2.56	3.87	5.09
	0.00	1.67	2.53	3.30		0.00	2.37	3.67	4.88
	0.00	6.96	10.28	13.74		0.00	4.78	6.99	9.27
	0.00	6.40	9.47	12.68		0.00	4.31	6.32	8.38
	0.00	5.46	8.07	10.79		0.00	4.04	5.93	7.85
FLECHAS	0.00	4.79	7.15	9.65	FLECHAS	0.00	3.55	5.25	6.98
NA	0.00	4.52	6.80	9.16	NA	0.00	3.07	4.56	6.07
SECAO 2	0.00	4.13	6.25	8.44	SECAO 7	0.00	2.76	4.13	5.51
(mm)	0.00	3.36	5.04	6.72	(mm)	0.00	2.61	3.91	5.20
	0.00	3.05	4.58	6.11		0.00	2.22	3.33	4.41
	0.00	2.44	3.66	4.79		0.00	1.77	2.74	3.65
	0.00	2.17	3.24	4.24		0.00	1.81	2.72	3.58
	0.00	8.11	11.97	15.97		0.00	2.60	3.73	4.89
	0.00	7.48	11.05	14.70		0.00	2.28	3.29	4.31
	0.00	6.51	9.62	12.84		0.00	2.18	3.16	4.17
FLECHAS	0.00	5.87	8.70	11.63	FLECHAS	0.00	1.95	2.86	3.79
NA	0.00	5.20	7.85	10.60	NA	0.00	1.75	2.59	3.47
SECAO 3	0.00	4.82	7.28	9.76	SECAO 8	0.00	1.48	2.19	2.93
(mm)	0.00	4.18	6.25	8.33	(mm)	0.00	1.47	2.19	2.92
	0.00	3.55	5.32	7.01		0.00	1.24	1.87	2.50
	0.00	3.12	4.66	6.14		0.00	1.10	1.65	2.18
	0.00	2.68	4.00	5.23		0.00	0.90	1.38	1.83
	0.00	8.46	12.62	16.98					
	0.00	7.62	11.32	15.21					
	0.00	7.08	10.49	13.99					
FLECHAS	0.00	6.18	9.21	12.32					
NA	0.00	5.45	8.21	11.06					
SECAO 4	0.00	5.13	7.79	10.46					
(mm)	0.00	4.36	6.59	8.85					
	0.00	3.87	5.85	7.69					
	0.00	3.31	5.03	6.64					
	0.00	2.88	4.38	5.69					

Figura 64

ELASTICA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secção 4

Trem Tipo nas vigas i e ii



CARREGAMENTO NA SECAO 2 (em KN)
TREM TIPO NAS VIGAS 5 E 15

Tabela 36

	CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 19,0	CARGA 28,5		CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 19,0	CARGA 28,5
	0.00	1.50	2.94	4.31		0.00	3.45	7.10	10.73
	0.00	1.69	3.37	5.02		0.00	3.68	7.50	11.31
	0.00	1.66	3.38	5.11		0.00	3.70	7.60	11.49
FLECHAS	0.00	1.74	3.59	5.44	FLECHAS	0.00	3.84	7.77	11.70
NA	0.00	1.79	3.69	5.61	NA	0.00	3.82	7.77	11.69
SECAO 0	0.00	1.61	3.40	5.21	SECAO 5	0.00	3.90	7.91	11.91
(MM)	0.00	1.76	3.55	5.33	(MM)	0.00	3.90	7.71	11.50
	0.00	1.83	3.68	5.51		0.00	3.90	7.79	11.70
	0.00	1.97	3.86	5.66		0.00	3.95	7.79	11.55
	0.00	1.99	3.80	5.45		0.00	3.94	7.76	11.54
	0.00	2.66	5.31	7.91		0.00	2.92	5.87	8.79
	0.00	2.89	5.83	8.72		0.00	2.95	5.95	8.94
	0.00	2.82	5.75	8.64		0.00	3.01	6.12	9.27
FLECHAS	0.00	2.89	5.99	9.10	FLECHAS	0.00	2.96	6.04	9.18
NA	0.00	2.96	6.06	9.17	NA	0.00	3.03	6.18	9.42
SECAO 1	0.00	3.01	6.17	9.30	SECAO 6	0.00	2.93	6.02	9.16
(MM)	0.00	3.12	6.23	9.33	(MM)	0.00	3.17	6.43	9.75
	0.00	3.23	6.39	9.57		0.00	3.09	6.18	9.25
	0.00	3.25	6.33	9.36		0.00	3.10	6.20	9.26
	0.00	3.19	6.17	9.04		0.00	3.19	6.33	9.38
	0.00	3.55	7.14	10.75		0.00	2.04	4.11	6.18
	0.00	3.75	7.60	11.44		0.00	2.07	4.19	6.28
	0.00	3.84	7.90	11.98		0.00	2.17	4.40	6.59
FLECHAS	0.00	3.66	7.64	11.67	FLECHAS	0.00	2.15	4.37	6.57
NA	0.00	3.75	7.77	11.75	NA	0.00	2.18	4.44	6.71
SECAO 2	0.00	3.86	7.90	11.93	SECAO 7	0.00	2.12	4.32	6.53
(MM)	0.00	3.76	7.63	11.48	(MM)	0.00	2.26	4.55	6.83
	0.00	4.22	8.38	12.57		0.00	2.17	4.34	6.50
	0.00	4.05	8.02	11.94		0.00	2.16	4.28	6.40
	0.00	4.13	8.01	11.81		0.00	2.23	4.39	6.54
	0.00	3.87	7.65	11.34		0.00	1.04	2.10	3.09
	0.00	4.10	8.21	12.33		0.00	1.07	2.17	3.22
	0.00	4.27	8.63	13.01		0.00	1.13	2.31	3.44
FLECHAS	0.00	4.28	8.65	13.14	FLECHAS	0.00	1.13	2.32	3.47
NA	0.00	4.03	8.22	12.56	NA	0.00	1.15	2.38	3.57
SECAO 3	0.00	4.29	8.67	13.13	SECAO 8	0.00	1.12	2.33	3.50
(MM)	0.00	4.23	8.49	12.84	(MM)	0.00	1.19	2.44	3.64
	0.00	4.59	9.13	13.65		0.00	1.13	2.28	3.40
	0.00	4.50	8.87	13.08		0.00	1.11	2.24	3.33
	0.00	4.49	8.78	12.90		0.00	1.14	2.25	3.33
	0.00	3.92	7.87	11.86					
	0.00	4.06	8.25	12.53					
	0.00	4.12	8.39	12.70					
FLECHAS	0.00	4.23	8.56	12.91					
NA	0.00	4.12	8.38	12.72					
SECAO 4	0.00	4.34	8.76	13.19					
(MM)	0.00	4.32	8.53	12.76					
	0.00	4.40	8.71	13.04					
	0.00	4.36	8.56	12.71					
	0.00	4.54	8.77	12.97					

Figura 65 ELASTICA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secção 2

Trem Tipo nas vigas 5 e 15

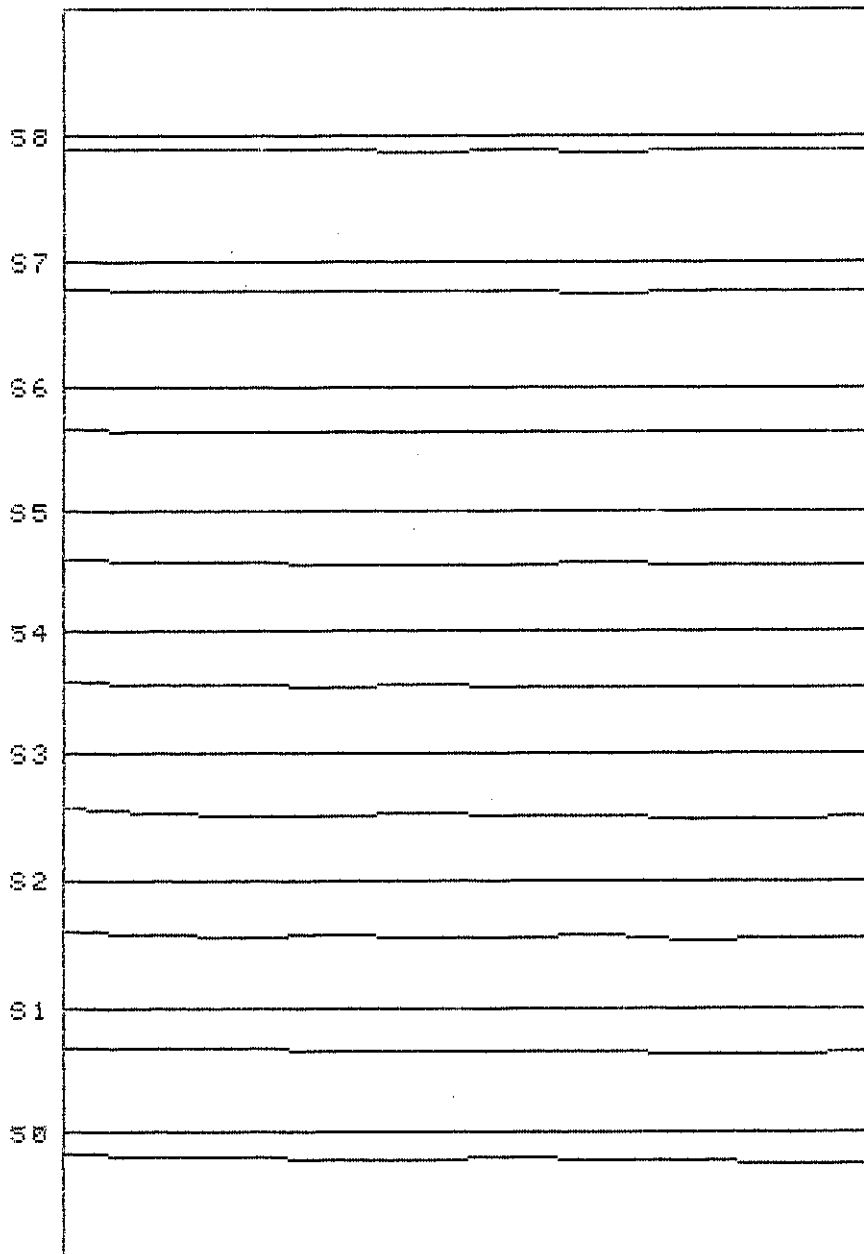


Tabela 37

CARREGAMENTO NA SECAO 2 (em KN)
TREM TIPO NAS VIGAS 1 E 11

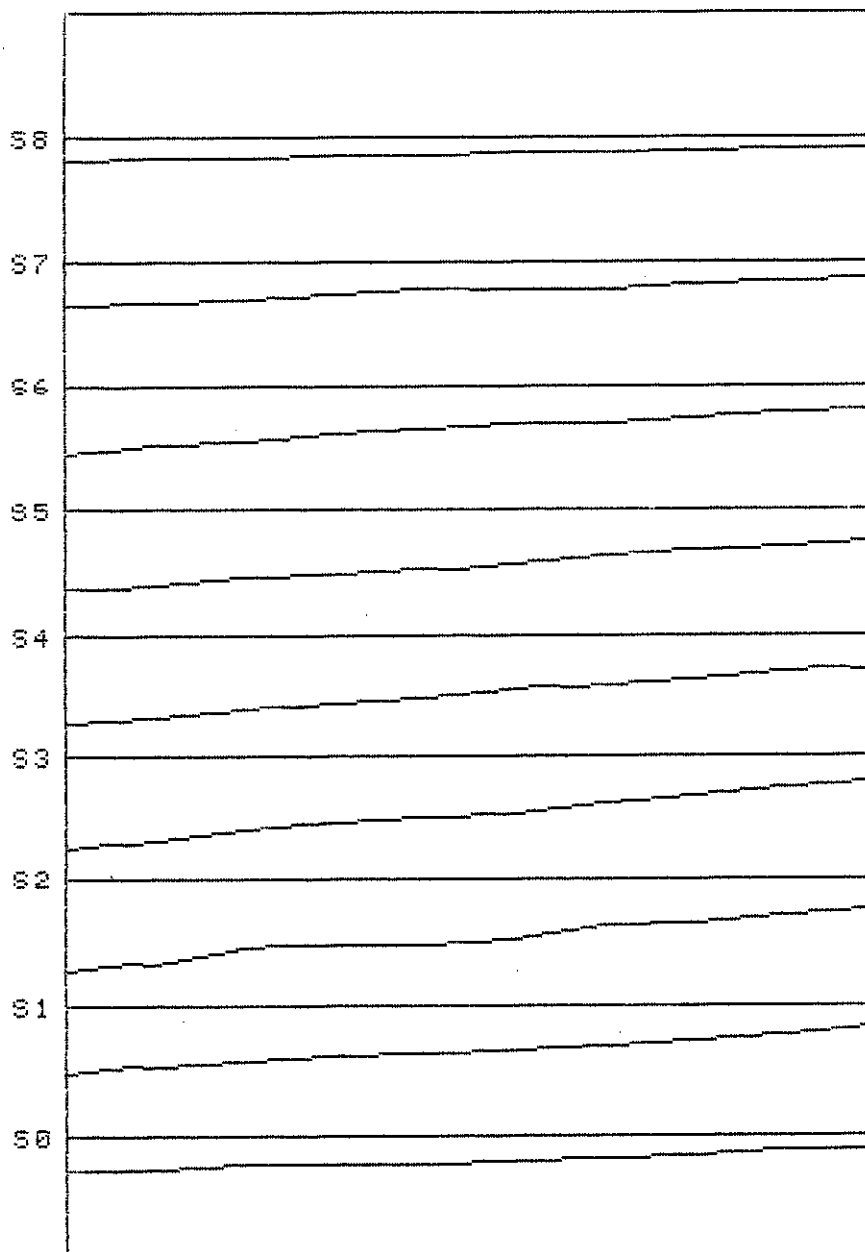
	CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0		CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0
	0.00	2.55	3.84	5.13		0.00	5.74	8.62	11.50
	0.00	2.30	3.46	4.63		0.00	5.38	8.09	10.81
	0.00	2.01	3.02	4.03		0.00	4.83	7.27	9.72
FLECHAS	0.00	2.01	3.05	4.08	FLECHAS	0.00	4.61	6.90	9.23
NA	0.00	1.90	2.91	3.92	NA	0.00	4.20	6.32	8.47
SECAO 0	0.00	1.75	2.68	3.61	SECAO 5	0.00	3.83	5.75	7.66
(MM)	0.00	1.59	2.40	3.19	(MM)	0.00	3.30	4.91	6.50
	0.00	1.46	2.20	2.93		0.00	2.97	4.38	5.77
	0.00	1.18	1.75	2.30		0.00	2.65	3.90	5.11
	0.00	0.97	1.40	1.78		0.00	2.27	3.31	4.31
	0.00	4.94	7.42	9.90		0.00	4.78	7.24	9.75
	0.00	4.15	6.27	8.39		0.00	4.15	6.25	8.37
	0.00	3.77	5.70	7.61		0.00	3.89	5.89	7.92
FLECHAS	0.00	3.29	4.97	6.68	FLECHAS	0.00	3.36	5.07	6.78
NA	0.00	3.20	4.87	6.57	NA	0.00	3.09	4.64	6.19
SECAO 1	0.00	2.90	4.43	5.98	SECAO 6	0.00	2.65	3.99	5.32
(MM)	0.00	2.68	3.99	5.28	(MM)	0.00	2.68	3.99	5.30
	0.00	2.36	3.54	4.68		0.00	2.34	3.47	4.58
	0.00	2.00	2.95	3.85		0.00	2.04	2.99	3.90
	0.00	1.51	2.17	2.79		0.00	1.84	2.66	3.42
	0.00	6.51	9.80	13.15		0.00	3.18	4.81	6.43
	0.00	5.86	8.76	11.71		0.00	2.95	4.46	5.96
	0.00	4.94	7.39	9.87		0.00	2.79	4.23	5.64
FLECHAS	0.00	4.39	6.62	8.90	FLECHAS	0.00	2.49	3.78	5.05
NA	0.00	4.30	6.55	8.83	NA	0.00	2.16	3.27	4.35
SECAO 2	0.00	4.12	6.24	8.37	SECAO 7	0.00	1.95	2.94	3.91
(MM)	0.00	3.37	5.02	6.65	(MM)	0.00	1.96	2.94	3.91
	0.00	3.17	4.71	6.21		0.00	1.64	2.43	3.20
	0.00	2.55	3.76	4.91		0.00	1.46	2.16	2.83
	0.00	2.22	3.23	4.18		0.00	1.34	1.95	2.53
	0.00	6.78	10.27	13.85		0.00	1.65	2.47	3.25
	0.00	6.00	9.06	12.17		0.00	1.48	2.24	2.96
	0.00	5.36	8.07	10.80		0.00	1.43	2.16	2.87
FLECHAS	0.00	4.90	7.37	9.86	FLECHAS	0.00	1.31	1.99	2.65
NA	0.00	4.49	6.80	9.15	NA	0.00	1.21	1.84	2.44
SECAO 3	0.00	4.32	6.51	8.72	SECAO 8	0.00	1.11	1.70	2.27
(MM)	0.00	3.73	5.52	7.27	(MM)	0.00	1.08	1.63	2.16
	0.00	3.14	4.59	5.98		0.00	0.91	1.38	1.82
	0.00	2.70	3.92	5.08		0.00	0.80	1.20	1.57
	0.00	2.30	3.27	4.16		0.00	0.70	1.04	1.35
	0.00	6.41	9.68	13.02					
	0.00	6.12	9.17	12.29					
	0.00	5.52	8.31	11.09					
FLECHAS	0.00	5.08	7.60	10.13					
NA	0.00	4.94	7.23	9.53					
SECAO 4	0.00	4.22	6.34	8.46					
(MM)	0.00	3.75	5.58	7.37					
	0.00	3.24	4.81	6.33					
	0.00	2.83	4.22	5.57					
	0.00	2.45	3.58	4.65					

Figura 66

ELASTICA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secao 2

Trem Tipo nas vigas i e ii



CARREGAMENTOS E FLECHAS NA SEÇÃO TRANSVERSAL CENTRAL

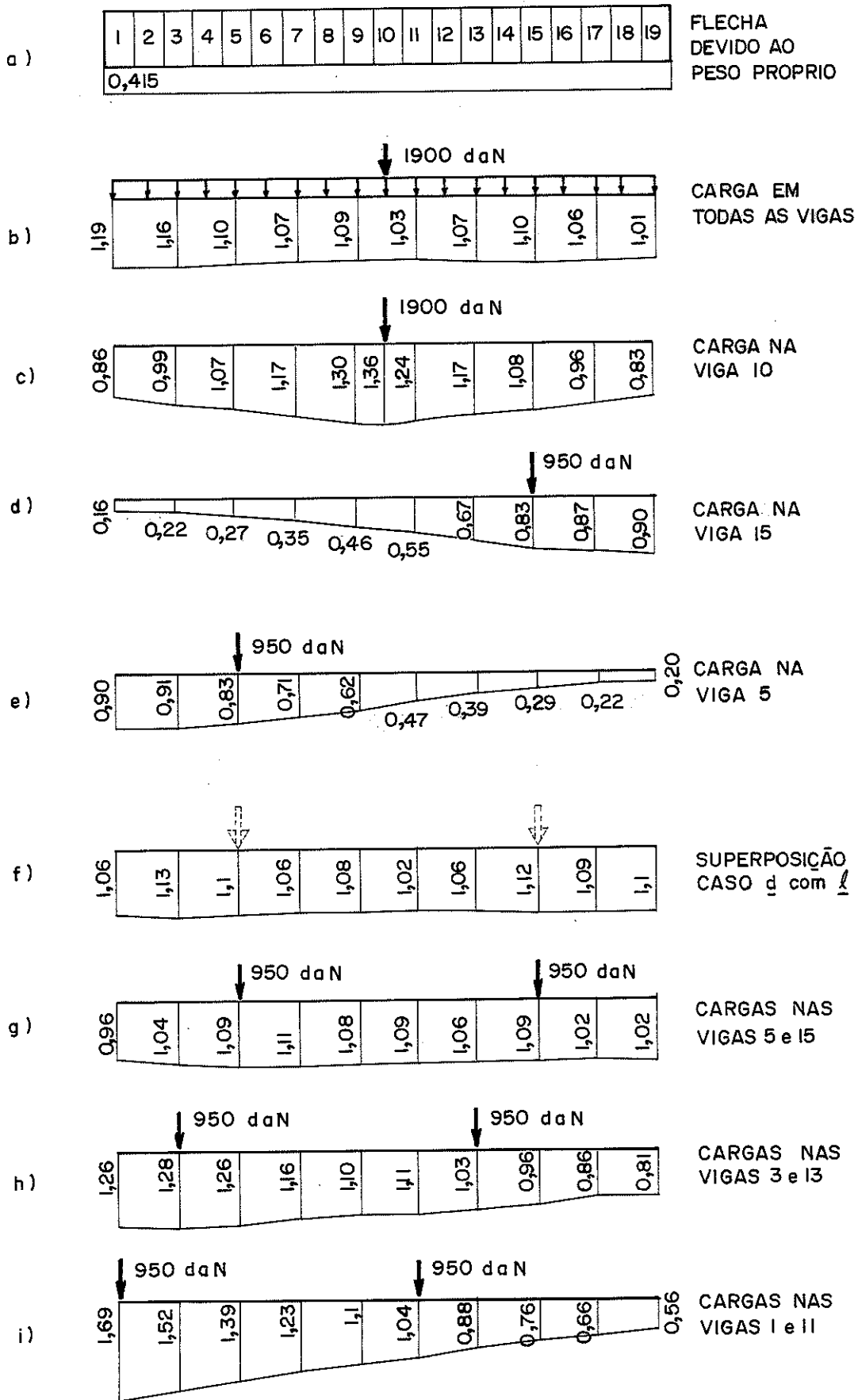


Figura 67

Na fig. 67 d e e pode-se observar a simetria transversal do conjunto, com o carregamento mais próximo das bordas do modelo. Fazendo a superposição destes dois casos obtém-se a fig. 67 f, a representa o carregamento simulando o trem-tipo de duas rodas.

A fig. 67 g apresenta o resultado do ensaio com trem-tipo de duas rodas, centrado. Se deslocarmos o trem-tipo para borda do modelo (caso h, i) tem-se o comportamento mais crítico da estrutura.

O trem-tipo nunca estará situado na borda da ponte (caso i), pois neste estudo não está sendo levado em conta a passarela ou guarda roda. Portanto a posição crítica do trem-tipo na ponte será o caso h.

4.4- RELAÇÃO MODELO-PROTÓTIPO - DEZENOVE VIGAS

4.4.1- Relação entre flechas

Tomando-se o trem-tipo centrado no modelo constituído por 19 vigas, fig. 67 g, pode-se com os resultados destes ensaios prever o comportamento do protótipo.

A partir de resultados dos ensaios e considerando a flecha admissível: $\frac{\ell}{350} = 1,43$ cm, Norma NBR 7190, tem-se

$$P_{Mod,q} = 19 \text{ KN}$$

$$a_{Mod,q} = 1,09 \text{ cm} \quad a_{final} = 1,09 + 0,415 = 1,505 \text{ cm}$$

$$a_{Mod,g} = 0,415 \text{ cm}$$

isto é, a flecha final é ligeiramente superior a admissível.

Pela teoria da semelhança física e considerando a flecha admissível no protótipo: $\bar{a} = \frac{\ell}{350} = 5,72$ cm, conforme NBR 7190. Tem-se:

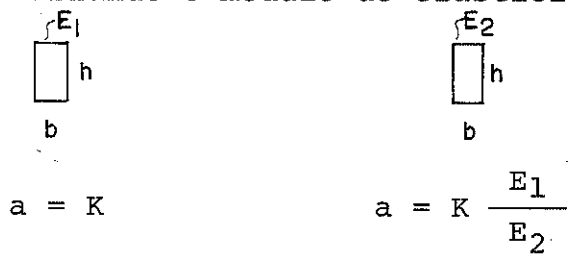
$$P_{Mod,q} = \frac{1}{\lambda^2} P_{Prot,q} \quad \therefore P_{Prot,q} = 304 \text{ KN}$$

$$a_{Mod,q} = \frac{1}{\lambda} a_{Prot,q} \quad \therefore a_{Prot,q} = 4,36 \text{ cm}$$

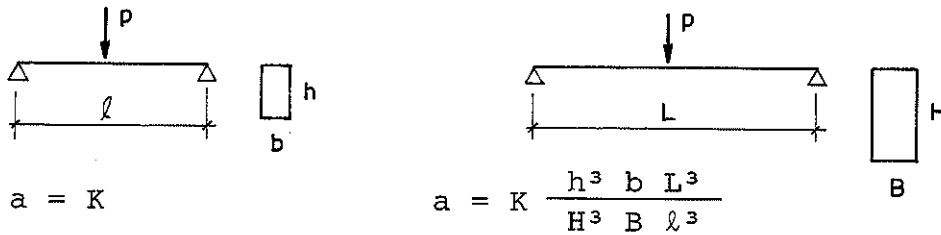
$$a_{Mod,g} = \frac{1}{\lambda^2} a_{Prot,g} \quad \therefore a_{Prot,g} = 5,64 \text{ cm}$$

$$a_{final} = 4,36 + 6,64 = 11,0 \text{ cm}$$

Variando o módulo de elasticidade $E_1 \neq E_2$

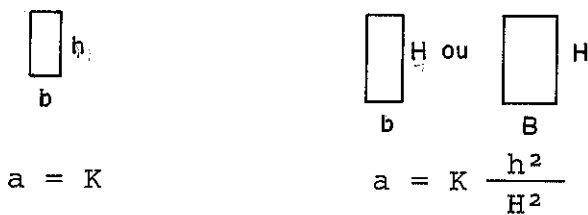


Variando vários elementos simultaneamente, por exemplo, a altura, largura, comprimento, tem-se a relação:

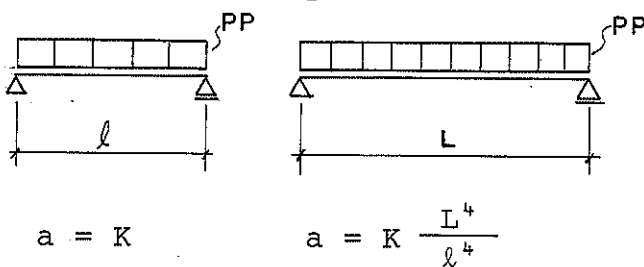


b) para carga permanente (peso próprio)

Variando altura ou altura e largura



Variando o comprimento



Como exemplo, pode-se obter a flecha de modelo de escala diferente do ensaiado. Fazendo-se a comparação do modelo em escala 1:33 de madeira maciça (Pinho do Paraná) com o modelo em escala 1:4 constituído por 19 vigas (Peroba Rosa), fig. 68, tem-se

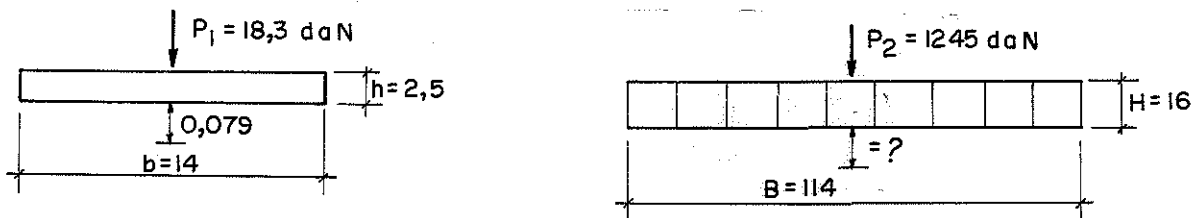


Fig. 68- Comparação de modelos

DIM.(cm)

$$\begin{aligned} \lambda &= 60 \text{ cm} & L &= 500 \text{ cm} \\ E_1 &= 6500 \text{ MPa} & E_2 &= 11000 \text{ MPa} \\ a_1 &= 0,079 \text{ cm} & a_2 &= 0,079 \frac{h^3 b P_2 L^3 E_1}{H^3 B P_1 \lambda^3 E_2} = 0,86 \text{ cm} \end{aligned}$$

No ensaio do modelo de dezenove vigas de Peroba Rosa obteve-se a flecha $a = 0,891 \text{ cm}$.

No início do estudo da ponte de madeira em placa, item 3.1. e a partir da equação encontrada pode-se obter para a Peroba Rosa uma altura hipotética de 97 cm para a placa. No modelo reduzido de 19 vigas na escala 1:4 a altura deveria ter sido 24,25 cm.

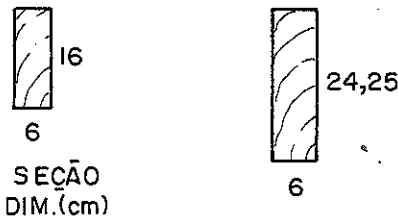
Devido a dificuldade de obtenção de peças de Peroba Rosa em escala não comerciais utilizou peças de 16 cm, prevendo-se em seguida reduzir o comprimento da ponte.

Através da relação entre flechas pode-se obter os resultados desejados no protótipo, alterando a altura e a carga acidental nas peças do modelo ensaiado.

Modelo (ensaiado)

Modelo (proposto)

$$\begin{aligned} P_1 &= 19 \text{ KN} \\ a_q &= 1,90 \text{ cm} = K_1 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} P_2 &= 22,5 \text{ KN} \\ a_q &= K_1 \frac{h^3 p_2}{H^3 p_1} \\ &= \frac{1,09 \cdot 16^3 \cdot 22,5}{24,25^3 \cdot 19} = \\ &= 0,370 \text{ cm} \\ a_g &= K_2 \frac{h^2}{H^2} = \frac{0,415 \cdot 16^2}{24,25^2} \\ a_g &= 0,1806 \text{ cm} \end{aligned}$$

Passando a relação da carga e das flechas obtidas na pe-
ças de seções 6x24,25cm para o protótipo tem-se, na escala 1:4 as
dimensões 24x97 cm² para as vigas.

$$\begin{aligned} P_{\text{Mod}} &= \frac{1}{\lambda^2} P_{\text{Prot}} & P_{\text{Prot}} &= 360 \text{ KN} \\ a_{\text{Mod},q} &= \frac{1}{\lambda} a_{\text{Prot},q} & a_{\text{Prot},q} &= 1,48 \text{ cm} \\ a_{\text{Mod},g} &= \frac{1}{\lambda^2} a_{\text{Prot},g} & a_{\text{Prot},g} &= 2,8 \text{ cm} \end{aligned}$$

A flecha final no protótipo para um carregamento do trem-tipo com duas rodas, classe 360 KN, seria $a = 4,37$ cm, estando na relação $\frac{l}{457}$, inferior à admissível. Deve-se entretanto notar não ter sido considerada a carga de multidão no modelo ensaiado.

4.4.2- Verificações de tensões no modelo

Até agora, todos os modelos foram ensaiados considerando-se a limitação da flecha admissível, não verificando as tensões de vidas à flexão e ao cisalhamento.

4.4.2.1- Tensões devidas à flexão

O ensaio do modelo com uma carga de 19 KN (fig 67b) distribuída na seção transversal central sobre todas as vigas apresentou flechas semelhantes às do ensaio com o trem-tipo centrado com a mesma carga (fig. 67g). Como em todas as vigas ocorre aproximadamente a mesma flecha todas recebem aproximadamente o mesmo quinhão de carga. Fig. 69.



Fig. 69

Pela equação $P_i = \frac{P_t \cdot a_i}{a_t}$ na qual

P_i = carga na viga desejada

a_i = flecha sob a viga desejada

a_t = soma de todas as flechas

Pode-se calcular a carga atuante em uma determinada viga. Conhecida a carga, faz-se um cálculo aproximado do momento para uma viga biapoiada com cargas concentradas. Pode-se utilizar para o cálculo do momento no meio do vão a equação $a = \frac{Ml^2}{12 EI}$

Como exemplo, toma-se o caso mais crítico do ensaio ou seja das rodas do trem-tipo na borda da seção transversal central. A maior tensão estará atuando na viga da borda de maior deslocamento, pois, todas as vigas possuem a mesma rigidez.

$$a = \frac{Ml^2}{12EI} \dots 1,69 = \frac{M \cdot 500^2}{12.1100000 \cdot 2048}$$

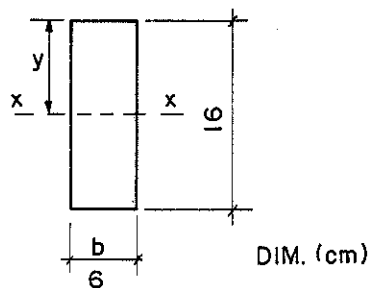
$M_{acid} = 182747 \text{ N.cm}$ (momento devido e a carga acidental)

$$M_{pp} p \frac{l^2}{8} = 24000 \text{ N.cm}$$
 (momento devido ao peso próprio)

$$M_{total} = M_{acid} + M_{pp} = 206740 \text{ N.cm}$$

Verificação da tensão de flexão

$\bar{\sigma}_f = 1350 \text{ N/cm}^2$ (tensão admissível à flexão da Peroba Rosa).



$$\sigma_f = \frac{206747}{2048} \cdot 8 = 807,5 \text{ N/cm}^2 < \bar{\sigma}_f$$

4.4.2.2- Tensões devidas ao cisalhamento

Na região dos apoios, que distam $x \leq 3d$, sendo d a altura da viga, o efeito de cisalhamento é diminuído pelo efeito de compressão normal e a NBR-7190, considera este fato permitindo a redução da tensão de cisalhamento atuante de $\frac{x}{3d}$, obtendo-se na região dos apoios.

$$\tau_{at} = \frac{VS}{bI} \cdot \frac{x}{3d} \leq \bar{\tau}_f$$

Tomando o ensaio com carregamento nas vigas 1 e 11 de 9500N a uma distância $3d$ dos apoios, fig. 70, tem-se:

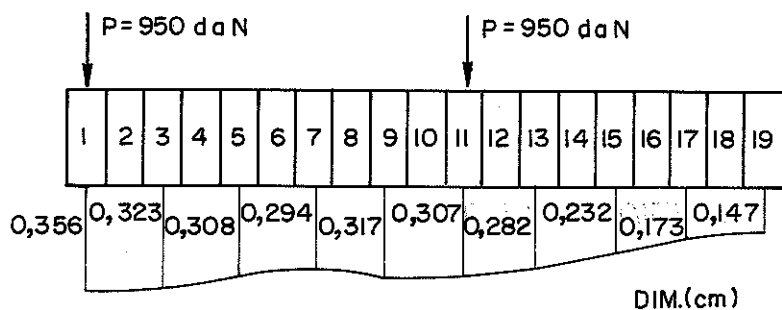


Fig. 70

Pela equação $P_i = \frac{P_t \cdot a_i}{a_t}$ pode-se obter a parcela de carga que a viga mais crítica recebe

$$P_1 = \frac{19000 \cdot 0,356}{5,226} = 1294 \text{ N} \quad \begin{array}{l} a_i = 0,356 \text{ cm} \\ a_t = 5,225 \text{ cm} \\ p = 19000 \text{ N} \end{array}$$

$$v = \frac{\tau_f bI}{S} = \frac{121 \cdot 6 \cdot 2048}{192} = 7744 \text{ N}$$

A viga mais crítica do modelo resiste a um esforço cortante de 7744 N e está recebendo apenas uma carga de 1294 N.

4.4.3- Relação entre flechas e tensões para carga concentrada

4.4.3.1- Relação entre a tensão de flexão e flecha

$$\bar{\sigma}_{fl} = \frac{M}{I} Y \leq \bar{\sigma}_{fl} \dots \bar{P}_m = \frac{2 \bar{\sigma} b h^2}{3 \ell}$$

$$a = \frac{P \ell^3}{48EI} \leq \frac{\ell}{350} \dots \bar{P}_a = \frac{4Ebh^3}{350 \ell^2}$$

$$\frac{\bar{P}_{\sigma fl}}{\bar{P}_a} = \frac{175 \bar{\sigma} \ell}{3Eh}$$

4.4.3.2- Relação entre a tensão de cisalhamento e de flexão

$$\tau_{fl} = \frac{VS}{bI} \leq \bar{\tau}_{fl}$$

A força cortante máxima (sem redução) está a uma distância entre $\frac{\ell}{4}$ a $3h$ do apoio, dependendo da relação ℓ/h .

$$v = 0,75P \quad \text{ou} \quad v = \left(1 - \frac{3h}{\ell}\right) P$$
$$0,75P = P \left(\frac{\ell - 3h}{\ell}\right)$$
$$\frac{\ell}{h} = 12$$

Aplicando estas equações para Peroba Rosa, obtém-se:

$$\frac{\bar{P}_{\sigma fl}}{\bar{P}_{\tau fl}} = \frac{2,25}{3} \cdot \frac{\bar{\sigma}_{fl}}{\bar{\tau}_{fl}} \cdot \frac{h}{\ell}$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{fl} &= 1350 \text{ N} \\ \bar{\tau}_{fl} &= 121 \text{ N} \\ E &= 941000 \text{ N/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\frac{\bar{P}_{\sigma fl}}{\bar{P}_a} = 0,0836 \frac{l}{h} \therefore \frac{\bar{P}_a}{\bar{P}_m} = 11,95 \frac{h}{l}$$

Portanto se $l > 11,95h$ a flecha é mais crítica

$$\frac{\bar{P}_{\sigma fl}}{\bar{P}_{\tau fl}} = 8,36 \frac{h}{l}$$

Se $l > 8,36 h$ a tensão de flexão é a mais crítica.

O modelo composto por 19 vigas de Peroba Rosa encontra-se na relação $\frac{l}{h} = 31,25$ ficando assim, limitado pela flecha admissível para cargas concentradas.

Na fig. 71 pode-se observar através da relação $\frac{l}{h}$ de uma viga, qual o critério de verificação: tensão normal na flexão, tensão de cisalhamento ou flecha, será mais crítico para cargas concentradas, utilizando-se a Peroba Rosa.

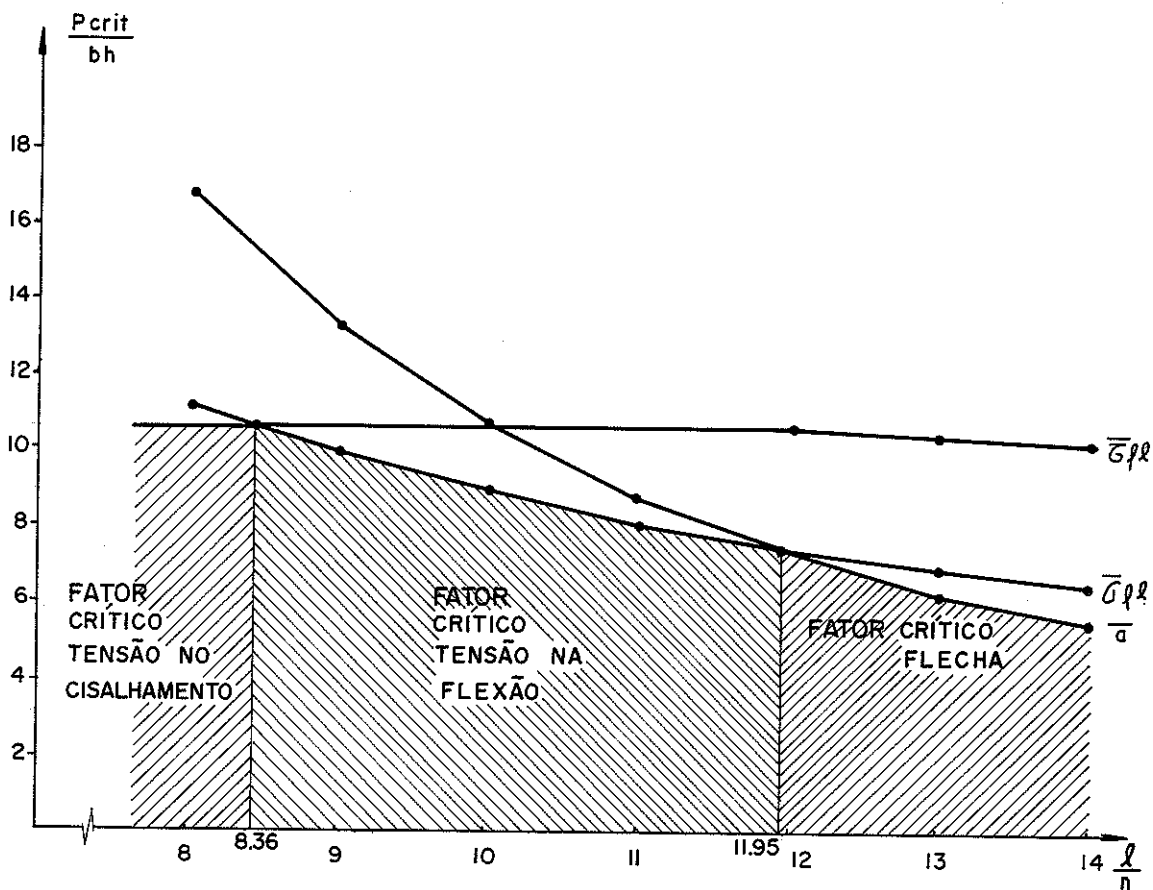


Fig. 71-Relação tensões e flechas . Carga concentrada.

4.4.4- Relação entre flechas e tensões para carga acidental concentrada e permanente distribuída

Para a carga acidental concentrada e para carga permanente distribuída, juntas, pode-se obter uma curva limite entre a flecha, tensão normal na flexão e tensão de cisalhamento para a Peroba Rosa. Fig. 72

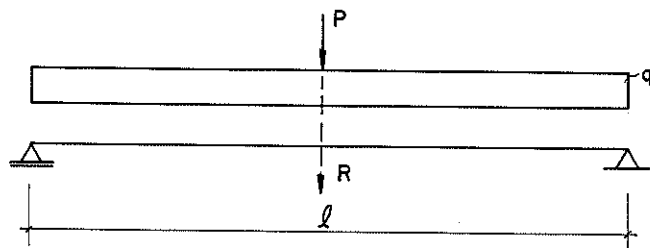


Fig. 72

4.4.4.1- Relação entre flecha e tensão normal na flexão

$$\sigma_{fl} = \left(\frac{P\ell}{4} + \frac{q\ell^2}{8} \right) \frac{6}{bh^2} = \left(\frac{P\ell}{4} + \frac{R\ell}{8} \right) \frac{6}{bh^2} \leq 1350$$

$$a = \frac{P\ell^3}{48EI} + \frac{5p\ell^4}{384(2/3)EI} = \frac{\ell^3}{48EI} \left(p + \frac{15R}{16} \right) \leq \frac{\ell}{350}$$

$$\frac{a_1}{\sigma_{fl_2}} \rightarrow \frac{16 \bar{P}_1 + 15 \bar{R}_1}{2 \bar{P}_2 + \bar{R}_2} = 95,6 \frac{h}{\ell}$$

$$P = KR$$

$$\frac{16K\bar{R} + 15K\bar{R}}{2K\bar{R} + \bar{R}} = 95,6 \frac{h}{\ell}$$

$$\frac{\bar{R}a}{\bar{R}\sigma_{fl}} = \frac{(2K + 1)}{(16K + 15)} 95,6 \frac{h}{\ell} \quad (1)$$

4.4.4.2- Relação entre as tensões de flexão de cisalhamento

$$v = (0,75 p + q \ell/4) \text{ para } \ell \leq 12 h$$

$$v = \left(0,75KR + \frac{R}{4} \right)$$

$$\tau_{fl} = \frac{(0,75KR + R/4)S}{b I} \leq \bar{\tau}_{fl}$$

$$\bar{R} \frac{(0,75K + 0,25) 3}{2 bh} = 121$$

$$\frac{\bar{R}\tau_{fl}}{\bar{R}\sigma_{fl}} = \frac{180 bh (h/\ell)}{(2K + 1)} \cdot \frac{3(0,75K + 0,25)}{24,2 bh} \quad (2)$$

Tomando-se as equações (1) e (2) e igualando-se a um tem-se

$$\frac{l}{h} = \frac{(2K + 1)}{(16K \pm 15)} 95,6$$

$$\frac{l}{h} = 22,31 \frac{(0,75K + 0,25)}{(2K + 1)}$$

Atribuindo-se valores para K pode-se obter as curvas limites das tensões e das flechas, figura 73.

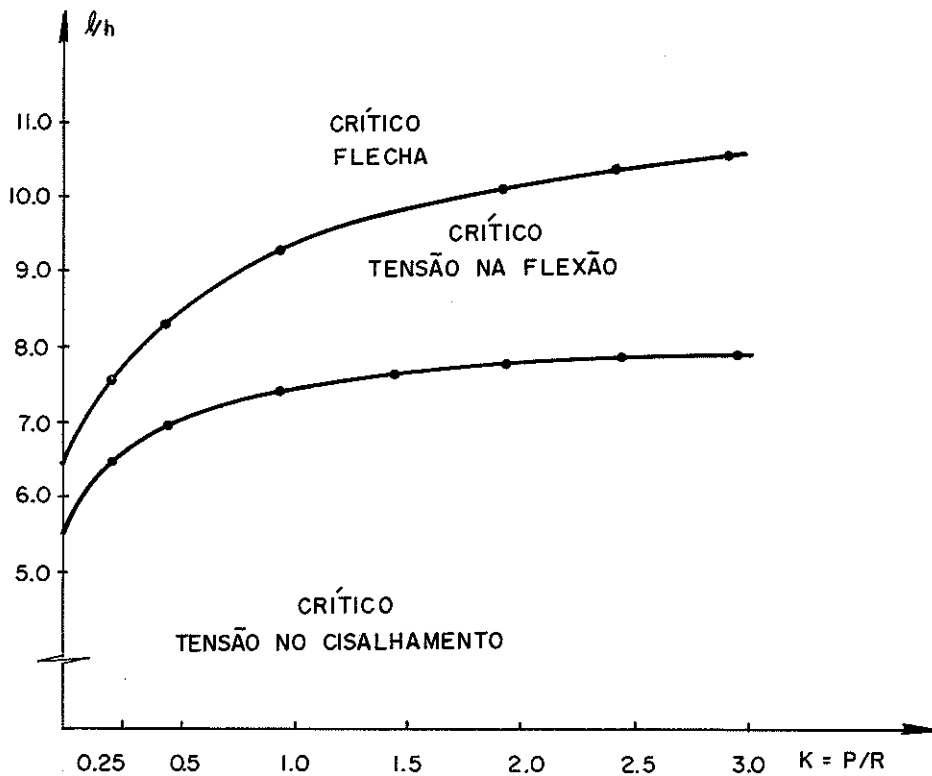


Fig. 73 - Curvas da relação l/h com $K = P/R$

A relação $\frac{l}{h}$ do modelo está na ordem de 31,25. Para os carregamentos concentrados e distribuídos, o modelo fica limitado apenas pela flecha admissível, não precisando fazer as verificações das tensões de flexão e cisalhamento para as vigas mais críticas.

4.5- ENSAIO ATÉ A RUPTURA DO MODELO CONSISTIDO POR 19 VIGAS

Realizados os ensaios em todas as seções, sob comportamento elástico, ensaiou-se o modelo para o carregamento até a ruptura.

Instalou-se o cilindro hidráulico na seção transversal central, sobre a viga número 10. Colocaram-se três relógios comparadores sob a seção transversal central, sendo dois nas bordas do mode

lo e um sob a viga 10 (central) para leitura das flechas até a proximidade da ruptura, figura 74 .

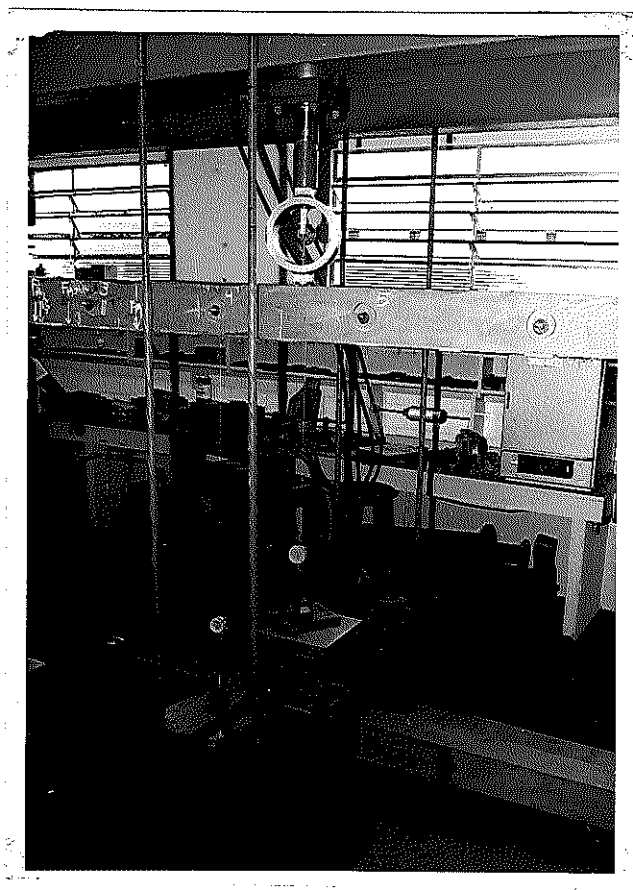


Fig. 74-Ensaio do modelo de 19 vigas, até a ruptura

A tabela 38 apresenta as flechas do ensaio do modelo até a ruptura.

Tabela 38 - Carga centrada e flechas

Carga em KN	Leitura das flechas (mm)		
	-v-1	-v-10	-v-19
0	0	0	0
6,6	2,24	4,64	1,14
13,3	4,45	10,28	3,70
19,9	6,70	15,84	6,23
26,6	8,97	21,16	8,70
33,2	11,12	26,47	11,14
39,8	13,36	31,52	13,77
43,2	14,36	34,29	15,06

Ao atingir a flecha de 34,29 mm retiraram-se os relógios comparadores, e colocou-se uma régua milimetrada. Ao atingir a car

ga de 126,2 KN rompeu-se a viga central, a qual se encontrava com uma flecha aproximadamente de 100 mm e o modelo não absorveu mais carga. Descarregou-se o conjunto voltou a posição normal, figuras 75, 76 .

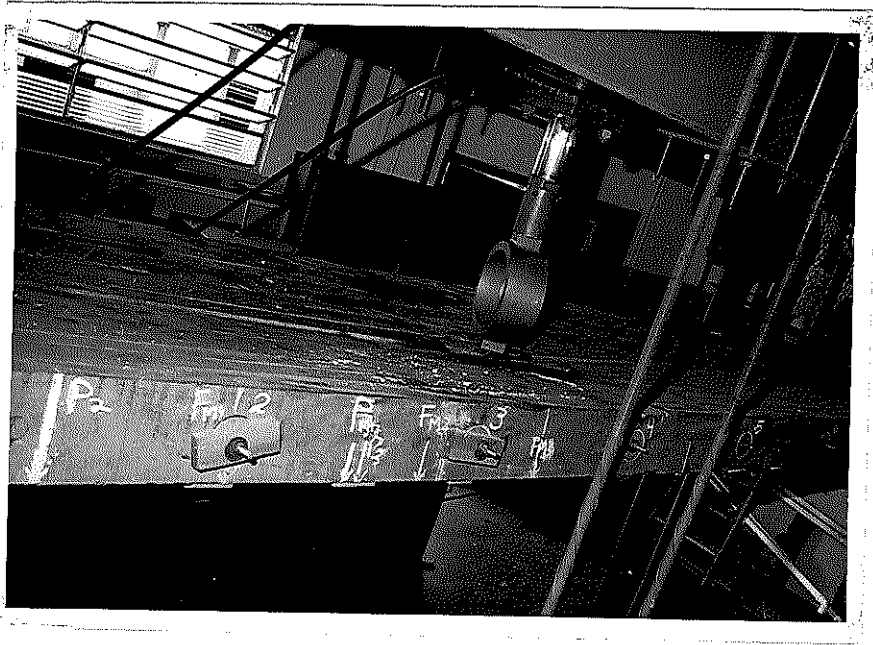


Fig. 75-Modelo em fase de ruptura

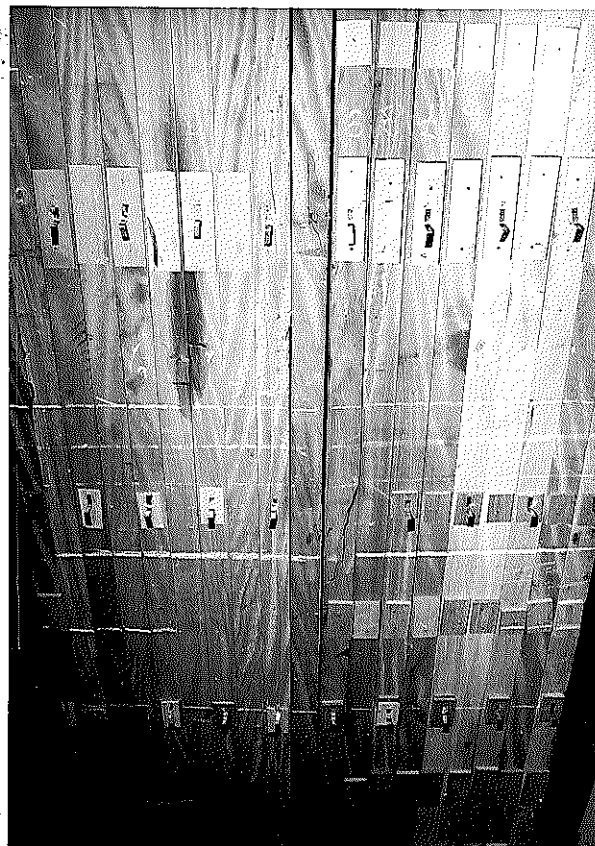


Fig. 76-Vista inferior da viga rompida.

Desmontando-se o modelo após o ensaio observou-se ter ocorrido ruptura, nas vigas número 8, 10 e 11 por tração na flexão.

Ocorreu cisalhamento da madeira alojada na parte interna dos anéis metálicos das vigas número 8, 9, 10, 11, 12, em algumas seções transversais próximas do centro do modelo.

Apenas nas vigas 3 e 19 houve cisalhamento da madeira dentro dos anéis metálicos em apoios opostos.

A fig. 77 apresenta parte do modelo desmontado, com detalhe do cisalhamento da madeira no interior do anel e ruptura por tração.



Fig. 77 -Ruptura por cisalhamento na ligação pelos anéis

5- ESTUDO DE MODELOS COMPOSTOS POR POSTES

5.1- INTRODUÇÃO

Comprovada a eficiência dos anéis metálicos na solidarização lateral das vigas retangulares das pontes ensaiadas em modelo 1:4, pensou-se encontrar bons resultados ensaiando pontes constituídas por postes de eucalipto citriodora, em modelo 1:4.

A escolha do eucalipto citriodora para o estudo de construções de pontes em estradas vicinais, deu-se pelo fato deste apresentar excelentes características físicas, de resistência e de elasticidade. O Eucalipto Citriodora apresenta crescimento rápido, postes retilíneos, com comprimento superior a 20 m.

Os postes são colocados lado a lado alternando base com topo, sendo interligados por anéis metálicos. Pretendendo-se alcançar vão de 20 m, em pontes classe 360 KN pode-se nervurar o conjunto de postes, figura 78.

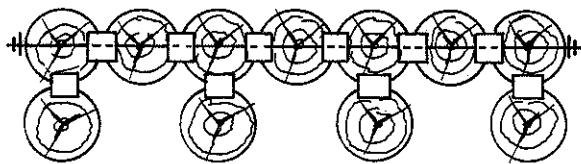


Fig. 78- Seção da ponte de postes

O esquema agora apresentado tem boa viabilidade construtiva e econômica.

5.2- ESTIMATIVA DE VÃOS EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DOS POSTES

Um breve estudo comparativo do momento de inércia teórica das seções de vigas circulares é apresentada nas figuras 79,80,81.

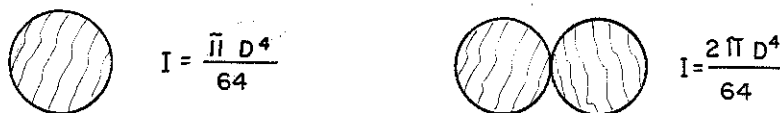


Fig.79- Momento de inércia de postes

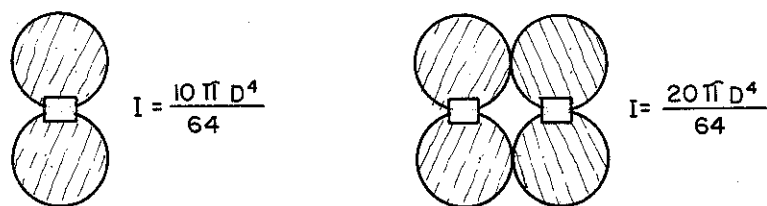


Fig. 80 -Viga bicircular e viga dupla bicircular

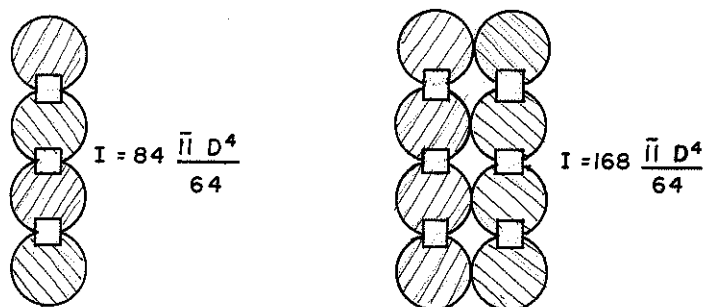


Fig. 81 -Viga quadricircular e viga dupla quadricircular

É importante conhecer a redução destes valores, por imperfeições naturais de execução.

Para o caso de ponte nervurada o esquema construtivo deveria ter a composição de viga bicircular com postes, figura 82 .

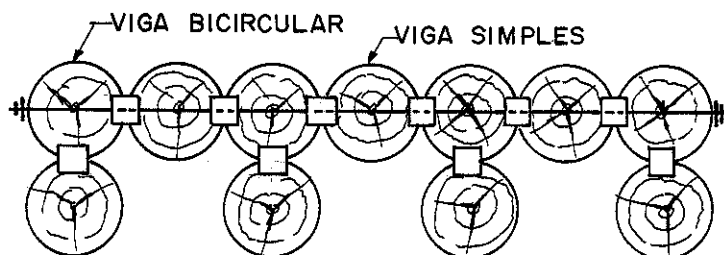


Fig. 82 - Seção da ponte nervurada

O momento de inércia teórico da seção nervurada poderia ser considerado como:

$$I = 10 \frac{\pi D^4}{64} + \frac{\pi D^4}{64}$$

$$I = 11 \frac{\pi D^4}{64}$$

Devido à dificuldade dos ensaios em modelos, quanto ao carregamento do trem-tipo, procurou-se simplificar, concentrando-se as cargas no meio do vão para a estimativa da flecha no meio do vão livre, figura 83 .

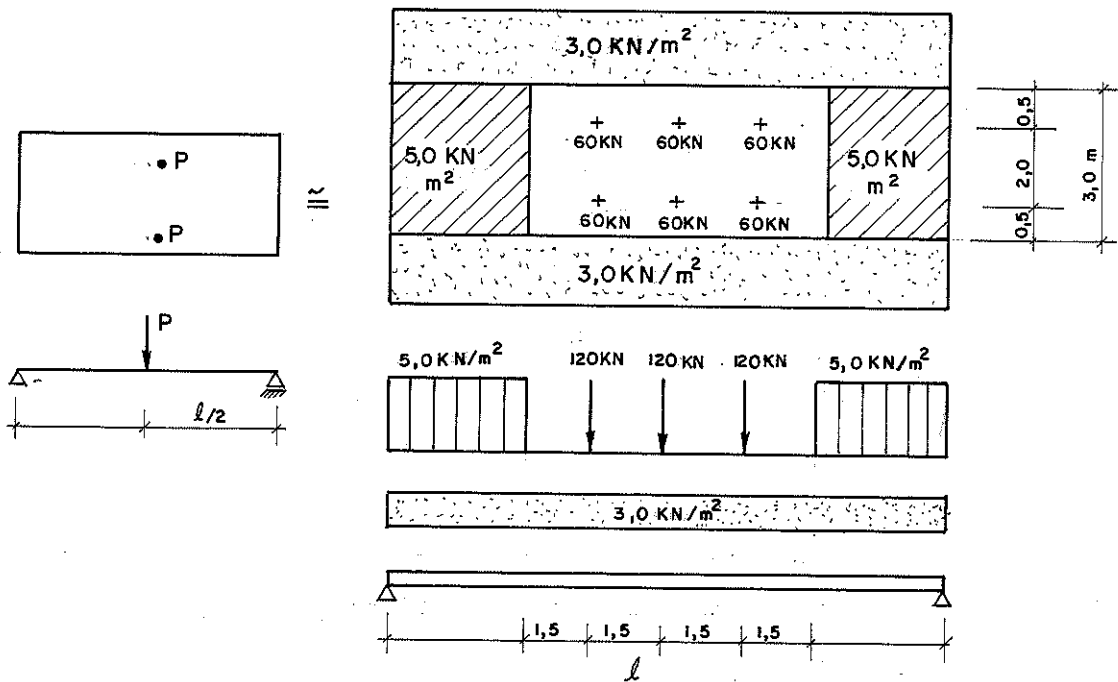


Fig. 83-Equivalência de cargas para simplificar o ensaio

Para esta estimativa, escolheu-se a limitação devida à flecha admissível prevista com a mais favorável à segurança, figura 84 .

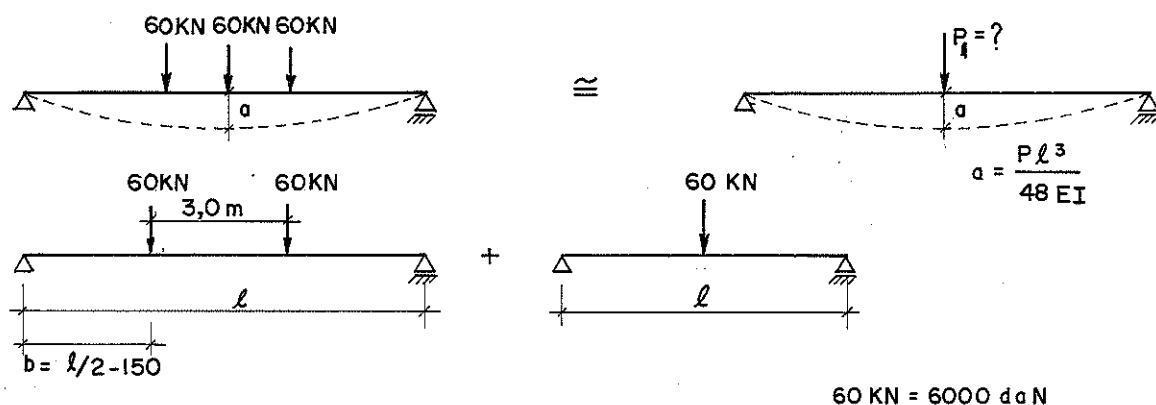


Fig. 84-Equivalência de flechas. Carga das rodas

A equivalência desejada pode ser calculada como apresentada a seguir:

$$a = \frac{6000 b}{24 EI} (3 \cdot l^2 - 4b^2) + \frac{6000 l^3}{48 EI}$$

mas a flecha equivalente é: $a = \frac{P_1 l^3}{48 EI}$. . .

$$P_1 = \frac{48 EI}{l^3} \left[\frac{6000 b}{24 EI} (3 \cdot l^2 - 4b^2) + \frac{6000 l^3}{48 EI} \right]$$

$$P_1 = \frac{36000 (l/2 - 150)}{l} - \frac{48000 (l/2 - 150)^3}{l^3} + 6000$$

P_1 é a carga previsível para meia faixa de tráfego. Para uma faixa de tráfego tem-se:

$$P_{1 \text{ total}} = 2 \left[\frac{36000 (l/2 - 150)}{l} - \frac{48000 (l/2 - 150)^3}{l^3} + 6000 \right]$$

Para o cálculo da carga central (P_2) equivalente à multidão à frente e atrás do veículo, figura 85, tem-se:

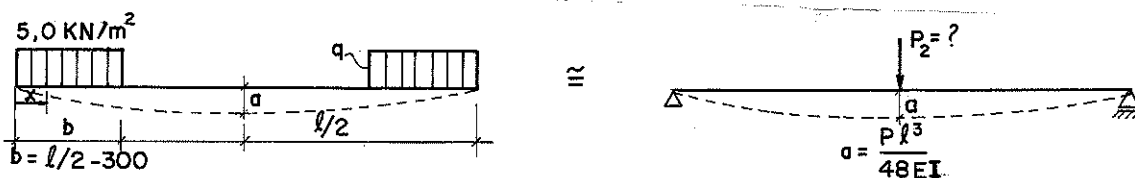


Fig. 85 - Equivalência de flechas. Carga de multidão

$$q = 0,05 \cdot 300 = 15 \text{ daN/cm}$$

$$a = 2 \frac{qb^2 (\ell/2)}{24 EI \ell} [4(\ell/2) \cdot \ell - 2 (\ell/2)^2 - b^2]$$

$$P_2 = \frac{48 EI}{\ell^3} \frac{2 \cdot 15 b^2}{48 EI} (2 \ell^2 - \frac{\ell^2}{2} - b^2)$$

$$P_2 \text{ total} = \frac{30 (\ell/2 - 300)}{\ell^3} [2 \ell^2 - \frac{\ell^2}{2} - (\ell/2 - 300)^2]$$

Para o cálculo da carga central equivalente (P_3) à multidão lateral, figura 86 tem-se:



Fig. 86-Equivalência de flechas. Multidão lateral.

$$a = \frac{5p\ell^4}{384 EI} \text{ portanto } P_3 = \frac{48 EI}{\ell^3} \cdot \frac{5 p\ell^4}{384 EI} \text{ resulta}$$

$$P_3 = 0,625 p\ell$$

A carga acidental total P_A , será:

$$P_A = P_1 + P_2 + P_3$$

Cálculo de P_4 devido ao peso próprio dos postes madeira .
Eucalipto Citriodora $\gamma = 0,001 \text{ daN/cm}^3$

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$p = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \gamma = 0,001 \frac{\pi D^2}{4}$$

$$P_4 = \frac{48 EI}{\ell^3} \cdot \frac{5 \cdot \pi D^2 \cdot \ell \cdot 0,001^4}{384 EI \cdot 4}$$

$$P_4 = \frac{0,24 \pi D^2}{1536} \ell \quad (\text{Peso total de um poste como carga concentrada em kgf})$$

Cálculo de P_5 , devido ao peso do concreto de regularização e do asfalto de proteção, para cada viga. Figura 87 .

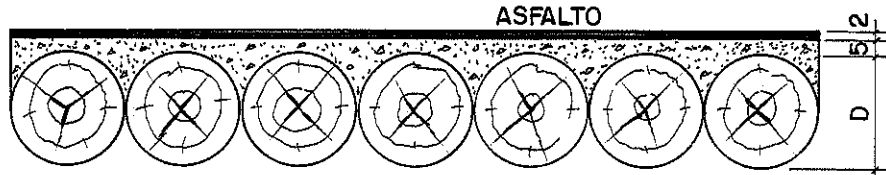


Fig.87-Regularização da ponte com concreto e asfalto

Área de concreto sobre um poste

$$A = D(D/2 + 5) - \frac{\pi D^2}{8} = \frac{0,858 D^2}{8} + 40D$$

Área de asfalto sobre um poste

$$A = 2.D$$

$$p = \left(\frac{0,858 D^2 + 40 D}{8} \right) \cdot 0,0022 + 2.D \cdot 0,002 \text{ Kgf/cm}$$

$$P_5 = 0,625 p \ell$$

$$P_5 = 0,625 \ell \left(\frac{0,858 D^2 + 40 D}{8} \right) 0,0022 + 0,004 D \quad (\text{para cada poste})$$

Adota-se uma largura da ponte $b = 3,5$ m, faixa de tráfego, como sendo mínima, aumentando assim a carga accidental para as vigas.

A carga permanente total P_B , será:

$$P_B = P_4 + P_5$$

Carga accidental P_A , para um poste será:

$$P_A = P_1 + P_2 = \frac{\ell}{n} \left(9,375\ell + \frac{8,1 \cdot 10^{10}}{\ell^3} - \frac{1,62 \cdot 10^9}{\ell^3} + 27000 \right)$$

n = número de vigas (simples, simples e circular, só bicircular)

Carga permanente P_B , para um poste, será

$$P_B = P_4 + P_5 = \ell \left(\frac{98049,424 \cdot 10^{-5} D^2 + 14,4 D}{1536} \right)$$

A flecha admissível: $\bar{a} = \frac{\ell}{350}$ e as equações anteriores:

$$\bar{a} = \frac{P_A \ell^3}{48 E_1 I} + \frac{P_B \ell^3}{48 E_2 I} = \frac{\ell^3 (P_A E_2 + P_B E_1)}{48 I E_1 E_2}$$

E_1 = Módulo de elasticidade para carga acidental

E_1 = 168000 daN/cm² (para o eucalipto citriodora)

E_2 = Módulo de elasticidade para carga permanente

E_2 = 112000 daN/cm² (2/3 E_1).

$$\bar{a} = \frac{\ell}{350} = \left[\frac{\ell^3 \frac{E_2}{n} (9,3751 + \frac{8,1 \cdot 10^{10}}{\ell^3} - \frac{1,62 \cdot 10^9}{\ell^2} + 27000) + \ell^4 (\frac{98049,424 \cdot 10^{-5} D^2 + 14,4D}{1536}) E_1}{48 E_1 E_2 I} \right]$$

Através da equação da flecha, adota-se um diâmetro D para o poste a ser utilizado e encontra-se o comprimento da ponte.

A redução do momento de inércia devida às imperfeições de execução é K e n é o número de vigas.

Tem-se três tipos de seções para pontes.

a) Para pontes com vigas simples, fig. tem-se a equação:

$$\frac{I}{350} = \frac{\ell}{n} (1,2 \cdot 10^{-6} \ell + \frac{10044,643}{\ell^3} - \frac{200,89286}{\ell^2} + 3,3482 \cdot 10^{-3}) + \ell^3 (1,181676 \cdot 10^{-10} D^2 + 1,7376557 \cdot 10^{-9} D)$$

b) Para pontes com vigas simples e bicirculares, fig. , a equação é dada por:

$$\frac{K \cdot 101 + I}{350} = \frac{2\ell^2}{n} (1,2 \cdot 10^{-6} \ell + \frac{100044,643}{\ell^3} - \frac{200,892886}{\ell^2} + 3,3482 \cdot 10^{-3}) + \ell^3 (1,6380848 \cdot 10^{-10} D^2 + 1,7376557 \cdot 10^{-9} D)$$

c) Para pontes com vigas bicirculares, fig. 88 a equação

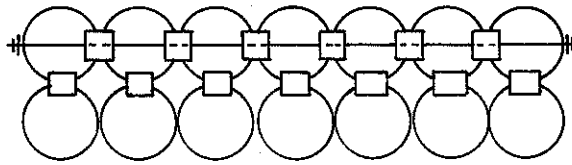


Fig. 88 -Seção da ponte constituída de vigas bicirculares

$$\frac{K20I}{350} = \frac{2\ell^2}{n} (1,2 \cdot 10^{-6} \ell + \frac{10044,643}{\ell^3} - \frac{200,89286}{\ell^2} + 3,3482 \cdot 10^{-3}) + \ell^3 (2,0930010 \cdot 10^{-10} D^2 + 1,737655 \cdot 10^{-9} D)$$

Pelas equações anteriores, obtêm-se o comprimento da ponte para o diâmetro dado. Adota-se $K = 0,8$ para as vigas bicirculares, segundo Hellmeister (16).

Na tabela 39 apresentam-se os resultados da estimativa do vão para os três tipos de pontes.

Tabela 39

Diâmetro dos Postes (cm)	Número de Vigas	Largura de Ponte (cm)	Estimativa do vão para os tipos de Ponte (m)		
			Vigas Simples	Vigas simples e bicirculares	vigas bicirculares
25	16	400	4,60	8,75	11,0
30	13	390	5,65	10,66	13,4
35	11	385	6,65	12,61	15,80
40	10	400	7,75	14,71	18,35
45	9	405	8,80	16,63	20,75
50	8	400	9,80	18,53	22,95
55	7	385	10,70	20,20	24,11

Com estes valores pode-se traçar um gráfico para os três tipos de ponte, figura 89.

Dos três tipos de pontes esquematizados para classe 360KN, as de vigas simples parecem muito limitadas. As de vigas simples e

bicirculares, nervuradas, já se apresentam como bastante satisfatória. Finalmente as de vigas bicirculares podem atingir os maiores vãos.

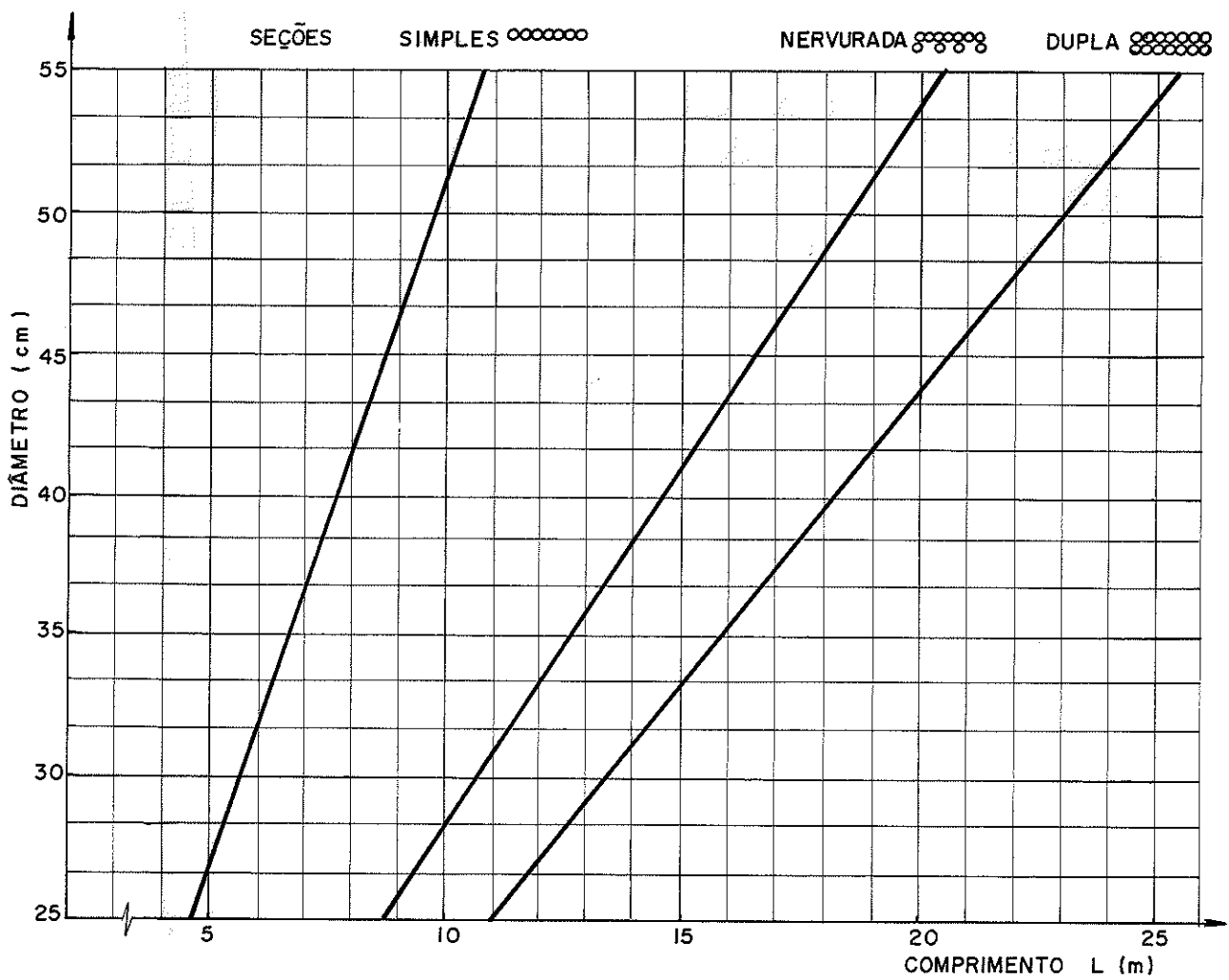


Fig. 89-Estimativa dos vãos e diâmetros para três tipos de pontes.

5.3- CÁLCULO SIMPLIFICADO DA PONTE DE POSTES DE EUCALIPTO

De acordo com a estimativa anterior o modelo formado por vigas bicirculares e vigas simples, apresenta-se como construtivamente mais viável.

Para o cálculo inicial da ponte, adota-se uma largura igual a 3,92 m, ou seja, 7 postes com diâmetros médio $D_m = 56$ cm, e comprimento igual a 20,0 m. O esquema da seção transversal, composta por vigas bicirculares e vigas simples interligadas entre si por anéis metálicos, é apresentado na figura 90.

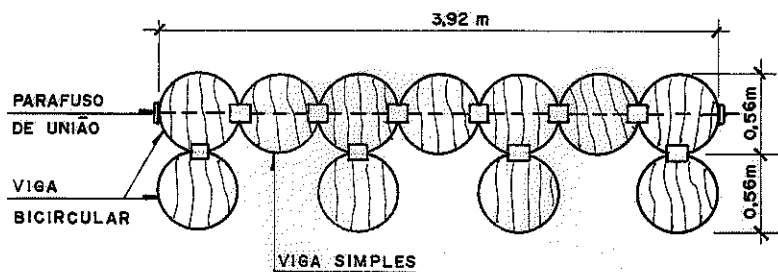


Fig. 90 -Ponte nervurada

O espaçamento entre as linhas de anéis nas seções transversais foi determinado através de ensaios. Os ensaios revelaram que um espaçamento de 2 m entre as linhas de anéis, apresentam boa distribuição de tensões no conjunto. Procurar diminuir este espaçamento, aumentaria muito o número das linhas de anéis, e, consequentemente, a dificuldade na montagem do conjunto formado por peças roliças.

5.3.1- Cálculo do diâmetro do anel

Nas pontes constituídas por postes de Eucalipto Citriodora de grande diâmetro, a hipótese de que três rodas do trem-tipo estajam sobre uma viga, corresponde à carga crítica para o anel.

Fixado o espaçamento das linhas de anéis em 2,0 m, a carga crítica para um anel, devido ao trem-tipo classe 360 KN, será igual a 45KN. O anel trabalhará perpendicularmente às fibras (17).

$$\bar{P}_{90^\circ} = 0,6 \frac{\pi \phi^2 \bar{\tau}}{4} = 45 \text{ KN} \quad \text{e} \quad \phi = \sqrt{\frac{4.45}{0,6 \cdot \pi \cdot \bar{\tau}}}$$

$$\bar{\tau} = 0,241 \text{ KN/cm}^2 \text{ (Eucalipto Citriodora)}$$

O diâmetro mínimo necessário do anel é $\phi = 20 \text{ cm}$, ou 8 polegadas, para o Eucalipto Citriodora (17).

O diâmetro máximo, que poderia ser utilizado, seria igual a 0,8 do menor diâmetro dos postes (17).

5.3.2- Cálculo da altura do anel

A altura mínima do anel é dada pela equação:

$$h = \phi \frac{\pi}{2} \frac{\tau}{\sigma}$$

ϕ = diâmetro do anel = 20 cm

τ = tensão de ruptura ao cisalhamento para o Eucalipto Citriodora = 1,6 KN/cm²

σ_c = tensão de ruptura à compressão paralela às fibras para o Eucalipto Citriodora = 6,25 KN/cm²

$$h \cong 8,0 \text{ cm}$$

A altura total do anel (h_t) deve sofrer um acréscimo devido a forma geométrica dos postes. Fig. 91 .

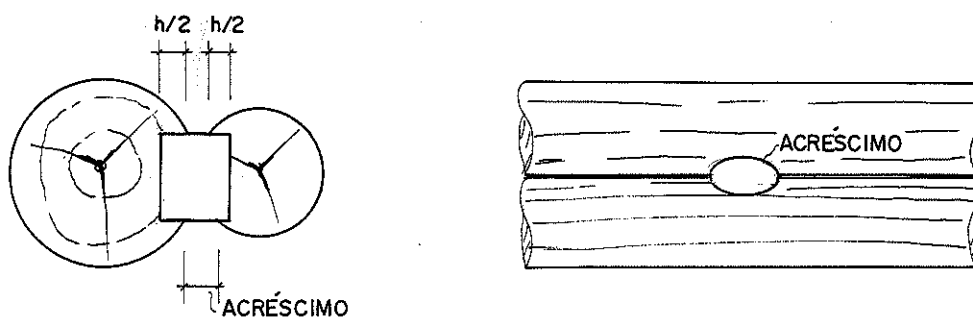


Fig. 91- Altura do anel

A altura total do anel não deve ultrapassar 50% do menor diâmetro do poste.

Devido a algumas irregularidades que possa haver nos postes, mais a compensação da altura dos anéis, optou-se pela altura total $h_t = 20 \text{ cm}$.

5.3.3- Cálculo da carga permanente

A carga permanente poderá ser calculada para a ponte to -

tal e por faixa de seção transversal.

- Carga devida ao peso próprio da madeira

A ponte é composta por 7 postes no tabuleiro e 4 postes formando as nervuras.

$$\gamma_{\text{madeira}} = 0,01 \text{ N/cm}^3 \quad D_m = 56 \text{ cm} \quad \text{Comprimento} = 2000 \text{ cm}$$

$$P_{\text{mad}} = 11 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \ell \cdot \gamma = 541,86 \text{ KN}$$

$$P_{\text{mad}} = 0,27 \text{ KN/cm}$$

- Carga devida ao peso próprio dos anéis

Utilizando anel de 20 cm de diâmetro com 20 cm de altura, tem-se 160 anéis para as vigas bicirculares e 66 nas ligações das vigas simples com as bicirculares.

$$\text{Total de anéis} = 226$$

$$\text{Peso de 1 anel} = 0,04 \text{ KN}$$

$$\text{Peso total de anéis} = 0,005 \text{ KN/cm}$$

- Carga devida ao peso próprio do concreto

Sobre a ponte de madeira será colocado uma camada regularizadora de concreto com 5 cm de altura. Fig. 92.

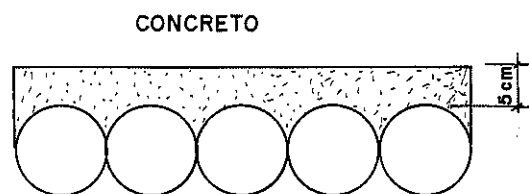


Fig. 92

$$\gamma_{\text{concreto}} = 0,024 \text{ N/cm}^3$$

$$P_{\text{concreto total}} = \left[D \left(\frac{D}{2} + 5 \right) - \frac{D^2}{8} \right] \ell \gamma = 355490 \text{ N} \quad \text{ou} \\ 355,49 \text{ KN}$$

$$P_{\text{concreto}} = 162,7 \text{ N/cm} \quad \text{ou} \quad 0,1627 \text{ KN/cm}$$

- Carga devido ao peso próprio do asfalto
Será colocado uma camada de 5 cm de asfalto sobre o concreto.

$$\gamma_{\text{asfalto}} = 0,022 \text{ N/cm}^3$$

$$P_{\text{asfalto total}} = 5 \cdot b \cdot l \cdot \gamma = 86240 \text{ N ou } 86,24 \text{ KN}$$

$$P_{\text{asfalto}} = 43,1 \text{ N/cm ou } 0,431 \text{ KN/cm}$$

A carga permanente total é dada por:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{mad}} + P_{\text{anel}} + P_{\text{concreto}} + P_{\text{asfalto}}$$

$$P_{\text{total}} = 0,27 + 0,005 + 0,1627 + 0,431 = 0,4817 \text{ KN/cm}$$

Momento máximo na seção transversal central devido à carga permanente.

$$M = \frac{p \cdot l^2}{8} = \frac{0,4817 \cdot 2000^2}{8} = 240850 \text{ KN.cm}$$

5.3.4- Cálculo da carga acidental

A figura 93 apresenta o esquema da ponte carregada com trem-tipo, classe 360 KN.

Momento máximo acidental na seção transversal central:

$$M = 312,60 \cdot 100 - 105 \cdot 650 - 120 \cdot 150 - 27,6 \cdot 500 = 68790 \text{ KN.cm}$$

Momento total na seção transversal central

$$M_{\text{total}} = M_{\text{max perm}} + M_{\text{max acidental}}$$

$$M_{\text{total}} = 240850 + 68790 = 309640 \text{ KN.cm}$$

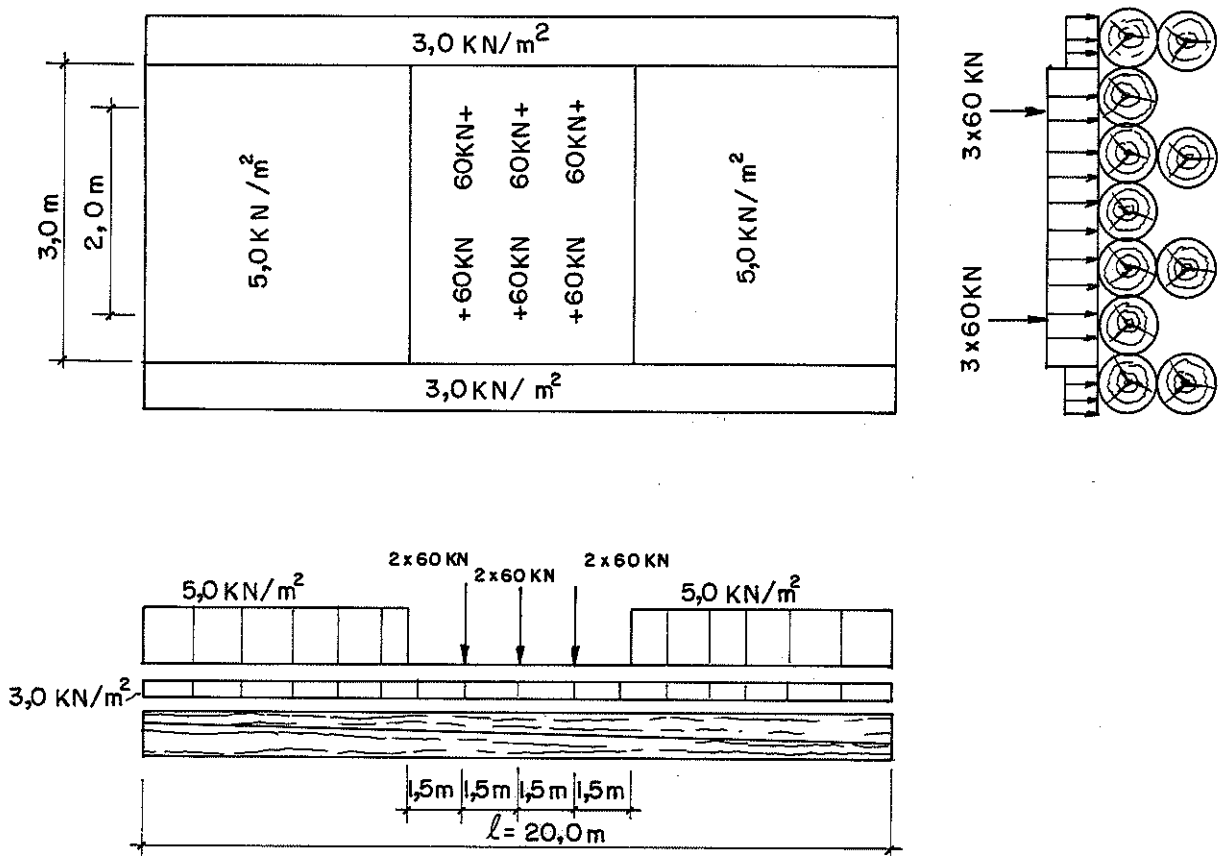


Fig. 93 -Esquema da ponte com trem-tipo classe 360 KN

5.3.5- Verificação da resistência das vigas simples e bicirculares quanto à flexão

Hellmeister constatou em estudos experimentais que o momento de inércia de uma viga bicircular, interligada por anéis metálicos é igual a 8 vezes o de uma viga simples (16).

Os ensaios do modelo composto por 19 vigas retangulares , com carregamento do trem-tipo centrado, apresentaram a mesma flecha na seção transversal.

Partindo destas hipóteses e admitindo-se que todas as vigas possuem o mesmo módulo de elasticidade, as parcelas de cargas ou de momento serão divididas proporcionalmente às vigas.

$$\begin{aligned}
 \text{A ponte é composta por : } & 4 \text{ vigas bicirculares} = 4.8I \\
 & 3 \text{ vigas simples} = 3I \\
 \text{Momento de inércia total da ponte} & = 35I
 \end{aligned}$$

$$M_{\text{total}} = 309640 \text{ KN.cm}$$

Momento atuando em uma viga simples

$$M = \frac{M_{\text{total}}}{35} = 8846,86 \text{ KN.cm}$$

Momento atuando em viga uma bicircular

$$M = 8 M_{\text{viga simples}} = 70774,86 \text{ KN.cm}$$

A tensão admissível à flexão do Eucalipto Citriodora é

$$\bar{\sigma}_{f\ell} = 2,05 \text{ KN/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{at}} = \frac{M}{I} y \leq \bar{\sigma}_{f\ell}$$

$$\text{Viga simples} \quad D = 56 \text{ cm} \quad I = 482749,7 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_{\text{at}} = \frac{8846,86}{482749,7} \cdot 28 = 0,513 \text{ KN/cm}^2 < \bar{\sigma}_{f\ell}$$

$$\text{Viga bicircular} \quad D = 56 \text{ cm} \quad I = 3861997,6 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_{\text{at}} = \frac{70774,86}{3861997,6} \cdot 56 = 1,026 \text{ KN/cm}^2 < \bar{\sigma}_{f\ell}$$

As vigas simples e bicirculares apresentaram tensões atuantes menores que as tensões admissíveis à flexão, sendo as tensões das bicirculares mais críticas.

5.3.6- Verificação das vigas simples e bicirculares quanto ao cisalhamento

$$\bar{\tau} = 0,161 \text{ KN/cm}^2 \text{ (tensão admissível ao cisalhamento do Eucalipto Citriodora na flexão)}$$

$$\tau_{\text{at}} = \frac{VS}{bI} < \bar{\tau}$$

Para a viga bicircular (perto do apoio) figura 94 tem-se:

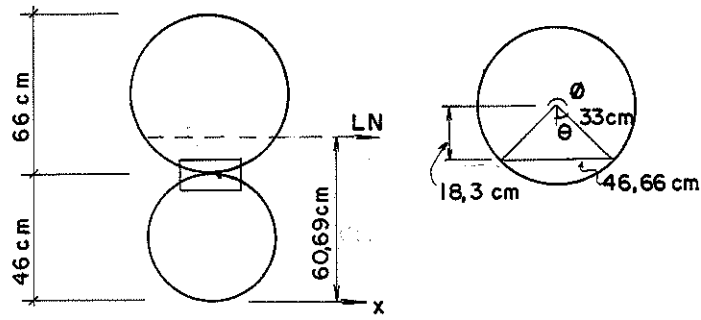
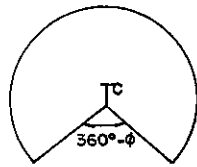


Fig.94 -Cálculo do momento estático para viga bicircular

$$A_{\text{setor}} = \frac{270,02}{360} \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 2566,1 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{triangulo}} = \frac{46,66 \cdot 18,3}{2} = 436,93 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{circulo}} = 2993,05 \text{ cm}^2$$



c = centro do setor

$$c = \frac{2/3 r \text{ sen } (\phi/2)}{(\phi/2)}$$

$$\phi = 270,2^\circ$$

$$c = 5,00 \text{ cm}$$

$$2566,1 (18,3 + 5,0) + 426,93 \cdot \frac{18,3}{3} = 2993,05 y_{cg}$$

$$y_{cg} = 20,84 \text{ cm}$$

$$S = 2993,05 \cdot 20,84 = 62375,16 \text{ cm}^3$$

$$b = 46,66 \text{ cm (linha de cisalhamento no poste)}$$

$$I = 3861997,6 \text{ cm}^4 \text{ (viga bicircular)}$$

Para o cálculo da cortante máxima supõem-se as 3 rodas do veículo sobre a viga, mais a carga permanente (sem redução).

$$V_{\text{total}} = V_{\text{acid}} + V_{\text{permanente}}$$

$$V_{\text{total}} = 160 + 70 = 230 \text{ KN}$$

A tensão atuante será:

$$\tau_{at} = \frac{230 \cdot 62345,16}{46,66 \cdot 3861997,6} = 0,079 \text{ KN/cm}^2 < \bar{\tau}_{fl}$$

Para a viga simples (perto do apoio, topo do poste) tem - se:

$$S = \frac{\pi D^2}{8} \cdot 9,76 = 8110,08 \text{ cm}^3$$

$$V_{total} = 230 \text{ KN}$$

$$b = 46 \text{ cm (linha de cisalhamento no poste)}$$

$$I = 482749,7 \text{ cm (viga simples)}$$

A tensão atuante será:

$$\tau_{at} = \frac{230 \cdot 8110,08}{46 \cdot 482749,7} = 0,084 \text{ KN/cm}^2 < \bar{\tau}_{fl}$$

As tensões de cisalhamento das vigas simples e bicirculares são apenas 50% da tensão admissível para o carregamento crítico proposto, sem a redução permitida pela NBR - 7190/82.

5.3.7- Verificação da flecha

A hipótese inicial indica uma flecha igual para toda seção transversal da ponte com carregamento do trem-tipo centrado. A verificação da flecha será feita para o conjunto e não para as vigas isoladamente.

A flecha admissível da norma NBR - 7190/82 é dada por:

$$\bar{a} = \frac{l}{350} \qquad \bar{a} = \frac{2000}{350} = 5,71 \text{ cm}$$

Flecha devida à carga permanente (madeira, anéis, concreto e asfalto)

$$a_{perm} = \frac{5p l^4}{384(2/3)EI} \qquad E = 1680 \text{ KN/cm}^2$$
$$p = 0,4817 \text{ KN/cm}$$

$$a_{perm} = \frac{5 \cdot 0,4817 \cdot 2000^4}{384 \cdot 1124 \cdot 16896239,5} = 5,26 \text{ cm}$$

Flecha devida à carga acidental

a) flecha acidental devida às rodas do veículo-tipo

$$a_{acid} = \frac{P_2}{24EI} (3l^2 - 4b^2) + \frac{P_1 l^3}{48EI}$$

$$a_{acid} = \frac{120 \cdot 850 (3 \cdot 2000^2 - 4 \cdot 850^2)}{24 \cdot 1680 \cdot 16896239,5} + \frac{120 \cdot 2000^3}{48 \cdot 1680 \cdot 16896239,5}$$

$$a_{acid} = 1,36 + 0,70 = 2,06 \text{ cm}$$

b) flecha acidental devida à carga de multidão, na frente e atrás do veículo

$$p = 5,0 \text{ KN/m}^2 \quad p = 0,15 \text{ KN/cm} \quad b = 700 \text{ cm}$$

$$a_{acid} = \frac{pb^2}{24EI} [2l^2 - b^2 - (l/2)^2] = 0,70 \text{ cm}$$

c) flecha acidental devida à carga de multidão lateral ao veículo

$$p = 3,0 \text{ KN/m}^2 \quad p = 0,0276 \text{ KN/cm}$$

$$a_{acid} = \frac{5pl^4}{384EI} = 0,20 \text{ cm}$$

A flecha acidental total será:

$$a_{total} = 2,06 + 0,70 + 0,20 = 2,96 \text{ cm}$$

A flecha final da ponte será:

$$a_{final} = a_{perm} + a_{acid} = 5,26 + 2,96 = 8,22 \text{ cm}$$

$$a_{final} = 8,22 \text{ cm} > \bar{a} = 5,71 \text{ cm}$$

A flecha final da ponte está na relação $l/243,3$.

A norma alemã DIN-1052 (Construção de madeira, Cálculo e Execução - item 10), estipula a flecha máxima de $l/300$ para atuação da carga útil (móvel), e $l/200$ para carga total, sendo l o vão da viga.

Poder-se-ia adotar a norma alemã. Já que a ponte para estradas vicinais é de baixa intensidade de tráfego.

Para se adotar a norma brasileira NBR-7190, que estipula a flecha máxima em $l/350$, teria-se que diminuir a carga permanente da ponte ou diminuir o vão.

Será montado e ensaiado um modelo em escala 1:4 com postes de Eucalipto Citriodora, baseado no cálculo simplificado da ponte nervurada e com os resultados, pode-se obter dados necessários para uma análise mais completa do comportamento da estrutura.

Fig. 95 .

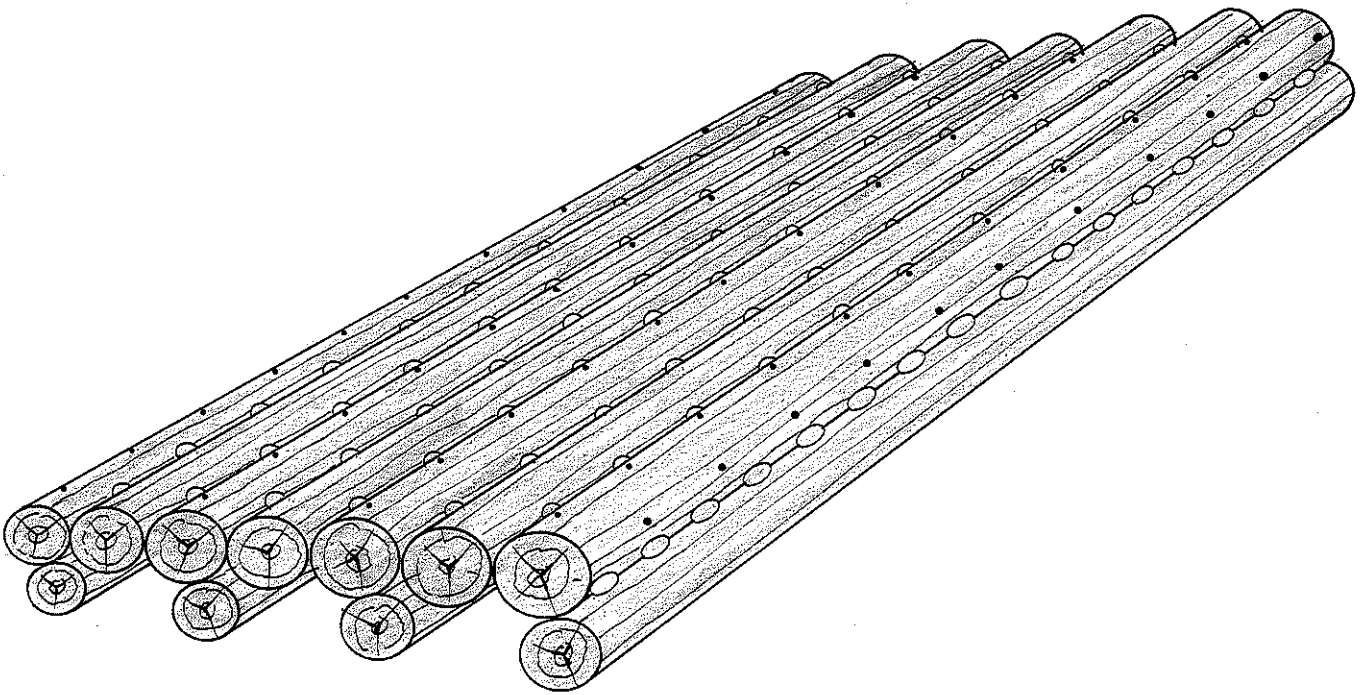


Fig. 95 - Ponte nervurada

5.4- MONTAGEM DO MODELO REDUZIDO

5.4.1- Introdução

O prosseguimento ao estudo da ponte nervurada constituída por vigas bicirculares e por vigas simples é feito a seguir através da montagem de modelo experimental.

Para efeito comparativo o modelo da ponte com postes de Eucalipto Citriodora será montado na escala 1:4 de redução das suas dimensões.

O LaMEM recebeu quinze postes de Eucalipto Citriodora, dos quais onze seriam aproveitados para a montagem, quatro foram recusados.

O diâmetro foi medido no meio de cada poste, e a média encontrada foi $D \approx 14,0$ cm.

Os postes foram submetidos a ensaios não destrutivos de flexão, para se obter o módulo de elasticidade de cada um.

Considerou-se inicialmente cada poste simplesmente apoiada, um apoio articulado fixo e o outro articulado móvel, com 5 m de vão livre.

Aplicando-se uma carga inicial (P_1) no meio do vão, obtém-se, através de um relógio comparador com precisão de centésimo de milímetro, a flecha (a_1) no mesmo local. Aplica-se mais um acréscimo de carga e obtém-se (P_2), dentro do regime elástico, e a flecha (a_2). Pela fórmula:

$$(a_2 - a_1) = \frac{(P_2 - P_1) l^3}{48 EI}$$

A partir desta equação tem-se

$$E = \frac{\Delta P l^3}{48 \Delta a I}$$

Na tabela 40 são apresentados os valores dos módulos de elasticidade determinado dos postes obtidos através da média de três ensaios.

Tabela 40

POSTES	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa
1	15513
2	20110
3	16683
4	15593
5	18145
6	17429
7	17226
8	20369
9	18076
10	20973
11	14853

O ideal seria a utilização de postes com os mesmos módulos de elasticidade, para melhor obtenção dos resultados experimentais. Para isso, seria necessária a seleção de uma quantidade muito grande de postes, aumentando muito o custo do modelo.

5.4.2- Características geométricas do modelo

O modelo na escala 1:4 possui comprimento $L = 5,0$ m, largura $b = 0,98$ m, diâmetro no meio dos postes $D = 14,0$ cm.

Foram utilizados anéis com diâmetro $\phi = 2 \frac{1}{2}$ " e altura $h = 5,0$ compatíveis com as condições do modelo anterior, constituído por vigas retangulares.

Na ligação das 7 vigas, lateralmente, foram utilizados 66 anéis, formando onze linhas de anéis e mais 160 anéis na ligação dos postes que compõem a nervura, formando vigas bicirculares.

O espaçamento entre as linhas de anéis laterais no modelo, foi 0,5 m e entre os anéis das vigas bicirculares foi de 0,125 m.

5.4.3- Composição das vigas no modelo

O modelo foi montado, inicialmente, com apenas sete postes (seção simples) e ensaiado. Posteriormente, foram colocados os 4 postes para formação das vigas bicirculares (seção nervurada) e realizado o ensaio. Esperava-se desta maneira, avaliar o comportamento dos anéis para seções diferentes e a contribuição da rigidez das vigas bicirculares no conjunto.

Tentou-se compensar a diferença dos módulos de elasticidade dos postes para a formação da seção simples e seção nervurada . Nem todos os postes se ajustaram perfeitamente, tentando-se a melhor colocação geométrica possível. Uma borda do conjunto ficou com módulo de elasticidade ligeiramente superior ao da outra.

5.4.4- Preparação das vigas para montagem

Colocando-se os 7 postes um ao lado do outro, base com topo, alternadamente, procurou-se a posição de melhor contato entre eles. Fez-se, depois, um aparelhamento das superfícies de contato dos postes com enxô. Fig. 96.

Tomando-se o primeiro e segundo postes, foram fixadas as suas extremidades com um pedaço de ripa e pregos, para garantir a imobilidade relativa dos postes, durante a execução dos furos. Em seguida, fixou-se o segundo poste ao terceiro e fez-se a furação do terceiro poste. Repetiu-se esta operação até que os 7 fossem furados, figura 97.



Fig. 96 -Aparelhamento dos postes com enxô

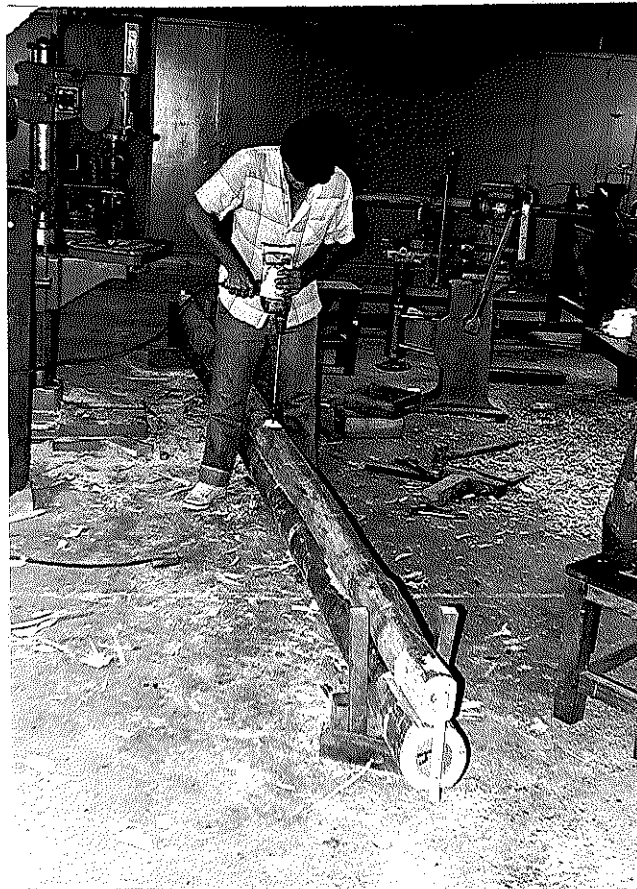


Fig. 97 -Furação dos postes

Estes furos servem como guia para a ferramenta utilizada na confecção dos sulcos para alojar os anéis. A profundidade destes sulcos é igual à metade da altura dos anéis. Fig. 98 .



Fig. 98-Preparação do sulco para colocação do anel

Repetiu-se este processo para os postes 1, 3, 5 e 7, para a colocação dos postes que irão compor a nervura, formando as vigas bicirculares . Fig. 99.

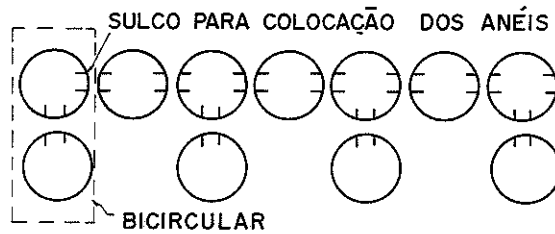


Fig. 99 - Preparação dos sulcos para formação da seção nervurada

5.4.5- Montagem do modelo de seção simples

Inicialmente foram colocados os anéis na face do primeiro poste e parafusos passando pelo centro do anel.

O segundo poste foi encaixado nos parafusos guias e encostado nos anéis. Através de um sistema composto por duas peças de madeira de travamento e dois parafusos para aperto, conseguiu-se encostar as superfícies de contato dos postes. Fig. 100.



Fig. 100-Montagem das vigas.

Em seguida, foram colocados os anéis na face direita do segundo poste e encostou-se o terceiro poste fazendo o aperto para completar a sua união. Repetiu-se o processo até colocação do último poste.

Depois de montado o conjunto colocou-se um tirante interno em cada linha de anéis, com arruelas e porcas nas extremidade. O diâmetro deste tirante é inferior ao de seu furo e destinou-se a garantir a união dos postes. Fig.101.



Fig.101-Montagem da seção simples

5.4.6- Montagem do modelo de seção nervurada

Após os ensaios, dentro do regime elástico, no modelo de seção simples, fez-se a montagem das vigas bicirculares do modelo de seção nervurada.

Colocando-se anéis metálicos, alternadamente, em um poste e outro, os postes foram posicionados para a montagem final. Com auxílio dos parafusos guias, fez-se o aperto para a união dos postes. Fig. 102 .

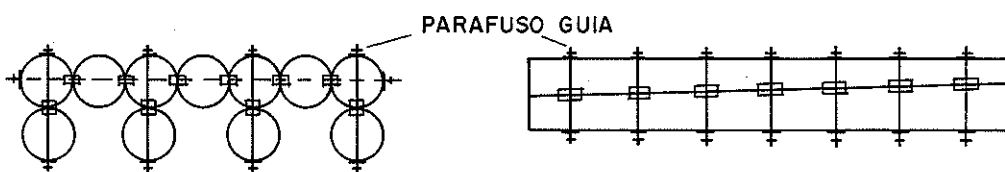


Fig.102-Montagem da seção nervurada

5.5- ENSAIOS DOS MODELOS

5.5.1- Preparação dos ensaios (seção simples e seção nervurada)

Para a realização dos ensaios foi feita a montagem de um

pórtico rígido no qual o modelo ficaria apoiado e com a instalação de um cilindro hidráulico, capaz de movimentar-se em duas direções, permitindo, assim, fazer o carregamento em qualquer ponto do modelo.

Para a leitura do carregamento, foi utilizado um anel dinamométrico de constantes igual a 47,5 N/divisão.

Sob as linhas de anéis, em cada viga, foi instalado um transdutor indutivo, para a leitura das flechas, totalizando vinte e oito transdutores de deslocamento. Fig. 103.

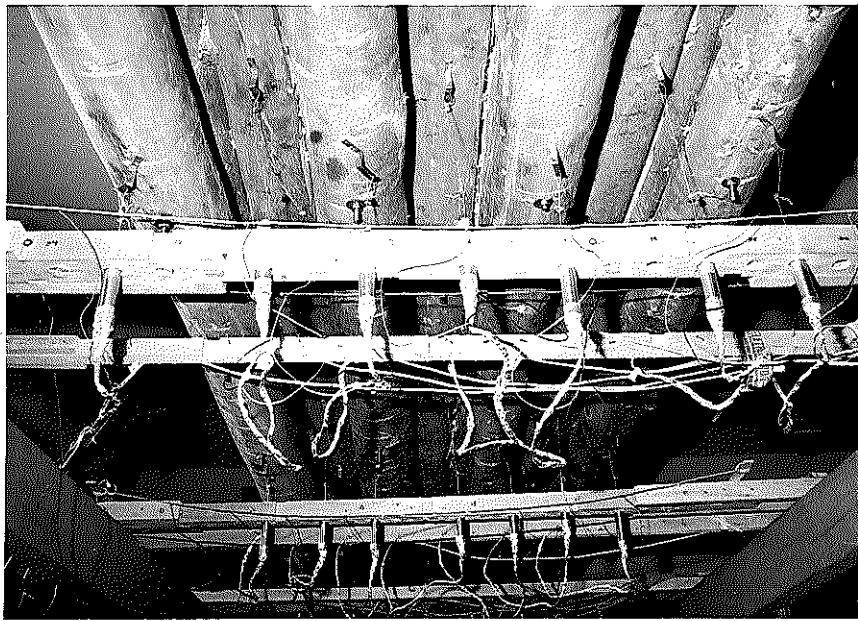


Fig.103-Transdutores indutivos sob as linhas de anéis

O ensaio foi feito em três aplicações sucessivas de carga em cada ponto, com leitura do deslocamento de sessenta e três pontos.

A leitura dos deslocamentos indicados pelos transdutores indutivos foi programada para ser feita à velocidade de vinte pontos por minuto, através do conjunto Hewlett Packard mencionado anteriormente, com a impressão de tabelas e com o traçado dos diagramas das elásticas, figura 104 .

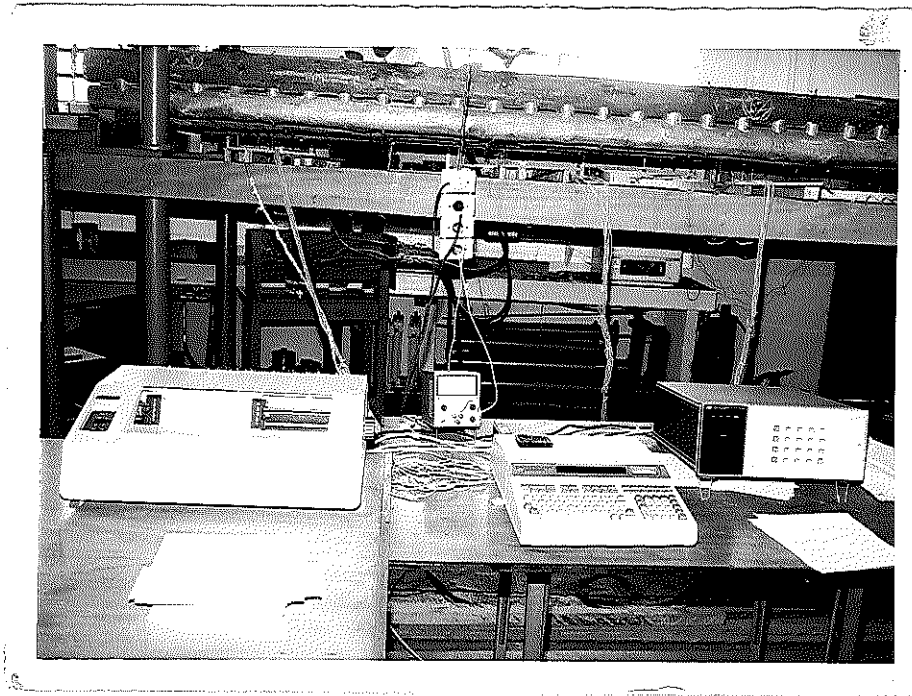


Fig.104-Vista dos aparelhos de leitura dos ensaios

Os carregamentos foram feitos com aplicação de carga em todas as seções transversais (linhas de anéis), de S_0 a S_8 , e ao longo dos postes numerados de 1 a 7, figura 105.

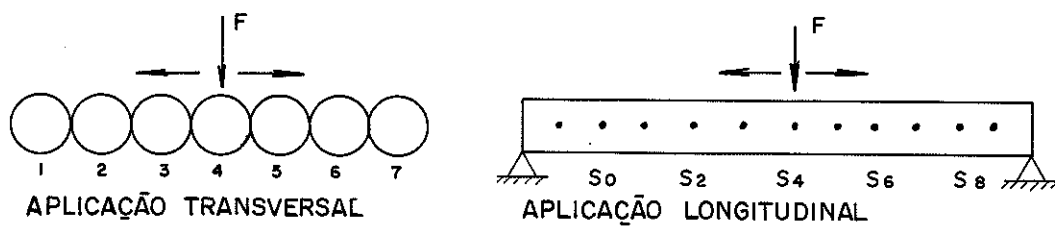


Fig.105-Aplicação das cargas no modelo de seção simples

5.5.2- Ensaio do modelo de seção simples

O arranjo final dos postes, para a formação da seção simples, tentando compensar os módulos de elasticidade do conjunto é apresentado na figura 106.

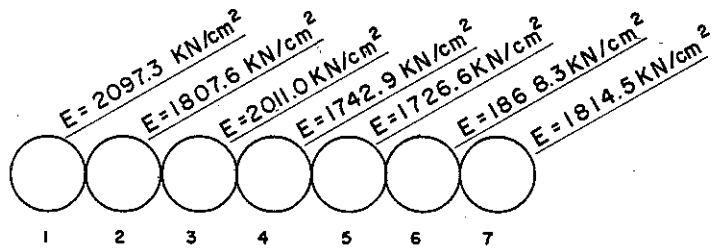


Fig. 106-Módulo de elasticidade das vigas

Pode-se observar que o conjunto possui rigidez diferente nas bordas, devendo apresentar flechas diferentes para um mesmo carregamento centrado.

Fez-se, inicialmente, carregamento viga por viga, para todas as seções transversais. Em cada ponto de carregamento foram aplicadas três cargas, com leitura de sessenta e três pontos de medição das flechas, para cada carga aplicada.

As três cargas aplicadas nos ensaios foram as correspondentes a 200, 300 e 400 divisões, medidas no anel dinamométrico, ou seja, 9,5KN, 14,25KN e 19,00KN respectivamente.

Os gráficos das elásticas transversais e longitudinais foram traçadas para o carregamento de 300 divisões, ou seja, 14,25KN

As tabelas 41, 42, 43 e as figuras 107, 108, 109 das elásticas transversais e longitudinais descrevem e representam os resultados dos ensaios com carga concentrada na seção transversal central.

Numa segunda fase do ensaio, procurou-se simular um trem-tipo, classe 360 KN, de seis rodas, com apenas duas rodas na seção transversal. As rodas foram colocadas, sobre as vigas 1 e 5, ou 2 e 6, ou 3 e 7, para uma determinada seção transversal.

A soma das cargas aplicadas pelas duas rodas foi 9,50, 14,25 e 19,0 KN, e os gráficos das elásticas transversais e longitudinais foram traçados para o carregamento de 14,25 KN. Os ensaios foram realizados nas seções transversais 1, 3, 4, 6 e 8.

As tabelas 44, 45, 46, e as figuras 110, 111, 112, das elásticas transversais e longitudinais, apresentam os resultados de ensaios com carregamento do trem-tipo na seção transversal central.

As fig. 113, 114, apresentam as linhas de flechas equivalentes para o modelo de seção simples, com carregamento concentrado e com o trem-tipo (carga de 14,25 KN).

Tabela 41

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
 CARREGAMENTO NA VIGA 4

	CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0		CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0
FLECHAS	0.00	2.43	3.58	4.75	FLECHAS	0.00	7.63	11.30	15.03
NA	0.00	2.78	4.14	5.54	NA	0.00	8.71	13.00	17.41
SECAO 0	0.00	2.91	4.34	5.86	SECAO 5	0.00	9.69	14.46	19.41
(MM)	0.00	3.04	4.63	6.35	(MM)	0.00	9.95	14.92	20.11
	0.00	3.00	4.54	6.20		0.00	10.03	14.99	20.15
	0.00	2.94	4.41	5.95		0.00	9.15	13.66	18.29
	0.00	2.60	3.86	5.13		0.00	8.99	13.38	17.86
	0.00	4.84	7.15	9.44		0.00	7.05	10.42	13.75
FLECHAS	0.00	5.48	8.11	10.76	FLECHAS	0.00	7.95	11.88	15.90
NA	0.00	5.81	8.66	11.56	NA	0.00	8.59	12.89	17.42
SECAO 1	0.00	5.84	8.78	11.83	SECAO 6	0.00	8.77	13.17	17.88
(MM)	0.00	6.11	9.17	12.30	(MM)	0.00	8.57	12.83	17.36
	0.00	5.86	8.74	11.70		0.00	7.93	11.87	15.97
	0.00	5.33	7.90	10.49		0.00	7.42	11.06	14.74
	0.00	6.24	9.25	12.20		0.00	5.26	7.77	10.28
FLECHAS	0.00	7.15	10.67	14.28	FLECHAS	0.00	5.95	8.85	11.79
NA	0.00	7.67	11.47	15.45	NA	0.00	6.53	9.76	13.09
SECAO 2	0.00	8.15	12.22	16.58	SECAO 7	0.00	6.50	9.77	13.15
(MM)	0.00	7.98	11.95	16.13	(MM)	0.00	6.29	9.43	12.68
	0.00	7.79	11.61	15.56		0.00	6.01	9.01	12.12
	0.00	7.02	10.42	13.83		0.00	5.61	8.35	11.12
	0.00	7.78	11.51	15.29		0.00	1.65	3.11	4.68
FLECHAS	0.00	8.74	13.11	17.63	FLECHAS	0.00	1.90	3.61	5.38
NA	0.00	9.75	14.60	19.66	NA	0.00	1.92	3.67	5.57
SECAO 3	0.00	9.95	14.95	20.18	SECAO 8	0.00	1.99	3.83	5.80
(MM)	0.00	9.48	14.23	19.16	(MM)	0.00	1.91	3.64	5.55
	0.00	9.33	13.89	18.58		0.00	1.87	3.58	5.39
	0.00	8.41	12.46	16.56		0.00	1.63	3.06	4.61
	0.00	7.95	11.83	15.74					
FLECHAS	0.00	9.06	13.58	18.25					
NA	0.00	10.07	15.15	20.55					
SECAO 4	0.00	10.55	15.91	21.73					
(MM)	0.00	10.23	15.33	20.71					
	0.00	9.36	14.03	18.87					
	0.00	9.12	13.58	18.11					

Fig. 107a

ELASTICA DAS SECUES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secao 4

Carregamento na viga 4

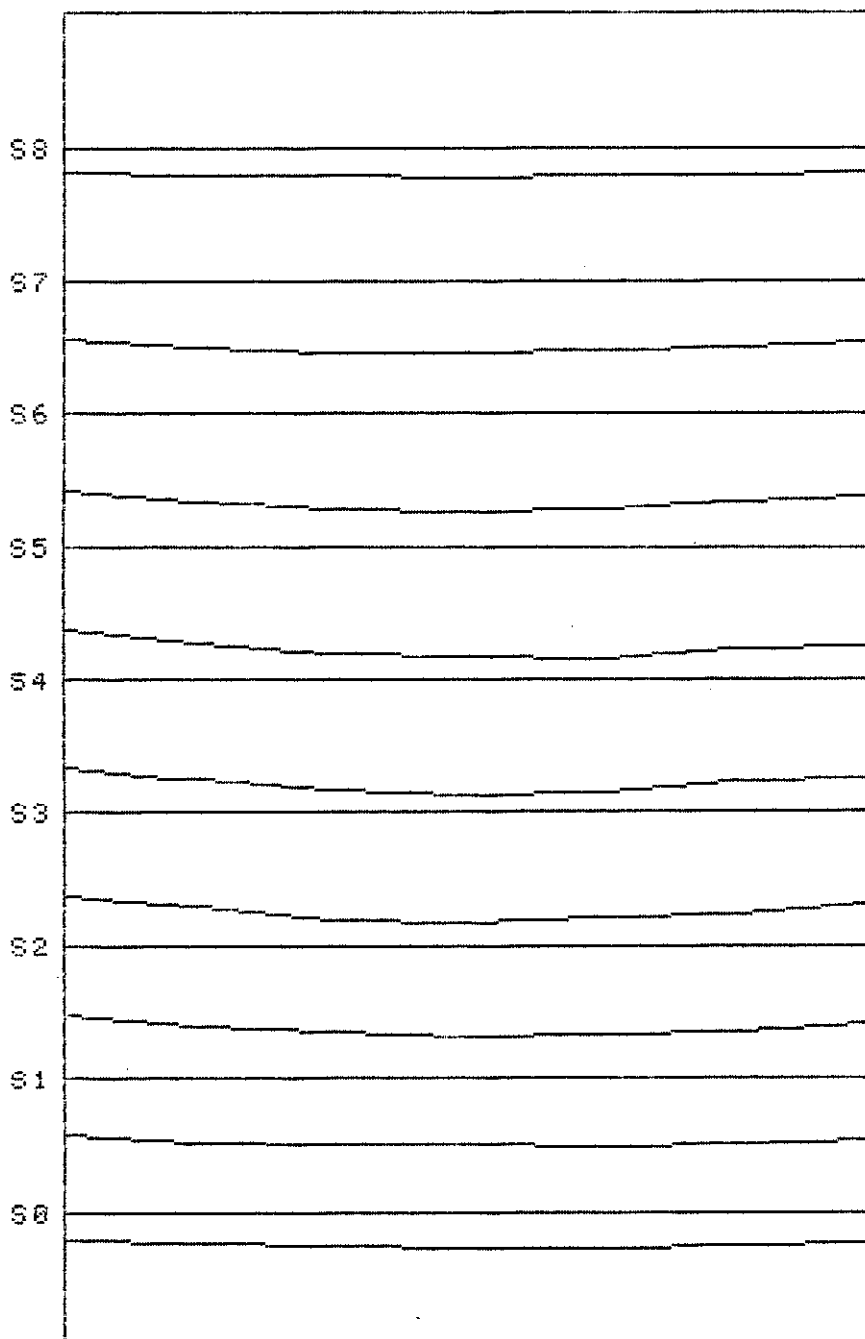


Fig. 107b

ELASTICA DAS SECOES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secao 4

Carregamento na Viga 4

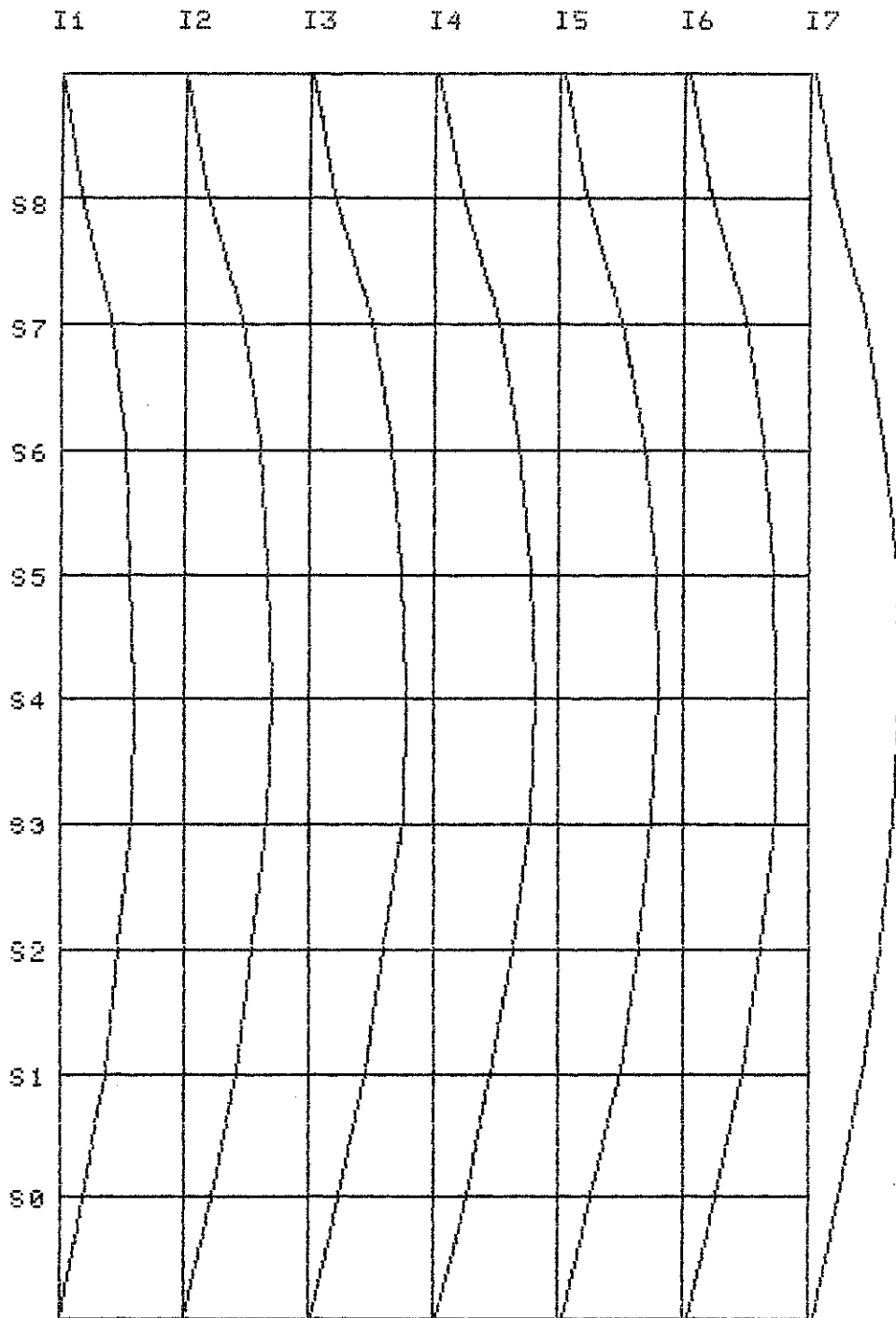


Tabela 42

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
 CARREGAMENTO NA VIGA 3

	CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0		CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0
FLECHAS	0.00	3.11	4.56	6.01	FLECHAS	0.00	9.46	14.10	18.94
NA	0.00	3.16	4.69	6.24	NA	0.00	10.08	15.10	20.44
SECAO 0	0.00	3.10	4.64	6.19	SECAO 5	0.00	10.48	15.65	21.16
(MM)	0.00	2.90	4.37	5.86	(MM)	0.00	9.61	14.27	19.18
	0.00	2.75	4.13	5.53		0.00	8.82	13.00	17.36
	0.00	2.50	3.73	4.98		0.00	7.64	11.28	15.04
	0.00	2.05	3.02	3.99		0.00	7.09	10.43	13.85
FLECHAS	0.00	5.93	8.74	11.66	FLECHAS	0.00	8.60	12.75	16.96
NA	0.00	6.22	9.21	12.33	NA	0.00	9.14	13.72	18.36
SECAO 1	0.00	6.01	8.93	12.00	SECAO 6	0.00	9.05	13.58	18.19
(MM)	0.00	5.76	8.62	11.65	(MM)	0.00	8.36	12.51	16.74
	0.00	5.44	8.10	10.86		0.00	7.43	11.06	14.73
	0.00	4.86	7.19	9.59		0.00	6.75	10.00	13.28
	0.00	4.19	6.16	8.15		0.00	5.95	8.80	11.65
FLECHAS	0.00	7.74	11.51	15.34	FLECHAS	0.00	6.46	9.53	12.71
NA	0.00	8.13	12.24	16.48	NA	0.00	6.85	10.19	13.66
SECAO 2	0.00	8.27	12.36	16.56	SECAO 7	0.00	6.70	10.01	13.44
(MM)	0.00	7.79	11.60	15.49	(MM)	0.00	6.30	9.39	12.65
	0.00	7.02	10.44	13.88		0.00	5.63	8.35	11.20
	0.00	6.44	9.56	12.68		0.00	5.02	7.47	10.02
	0.00	5.37	7.94	10.52		0.00	4.36	6.44	8.55
FLECHAS	0.00	9.44	14.01	18.87	FLECHAS	0.00	3.80	5.70	7.62
NA	0.00	10.02	15.06	20.42	NA	0.00	4.16	6.25	8.36
SECAO 3	0.00	9.87	14.75	19.97	SECAO 8	0.00	3.82	5.77	7.76
(MM)	0.00	8.97	13.31	17.87	(MM)	0.00	3.78	5.68	7.63
	0.00	8.14	12.09	16.19		0.00	3.28	4.94	6.60
	0.00	7.71	11.37	15.15		0.00	3.09	4.62	6.16
	0.00	6.58	9.67	12.79		0.00	2.35	3.48	4.59
FLECHAS	0.00	9.99	14.91	19.96					
NA	0.00	10.61	15.92	21.41					
SECAO 4	0.00	11.12	16.73	22.56					
(MM)	0.00	10.04	14.91	19.87					
	0.00	8.85	13.14	17.54					
	0.00	7.74	11.49	15.33					
	0.00	7.33	10.81	14.35					

Fig. 108a

ELASTICA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secção 4

Carregamento na viga 3

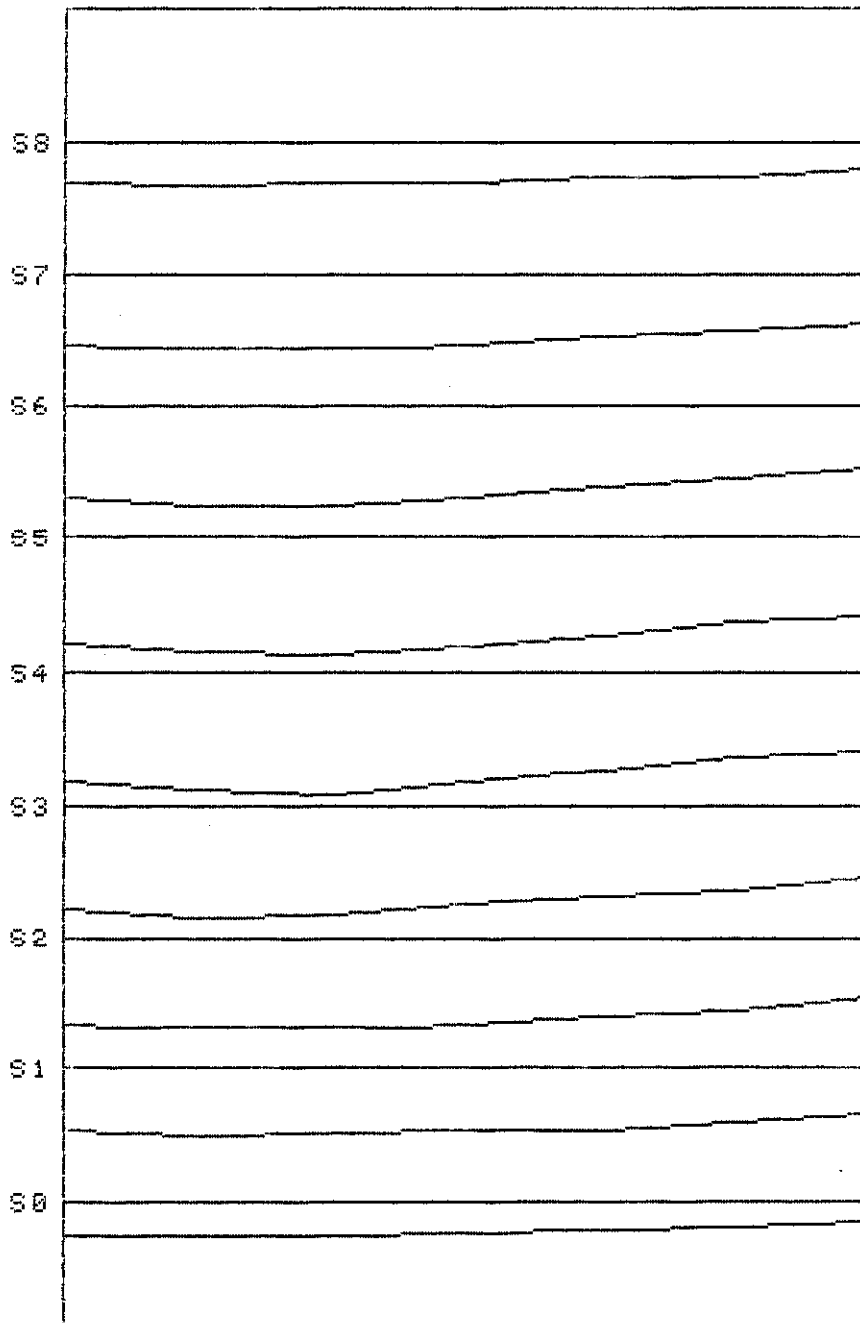


Fig. 108b

ELASTICA DAS SECÕES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secao 4

Carregamento na Viga 3

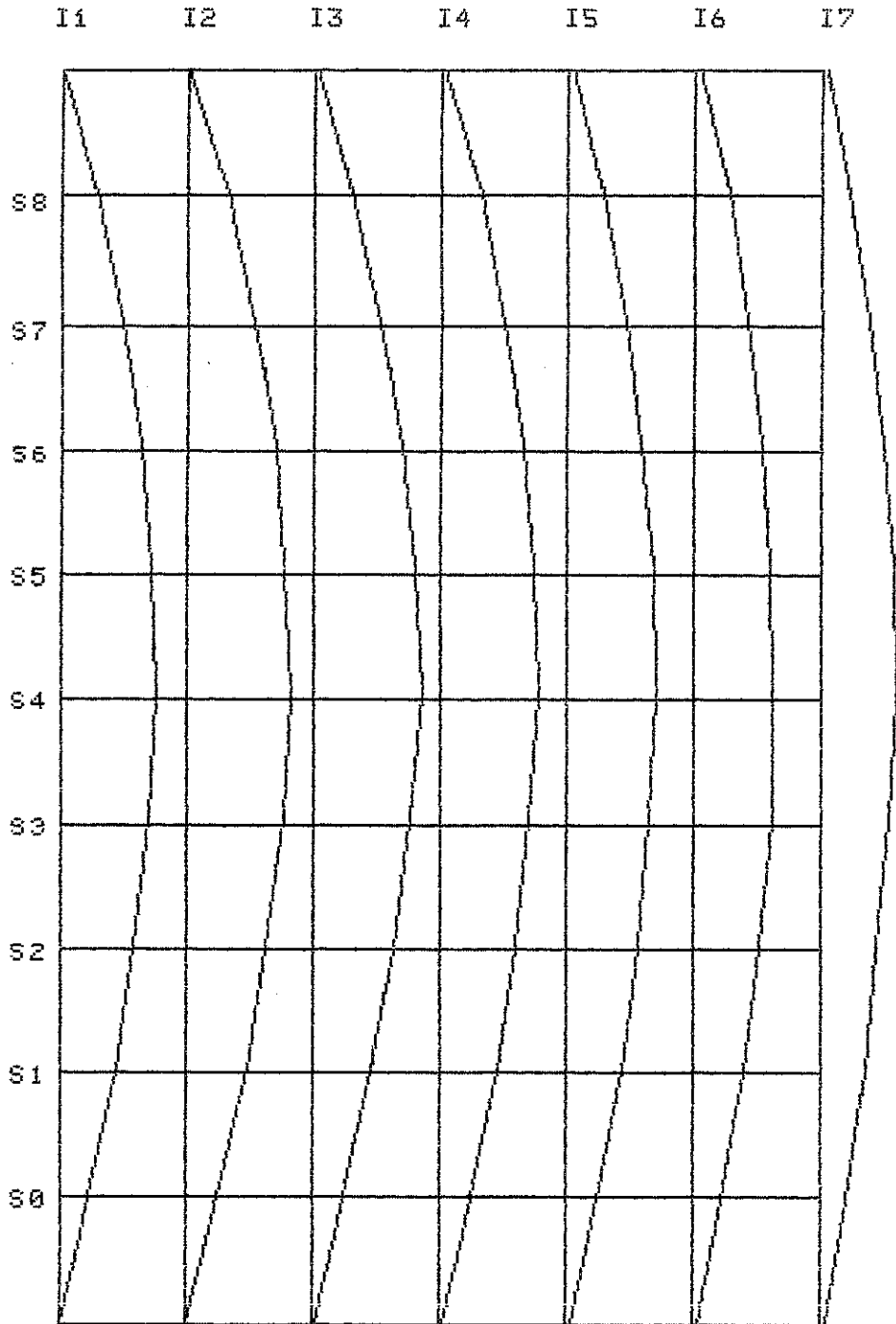


Tabela 43

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
 CARREGAMENTO NA VIGA 2

	CARGA 0	CARGA 4,75	CARGA 9,5	CARGA 14,25		CARGA 0	CARGA 4,75	CARGA 9,5	CARGA 14,25
FLECHAS	0.00	1.97	3.79	5.61	FLECHAS	0.00	5.91	11.68	17.44
NA	0.00	1.73	3.38	5.04	NA	0.00	5.65	11.16	16.63
SECAO 0	0.00	1.52	2.98	4.45	SECAO 5	0.00	5.29	10.40	15.44
(MM)	0.00	1.33	2.61	3.91	(MM)	0.00	4.64	9.07	13.32
	0.00	1.19	2.34	3.51		0.00	3.87	7.51	11.01
	0.00	1.02	1.99	2.95		0.00	3.21	6.20	9.11
	0.00	0.79	1.52	2.21		0.00	2.81	5.47	8.03
FLECHAS	0.00	3.66	7.18	10.60	FLECHAS	0.00	5.37	10.51	15.65
NA	0.00	3.35	6.60	9.78	NA	0.00	5.05	9.96	14.91
SECAO 1	0.00	2.89	5.70	8.43	SECAO 6	0.00	4.48	8.84	13.14
(MM)	0.00	2.60	5.16	7.67	(MM)	0.00	3.94	7.71	11.43
	0.00	2.37	4.69	6.95		0.00	3.28	6.42	9.48
	0.00	2.03	3.97	5.87		0.00	2.83	5.54	8.15
	0.00	1.62	3.14	4.58		0.00	2.38	4.64	6.82
FLECHAS	0.00	4.76	9.32	13.91	FLECHAS	0.00	3.92	7.71	11.40
NA	0.00	4.51	8.92	13.47	NA	0.00	3.75	7.39	10.92
SECAO 2	0.00	4.24	8.31	12.37	SECAO 7	0.00	3.41	6.78	10.07
(MM)	0.00	3.65	7.05	10.40	(MM)	0.00	3.01	5.92	8.73
	0.00	3.06	5.97	8.82		0.00	2.59	5.06	7.45
	0.00	2.67	5.23	7.73		0.00	2.14	4.19	6.18
	0.00	2.13	4.12	6.05		0.00	1.72	3.35	4.93
FLECHAS	0.00	5.74	11.33	16.92	FLECHAS	0.00	2.33	4.55	6.66
NA	0.00	5.61	11.14	16.67	NA	0.00	2.26	4.45	6.54
SECAO 3	0.00	5.16	10.10	14.86	SECAO 8	0.00	2.07	4.07	5.98
(MM)	0.00	4.28	8.29	12.15	(MM)	0.00	1.81	3.58	5.27
	0.00	3.61	7.04	10.34		0.00	1.52	3.00	4.43
	0.00	3.21	6.28	9.26		0.00	1.23	2.42	3.57
	0.00	2.70	5.18	7.55		0.00	0.96	1.88	2.78
FLECHAS	0.00	6.34	12.44	18.67					
NA	0.00	6.10	12.03	18.14					
SECAO 4	0.00	5.50	10.76	16.10					
(MM)	0.00	4.62	8.97	13.22					
	0.00	3.83	7.48	11.04					
	0.00	3.26	6.31	9.31					
	0.00	2.92	5.69	8.37					

Fig. 109a

ELASTICA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secao 4

Carregamento na viga 2

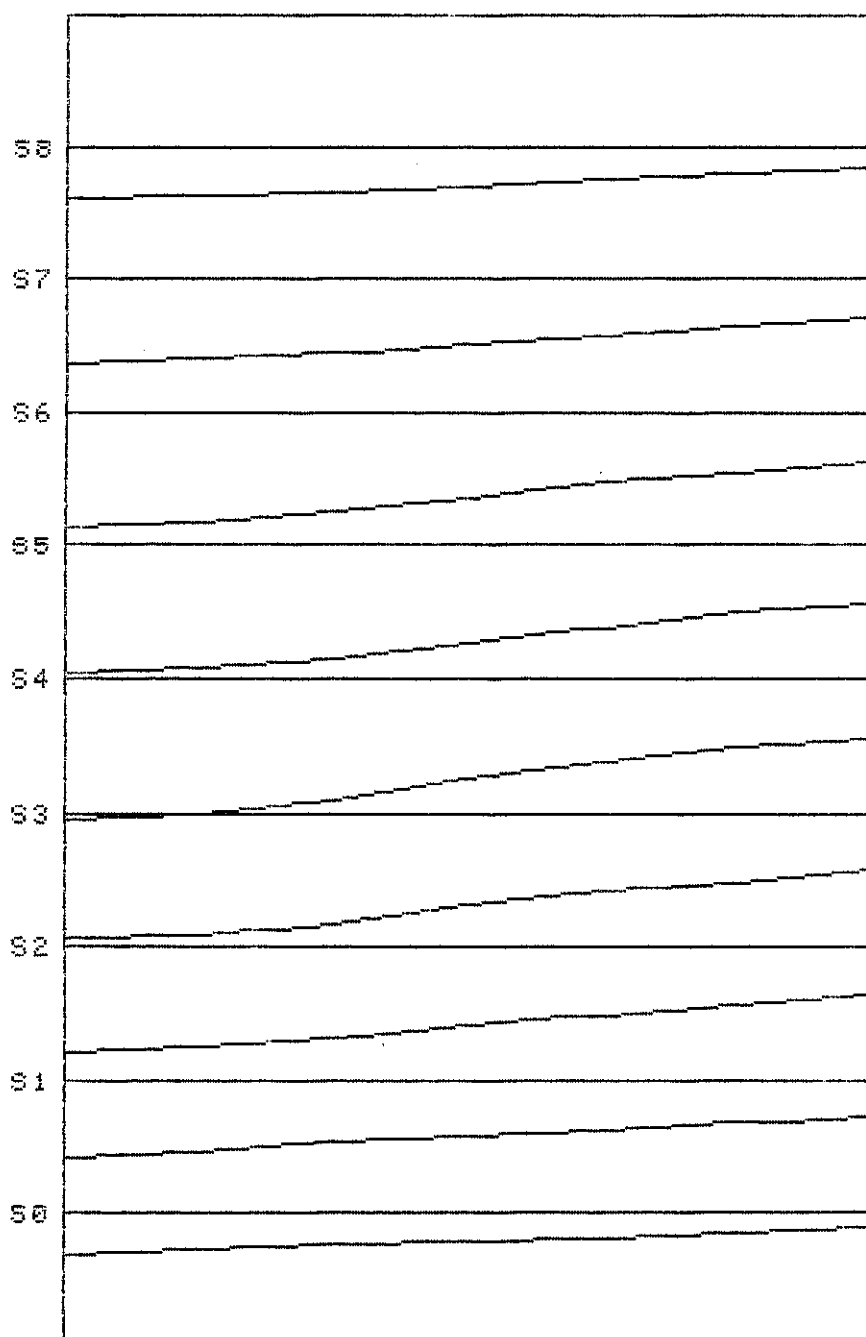


Fig. 109b

ELASTICA DAS SECÇÕES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secção 4

Carregamento na Viga 2

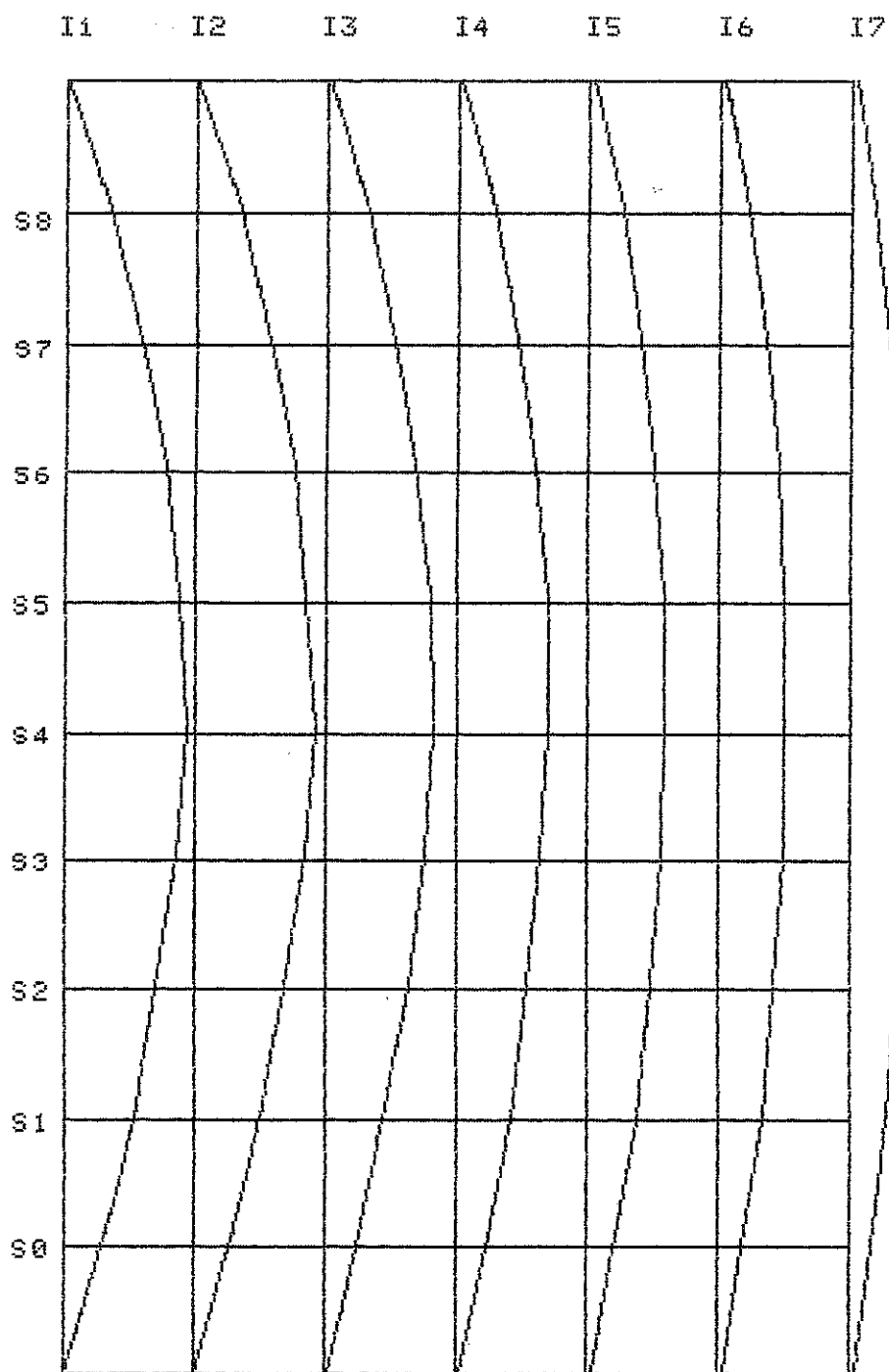


Tabela 44

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
TREM TIPO NAS VIGAS 2 E 6

	CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0		CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0
FLECHAS	0.00	2.55	3.78	5.02	FLECHAS	0.00	8.27	12.54	16.84
NA	0.00	2.76	4.10	5.44	NA	0.00	8.51	13.01	17.54
SECAO 0	0.00	2.74	4.08	5.45	SECAO 5	0.00	8.90	13.45	18.01
(mm)	0.00	2.64	3.93	5.24	(mm)	0.00	8.77	13.27	17.77
	0.00	2.84	4.24	5.67		0.00	9.35	14.18	19.04
	0.00	3.03	4.52	6.02		0.00	9.48	14.50	19.52
	0.00	2.95	4.37	5.80		0.00	9.91	15.05	20.22
FLECHAS	0.00	4.96	7.51	10.01	FLECHAS	0.00	7.36	10.98	14.69
NA	0.00	5.24	7.93	10.58	NA	0.00	7.83	11.70	15.67
SECAO 1	0.00	5.23	7.92	10.55	SECAO 6	0.00	8.27	12.30	16.44
(mm)	0.00	5.25	7.99	10.70	(mm)	0.00	7.94	11.82	15.82
	0.00	5.64	8.59	11.50		0.00	8.03	11.97	16.06
	0.00	5.94	9.05	12.11		0.00	8.37	12.50	16.73
	0.00	5.71	8.67	11.59		0.00	8.32	12.44	16.70
FLECHAS	0.00	6.74	10.04	13.42	FLECHAS	0.00	5.45	8.26	11.01
NA	0.00	7.16	10.66	14.22	NA	0.00	5.78	8.77	11.72
SECAO 2	0.00	7.17	10.68	14.33	SECAO 7	0.00	5.68	8.66	11.57
(mm)	0.00	7.39	11.01	14.76	(mm)	0.00	5.86	8.86	11.82
	0.00	7.62	11.36	15.24		0.00	5.96	9.03	12.04
	0.00	8.01	11.95	15.97		0.00	5.97	9.07	12.16
	0.00	7.85	11.67	15.56		0.00	6.11	9.28	12.40
FLECHAS	0.00	8.12	12.31	16.49	FLECHAS	0.00	3.29	4.89	6.44
NA	0.00	8.52	12.95	17.38	NA	0.00	3.42	5.11	6.78
SECAO 3	0.00	8.48	12.86	17.26	SECAO 8	0.00	3.52	5.27	6.99
(mm)	0.00	8.68	13.18	17.73	(mm)	0.00	3.53	5.29	7.02
	0.00	8.95	13.63	18.34		0.00	3.55	5.30	7.02
	0.00	9.42	14.33	19.25		0.00	3.61	5.39	7.16
	0.00	9.16	13.90	18.66		0.00	3.52	5.26	6.97
FLECHAS	0.00	8.81	13.12	17.60					
NA	0.00	9.14	13.67	18.40					
SECAO 4	0.00	9.26	13.83	18.58					
(mm)	0.00	9.26	13.76	18.43					
	0.00	9.90	14.77	19.85					
	0.00	9.86	14.78	19.89					
	0.00	10.50	15.71	21.11					

Fig. 110a

ELASTICA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secção 4

Trem tipo nas vigas 2 e 6

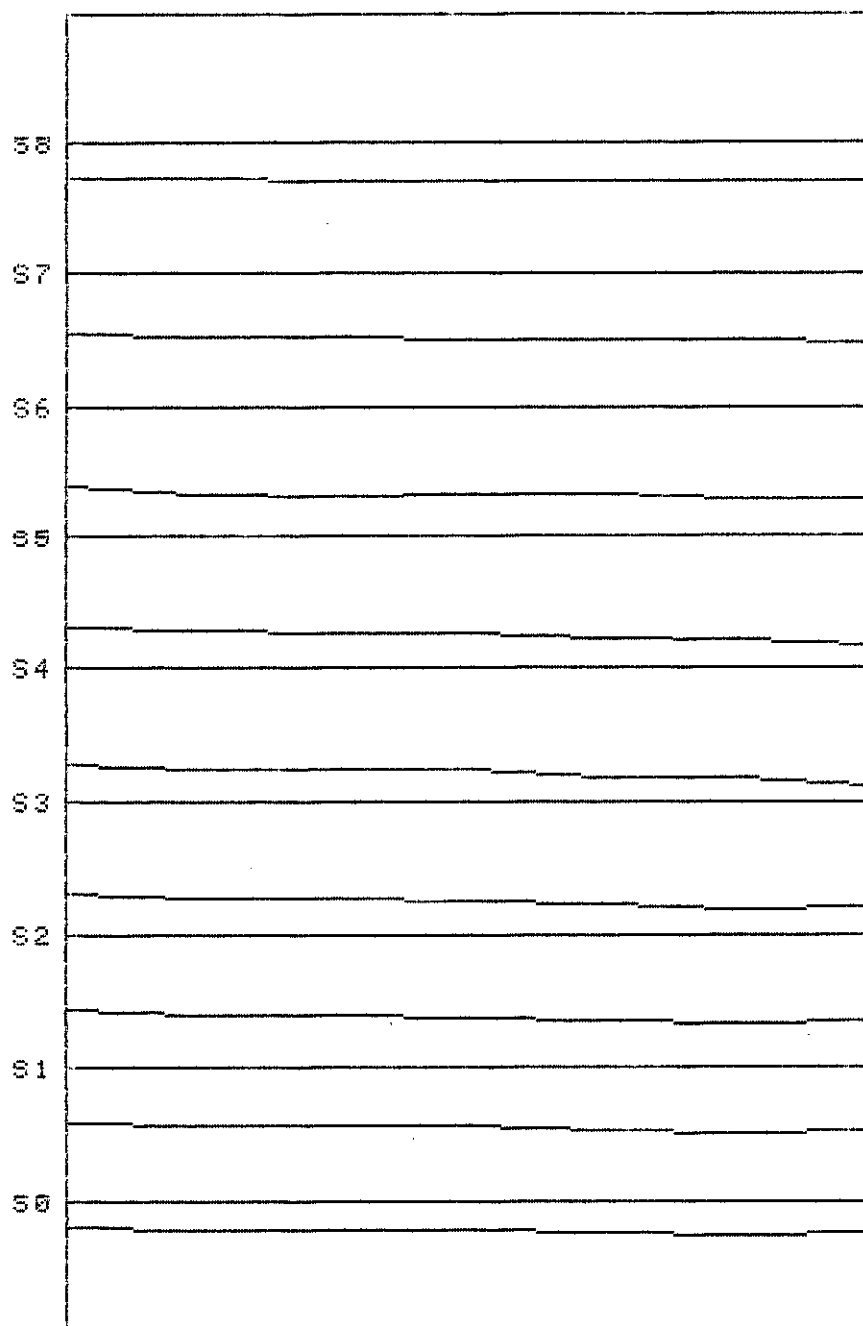


Fig. 110b:

ELASTICA DAS SECOES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secao 4

Trem Tipo nas Vigas 2e 6

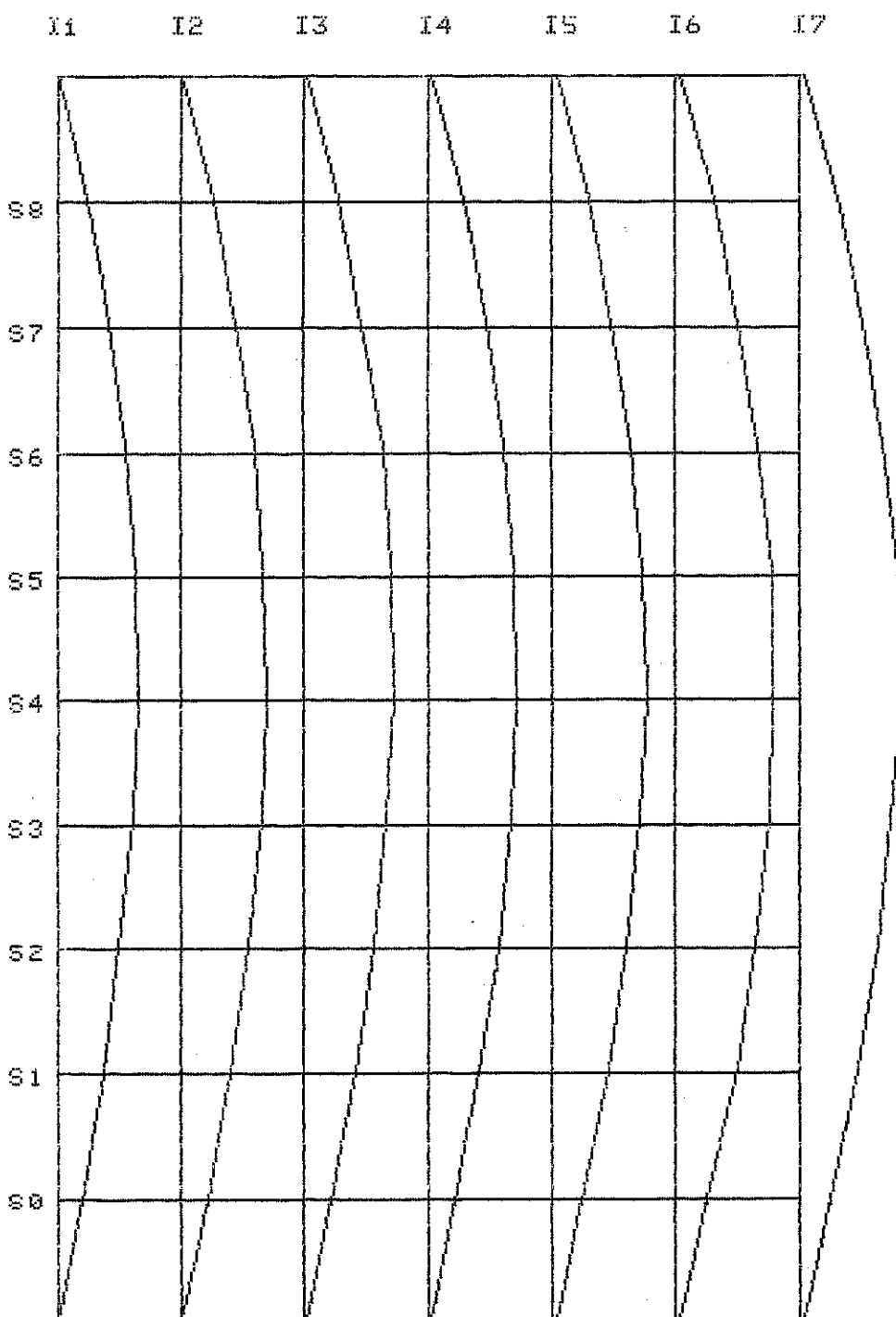


Tabela 45

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
TREM TIPO NAS VIGAS 3 E 7

	CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0		CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0
FLECHAS	0.00	2.17	3.25	4.32	FLECHAS	0.00	6.92	10.38	13.85
NA	0.00	2.58	3.85	5.13	NA	0.00	7.94	11.94	15.98
SECAO 0	0.00	2.73	4.10	5.47	SECAO 5	0.00	8.78	13.14	17.53
(MM)	0.00	2.73	4.09	5.47	(MM)	0.00	9.06	13.55	18.04
	0.00	3.01	4.50	5.98		0.00	9.92	14.84	19.82
	0.00	3.33	4.96	6.57		0.00	10.49	15.82	21.16
	0.00	3.46	5.10	6.71		0.00	11.55	17.43	23.32
FLECHAS	0.00	4.21	6.34	8.43	FLECHAS	0.00	6.04	9.04	12.04
NA	0.00	4.96	7.45	9.89	NA	0.00	7.04	10.60	14.17
SECAO 1	0.00	5.13	7.70	10.21	SECAO 6	0.00	7.66	11.57	15.35
(MM)	0.00	5.41	8.14	10.84	(MM)	0.00	7.93	11.95	15.82
	0.00	5.90	8.87	11.82		0.00	8.35	12.56	16.57
	0.00	6.63	9.92	13.17		0.00	8.92	13.49	17.82
	0.00	6.72	10.04	13.35		0.00	9.57	14.53	19.20
FLECHAS	0.00	5.74	8.62	11.49	FLECHAS	0.00	4.56	6.84	9.05
NA	0.00	6.45	9.71	13.02	NA	0.00	5.20	7.82	10.38
SECAO 2	0.00	6.93	10.41	13.94	SECAO 7	0.00	5.60	8.46	11.27
(MM)	0.00	7.54	11.31	15.13	(MM)	0.00	5.88	8.83	11.74
	0.00	8.14	12.18	16.24		0.00	6.15	9.20	12.19
	0.00	8.84	13.50	17.86		0.00	6.49	9.75	13.01
	0.00	9.02	13.45	17.91		0.00	7.07	10.61	14.12
FLECHAS	0.00	6.82	10.20	13.54	FLECHAS	0.00	2.77	4.14	5.51
NA	0.00	7.79	11.67	15.48	NA	0.00	3.15	4.74	6.36
SECAO 3	0.00	8.47	12.69	16.87	SECAO 8	0.00	3.54	5.31	7.12
(MM)	0.00	9.06	13.60	18.19	(MM)	0.00	3.52	5.27	7.07
	0.00	9.67	14.49	19.34		0.00	3.65	5.45	7.27
	0.00	10.46	15.69	20.92		0.00	3.82	5.69	7.58
	0.00	10.73	16.16	21.75		0.00	4.21	6.27	8.37
FLECHAS	0.00	7.25	10.86	14.51					
NA	0.00	8.22	12.36	16.51					
SECAO 4	0.00	9.30	13.98	18.75					
(MM)	0.00	9.37	14.05	18.80					
	0.00	10.49	15.67	20.92					
	0.00	10.25	15.49	20.99					
	0.00	12.33	18.59	24.92					

Fig. 111a

ELASTICA DAS SECÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secao 4

Trem tipo nas vigas 3 e 7

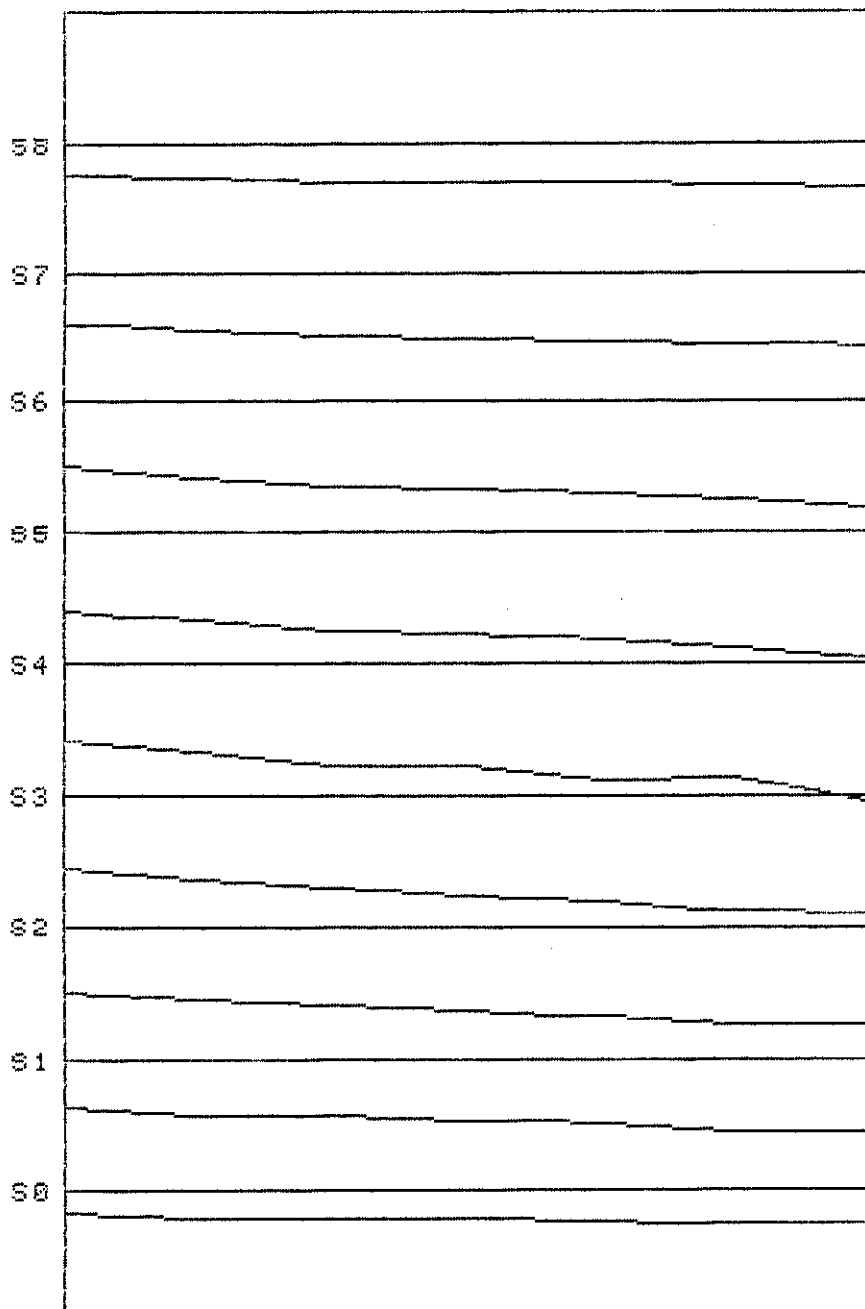


Fig. 111b

ELASTICA DAS SECÇÕES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secção 4

Trem Tipo nas Vigas 3e 7

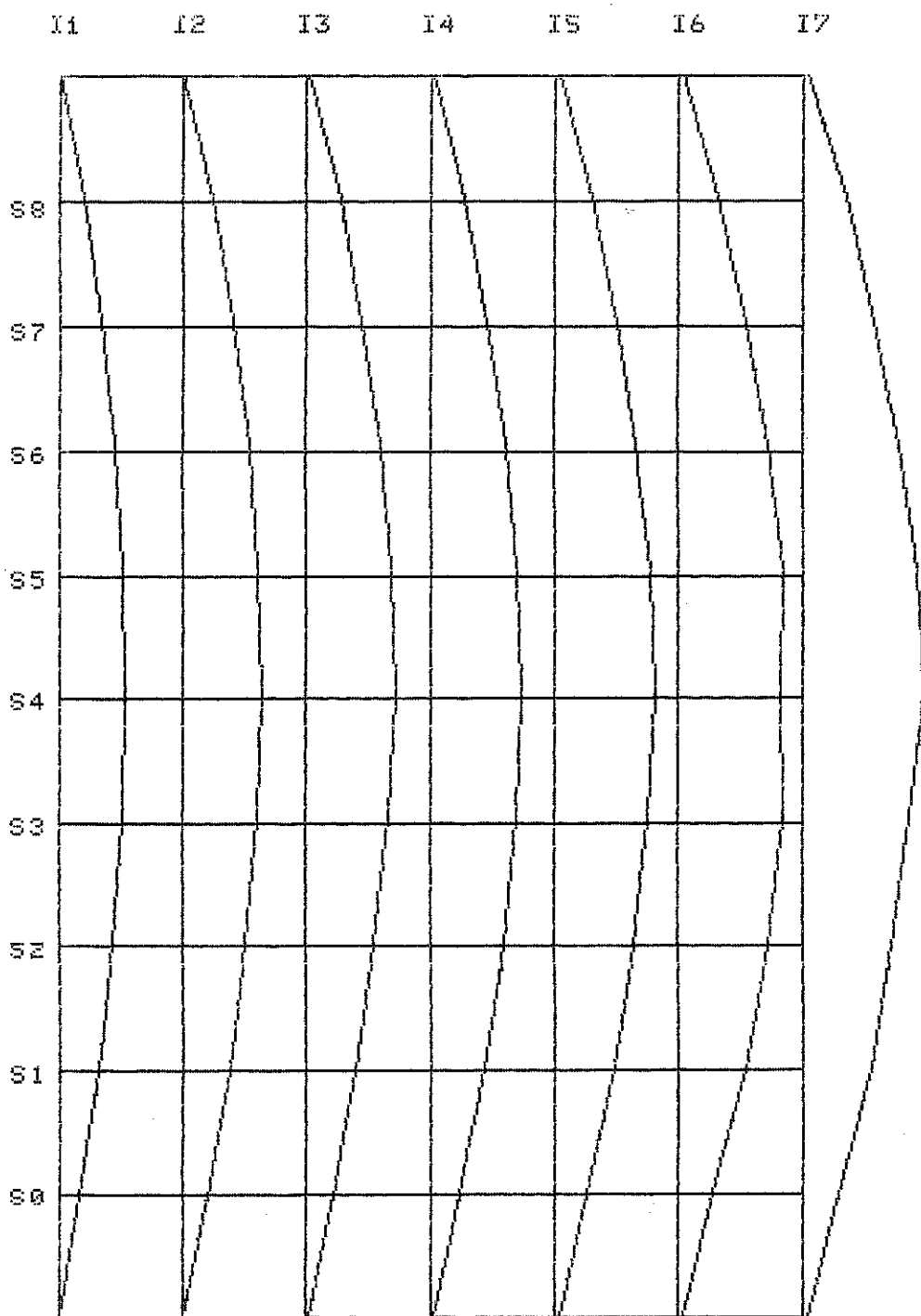


Tabela 46

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
TREM TIPO NAS VIGAS 1 E 5

	CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0		CARGA 0	CARGA 9,5	CARGA 14,25	CARGA 19,0
FLECHAS	0.00	3.12	4.60	6.15	FLECHAS	0.00	9.94	15.05	20.15
NA	0.00	3.09	4.53	6.02	NA	0.00	9.26	14.00	18.73
SECAO 0	0.00	2.85	4.20	5.61	SECAO 5	0.00	9.10	13.65	18.20
(mm)	0.00	2.62	3.88	5.19	(mm)	0.00	8.65	13.02	17.32
	0.00	2.67	3.96	5.32		0.00	8.53	12.88	17.23
	0.00	2.64	3.94	5.30		0.00	7.98	12.11	16.23
	0.00	2.38	3.52	4.71		0.00	8.06	12.21	16.31
	0.00	5.96	8.98	11.95		0.00	8.96	13.32	17.98
FLECHAS	0.00	5.69	8.54	11.33	FLECHAS	0.00	8.65	12.85	17.28
NA	0.00	5.32	7.99	10.59	NA	0.00	8.55	12.67	17.02
SECAO 1	0.00	5.09	7.71	10.28	SECAO 6	0.00	7.89	11.71	15.72
(mm)	0.00	5.12	7.76	10.37	(mm)	0.00	7.55	11.21	15.08
	0.00	5.06	7.67	10.24		0.00	7.58	11.23	15.03
	0.00	4.60	6.95	9.26		0.00	6.84	10.19	13.67
	0.00	8.05	11.95	16.09		0.00	6.56	9.94	13.37
FLECHAS	0.00	7.91	11.70	15.68	FLECHAS	0.00	6.29	9.46	12.59
NA	0.00	7.47	11.06	14.87	NA	0.00	5.91	8.91	11.87
SECAO 2	0.00	7.23	10.74	14.46	SECAO 7	0.00	5.74	8.64	11.50
(mm)	0.00	7.00	10.42	14.03	(mm)	0.00	5.49	8.28	11.03
	0.00	6.96	10.37	13.89		0.00	5.21	7.91	10.60
	0.00	6.56	9.68	12.93		0.00	5.01	7.58	10.09
	0.00	9.68	14.62	19.63		0.00	3.90	5.78	7.68
FLECHAS	0.00	9.14	13.74	18.32	FLECHAS	0.00	3.68	5.49	7.33
NA	0.00	8.76	13.17	17.52	NA	0.00	3.65	5.45	7.27
SECAO 3	0.00	8.36	12.63	16.93	SECAO 8	0.00	3.33	5.00	6.68
(mm)	0.00	8.21	12.42	16.63	(mm)	0.00	3.20	4.80	6.42
	0.00	8.11	12.27	16.39		0.00	3.10	4.66	6.24
	0.00	7.37	11.15	14.88		0.00	2.69	4.06	5.44
	0.00	11.26	16.84	22.79					
FLECHAS	0.00	9.79	14.58	19.67					
NA	0.00	9.45	14.06	18.95					
SECAO 4	0.00	9.28	13.75	18.47					
(mm)	0.00	9.07	13.51	18.22					
	0.00	8.44	12.57	16.93					
	0.00	8.61	12.79	17.19					

Fig. 112a

ELASTICA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secao 4

Trem tipo nas vigas 1 e 5

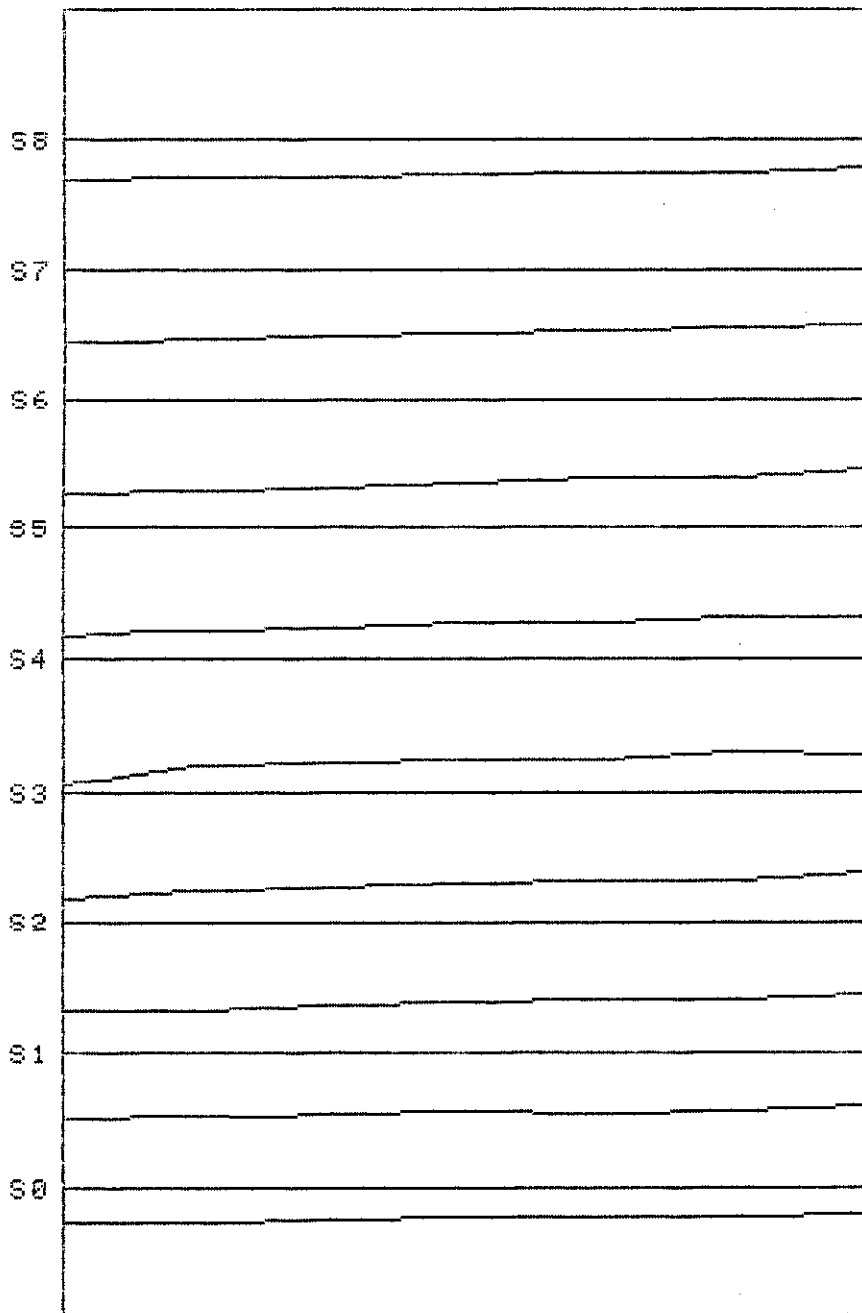
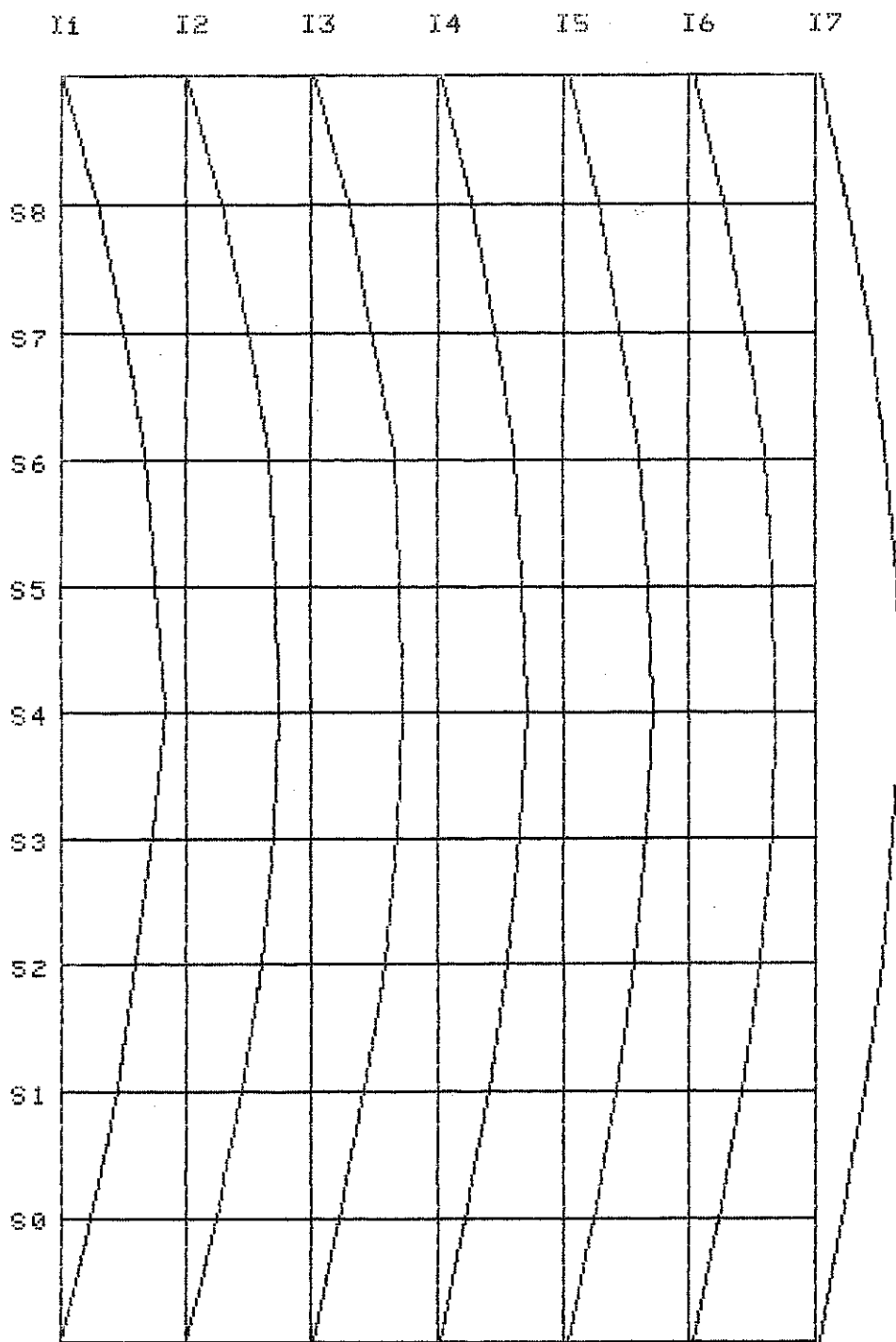


Fig. 112b

ELASTICA DAS SECOES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secao 4

Trem Tipo nas Vigas 1e 5



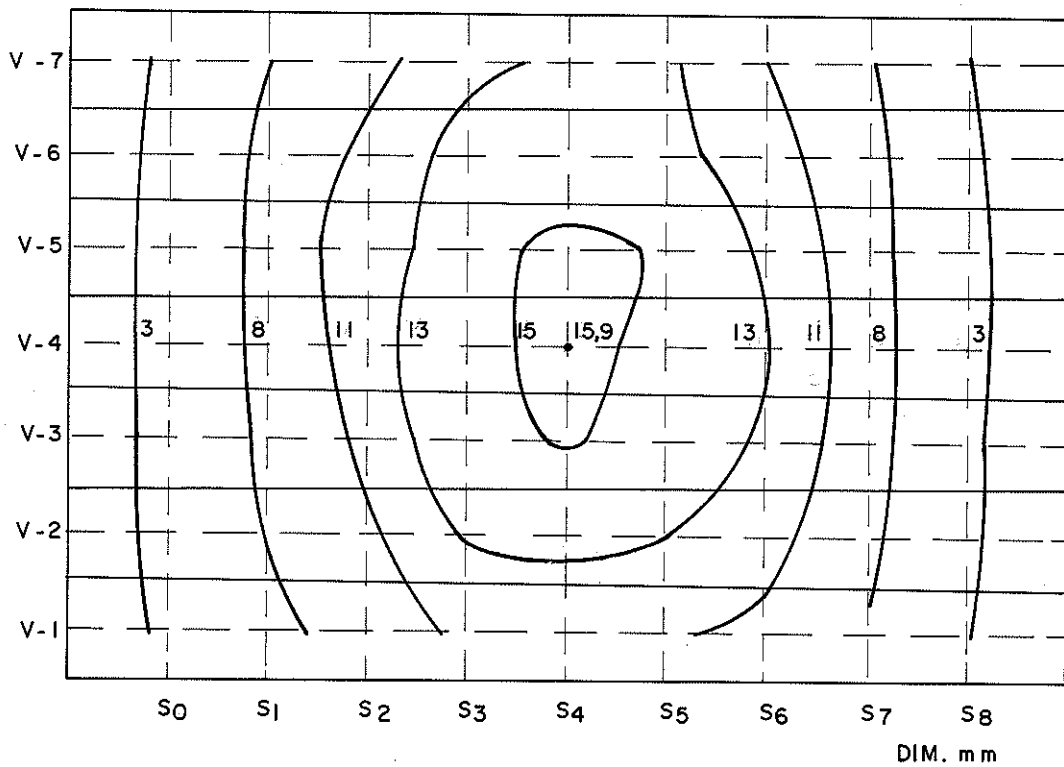


Fig.113-Representação das curvas de nível (seção simples) carregamento concentrado de 14,25 KN na viga 4.

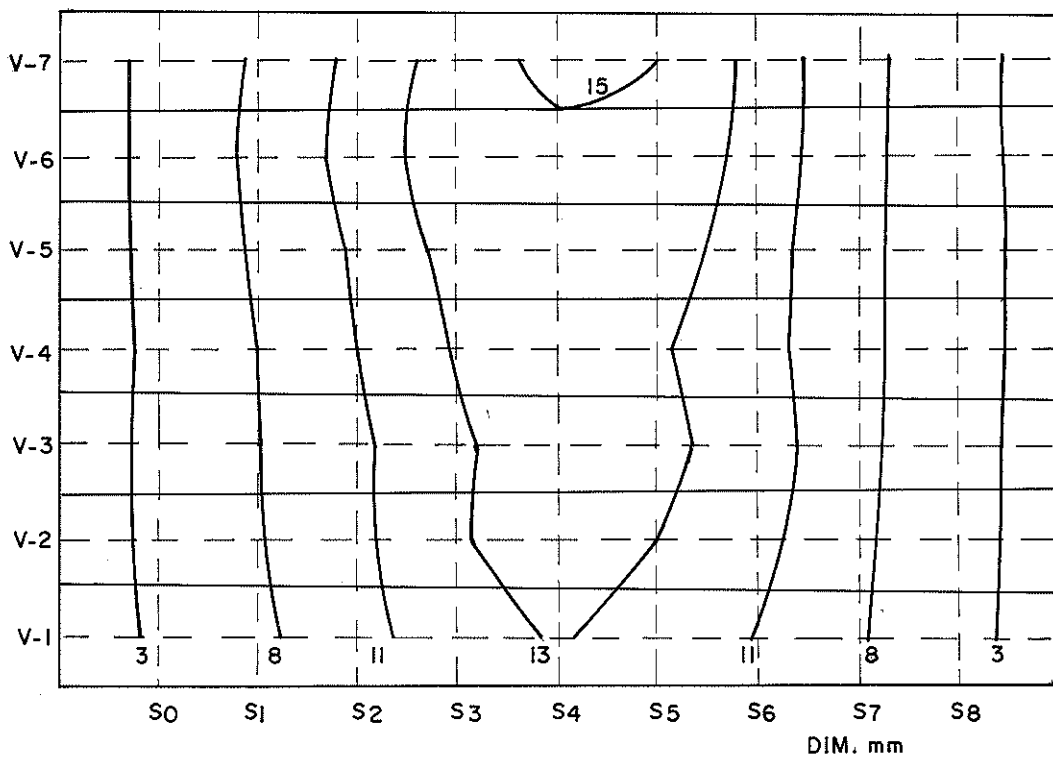


Fig.114-Representação das curvas de nível (seção simples) carregamento de 14,25 KN do trem-tipo concentrado (rodas nas vigas 2 e 6).

5.5.3- Ensaio do modelo de seção nervurada

Completada a série de ensaios no modelo de seção simples, foi montado o modelo de seção nervurada. Os módulos de elasticidade das vigas para a seção nervurada são apresentados na figura 115.

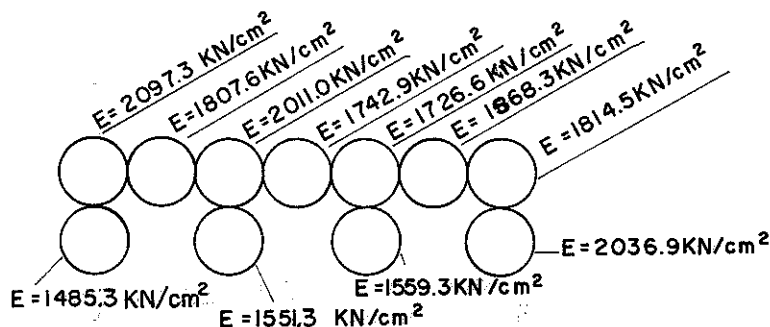


Fig.115-Módulo de elasticidade das vigas

Os ensaios realizados para o modelo com seção nervurada foram semelhantes aos da seção simples.

Foram feitos carregamentos nas seções 4, 5, 6, 7, 8 e na seção 2, para verificar a simetria do modelo.

Para os carregamentos concentrados as cargas aplicadas foram de 23,75 KN, 28,50 KN e 33,25 KN.

Os gráficos das elásticas transversais e longitudinais foram traçados para o carregamento de 28,50 KN.

A figura 116 mostra o carregamento concentrado sobre a viga 2, na seção transversal central

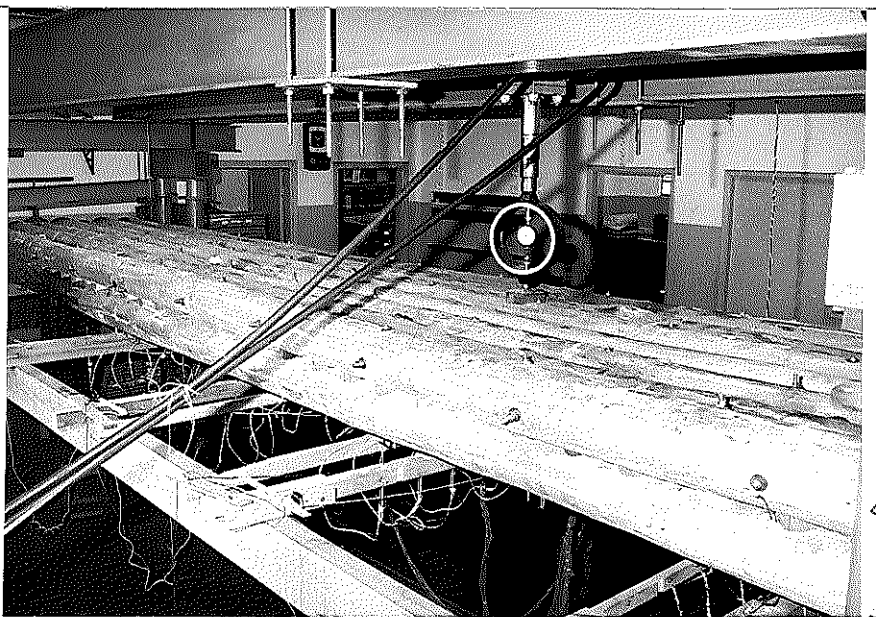


Fig.116-Ponte nervurada. Carga na viga 2

O ensaio principal do modelo de seção nervurada foi feito o carregamento do trem-tipo. Fig. 117.

As tabelas 47, 48, 49 e as figuras correspondentes 118, 119, 120, das elásticas transversais e longitudinais, contem os resultados de ensaio com carga concentrada nas vigas da seção transversal central (seção 4).

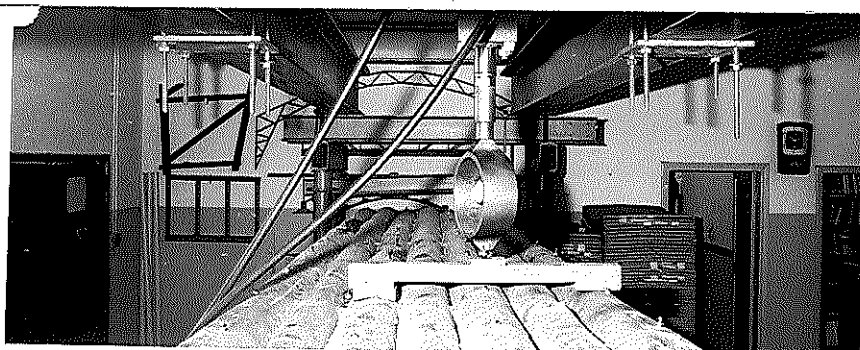


Fig.117-Carregamento com trem-tipo

Como o carregamento através do trem-tipo é aplicado em dois pontos da seção transversal, há uma melhor distribuição das cargas nas vigas, em relação à carga concentrada.

As cargas aplicadas sobre o eixo do trem-tipo de duas rodas foram: 28,5 KN, 33,25 KN e 38,0 KN.

Os gráficos das elásticas transversais e longitudinais foram traçadas para o carregamento de 28,5 KN.

As tabelas 50, 51, 52, e as figuras 121, 122, 123, das elásticas transversais e longitudinais, apresentam os resultados dos ensaios com carregamento do trem-tipo na seção transversal central (seção 4).

A tabela 53 e a figura 124 mostram o resultado do ensaio com trem-tipo centrado na seção 2.

As figuras 125, 126 apresentam as linhas de flechas equivalentes para o modelo de seção nervurada, com carregamento concentrado e com o carregamento do trem-tipo respectivamente. A carga aplicada foi de 28,5 KN para os dois casos.

Tabela 47

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
 CARREGAMENTO NA VIGA 4

	CARGA 0	CARGA 23,75	CARGA 28,5	CARGA 33,25		CARGA 0	CARGA 23,75	CARGA 28,5	CARGA 33,25
FLECHAS	0.00	3.49	4.16	4.79	FLECHAS	0.00	7.14	8.53	9.85
NA	0.00	4.49	5.35	6.13	NA	0.00	8.44	10.14	11.78
SECAO 0	0.00	5.25	6.26	7.18	SECAO 5	0.00	9.94	11.92	13.79
(mm)	0.00	5.26	6.31	7.26	(mm)	0.00	10.89	13.16	15.36
	0.00	5.40	6.48	7.48		0.00	9.61	11.62	13.54
	0.00	4.77	5.65	6.45		0.00	7.61	9.16	10.66
	0.00	3.69	4.30	4.90		0.00	6.58	7.72	8.89
FLECHAS	0.00	5.17	6.18	7.16	FLECHAS	0.00	6.22	7.36	8.44
NA	0.00	6.27	7.50	8.67	NA	0.00	7.84	9.38	10.76
SECAO 1	0.00	6.96	8.34	9.66	SECAO 6	0.00	8.45	10.19	11.70
(mm)	0.00	7.61	9.15	10.61	(mm)	0.00	9.22	11.12	12.82
	0.00	7.36	8.82	10.23		0.00	8.35	10.16	11.74
	0.00	6.29	7.50	8.67		0.00	6.46	7.78	8.98
	0.00	4.37	5.15	5.96		0.00	5.45	6.47	7.42
FLECHAS	0.00	6.19	7.34	8.43	FLECHAS	0.00	5.94	6.98	8.01
NA	0.00	7.99	9.56	11.01	NA	0.00	6.56	7.78	9.00
SECAO 2	0.00	9.50	11.39	13.10	SECAO 7	0.00	7.41	8.83	10.25
(mm)	0.00	10.00	12.03	13.89	(mm)	0.00	7.09	8.50	9.89
	0.00	9.33	11.20	12.90		0.00	6.64	7.98	9.27
	0.00	7.86	9.41	10.84		0.00	5.16	6.22	7.24
	0.00	5.00	5.73	6.58		0.00	3.51	4.01	4.67
FLECHAS	0.00	7.44	8.88	10.24	FLECHAS	0.00	3.05	3.59	4.12
NA	0.00	8.63	10.36	12.02	NA	0.00	4.15	4.94	5.66
SECAO 3	0.00	10.66	12.93	15.06	SECAO 8	0.00	4.40	5.27	6.05
(mm)	0.00	11.66	14.10	16.45	(mm)	0.00	4.19	5.05	5.80
	0.00	10.51	12.64	14.70		0.00	3.81	4.63	5.36
	0.00	8.87	10.66	12.36		0.00	2.98	3.62	4.19
	0.00	5.00	6.05	7.02		0.00	2.62	3.10	3.58
FLECHAS	0.00	7.20	8.57	9.89					
NA	0.00	9.21	11.06	12.77					
SECAO 4	0.00	10.91	13.13	15.18					
(mm)	0.00	12.24	14.86	17.29					
	0.00	10.09	12.19	14.11					
	0.00	8.35	10.04	11.63					
	0.00	5.19	5.99	6.91					

Fig. 118 a

ELASTICA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secao 4

Carregamento na viga 4

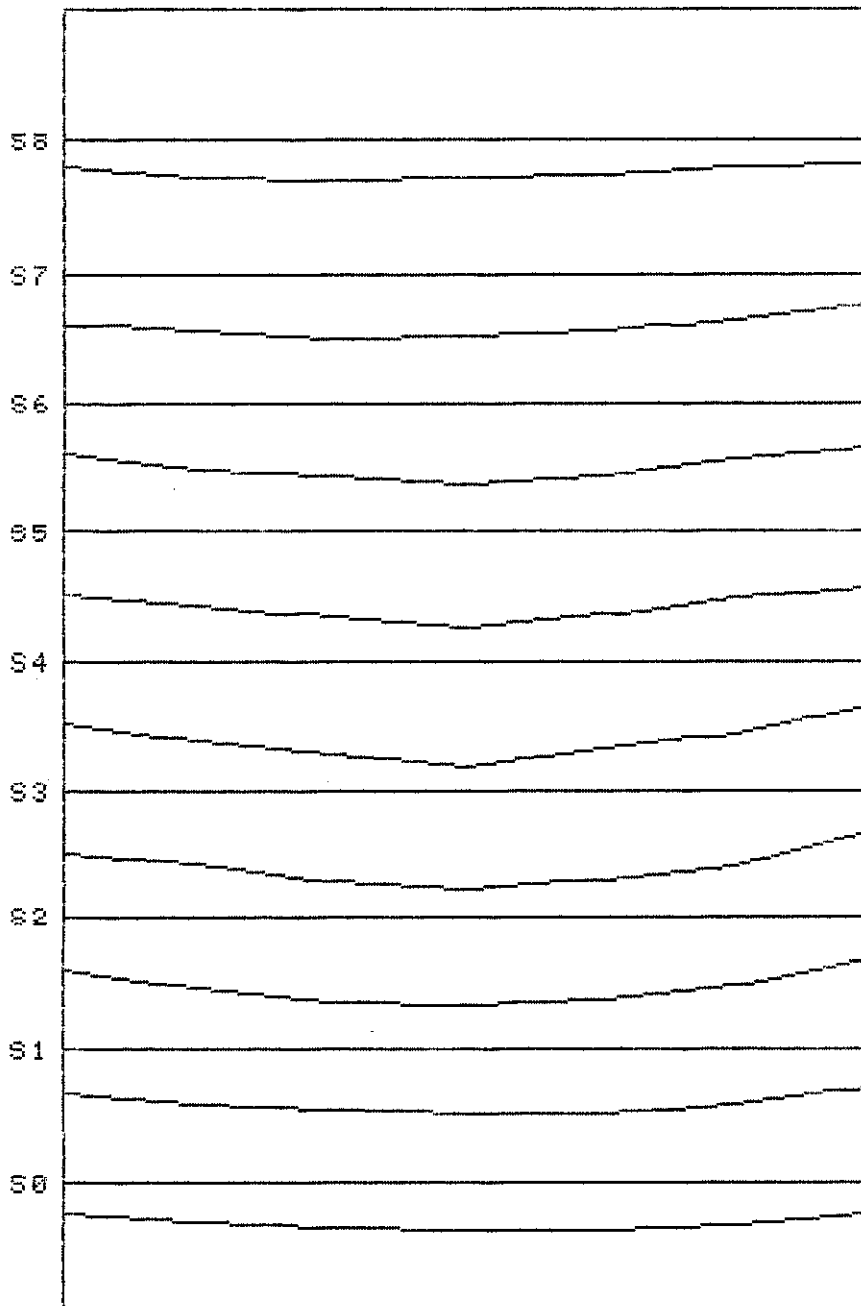


Fig. 118 b

ELASTICA DAS SECÕES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secao 4

Carregamento na Viga 4

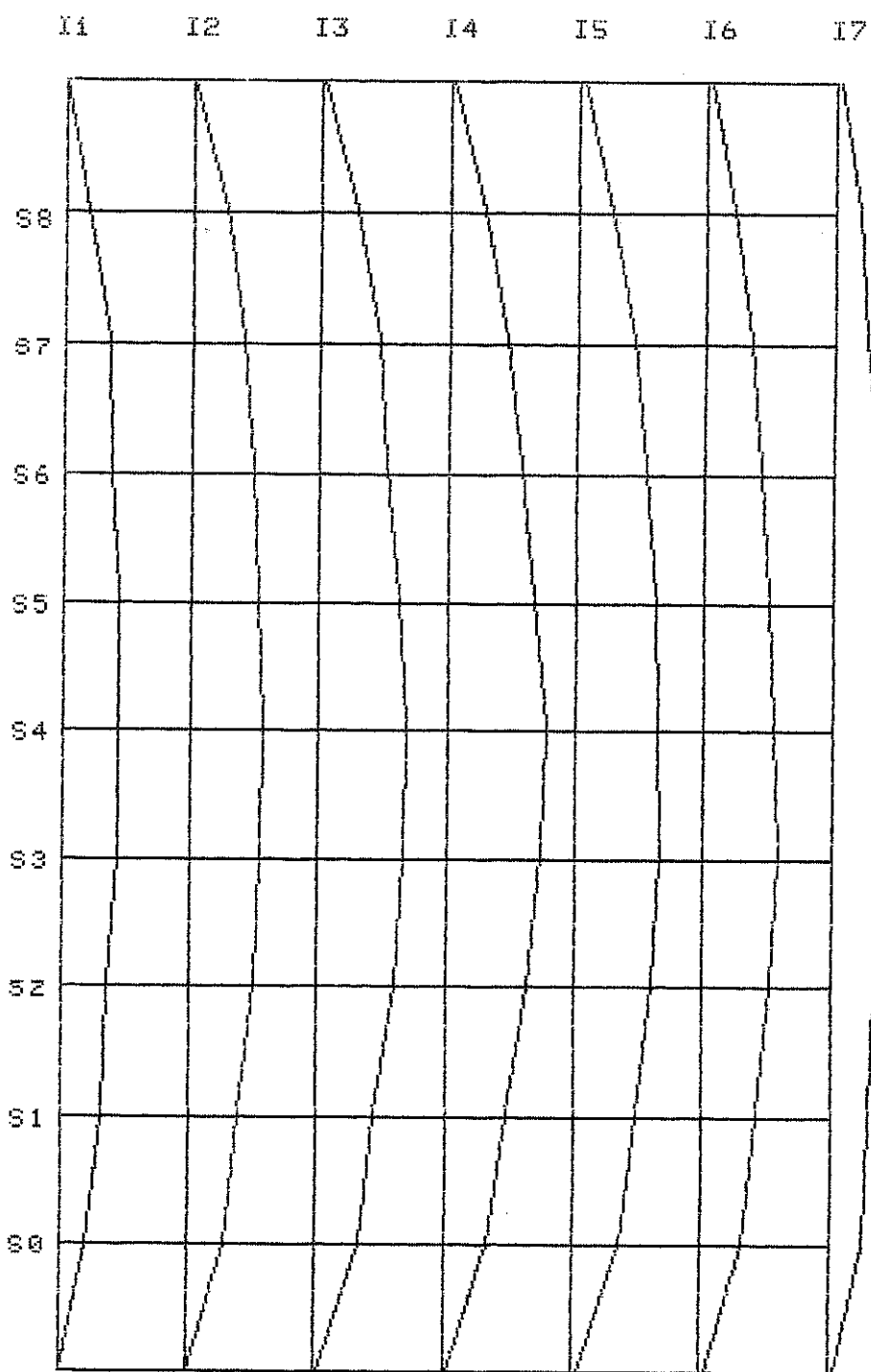


Tabela 48

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
 CARREGAMENTO NA VIGA 3

	CARGA 0	CARGA 23,75	CARGA 28,5	CARGA 33,25		CARGA 0	CARGA 23,75	CARGA 28,5	CARGA 33,25
FLECHAS	0.00	4.94	5.79	6.61	FLECHAS	0.00	10.25	12.38	14.15
NA	0.00	5.15	6.07	7.02	NA	0.00	11.10	13.51	15.46
SECAO 0	0.00	5.22	6.17	7.15	SECAO 5	0.00	11.30	13.78	15.82
(mm)	0.00	4.67	5.55	6.47	(mm)	0.00	9.74	11.84	13.56
	0.00	4.36	5.17	5.96		0.00	7.10	8.62	9.89
	0.00	3.43	4.06	4.64		0.00	5.47	6.63	7.62
	0.00	2.42	2.81	3.16		0.00	3.74	4.49	5.18
	0.00	7.45	8.88	10.06		0.00	8.68	10.16	11.68
FLECHAS	0.00	7.82	9.43	10.74	FLECHAS	0.00	9.91	11.71	13.51
NA	0.00	7.22	8.76	9.99	NA	0.00	9.22	10.94	12.69
SECAO 1	0.00	6.78	8.25	9.41	SECAO 6	0.00	8.23	9.79	11.34
(mm)	0.00	5.91	7.13	8.12	(mm)	0.00	6.81	7.96	9.07
	0.00	4.64	5.58	6.38		0.00	5.11	5.86	6.98
	0.00	3.01	3.54	4.04		0.00	3.31	3.91	4.46
	0.00	9.33	10.93	12.48		0.00	7.49	8.90	10.05
FLECHAS	0.00	10.35	12.23	14.13	FLECHAS	0.00	7.91	9.53	10.86
NA	0.00	9.86	11.70	13.62	NA	0.00	7.73	9.39	10.73
SECAO 2	0.00	8.69	10.31	11.96	SECAO 7	0.00	6.46	7.83	8.97
(mm)	0.00	7.27	8.62	9.96	(mm)	0.00	5.20	6.32	7.26
	0.00	5.66	6.73	7.76		0.00	4.14	4.99	5.73
	0.00	3.41	3.98	4.45		0.00	2.65	3.21	3.70
	0.00	10.58	12.70	14.44		0.00	4.15	4.90	5.65
FLECHAS	0.00	11.68	14.19	16.23	FLECHAS	0.00	4.79	5.73	6.71
NA	0.00	11.05	13.45	15.38	NA	0.00	4.67	5.60	6.56
SECAO 3	0.00	10.47	12.77	14.66	SECAO 8	0.00	3.88	4.65	5.45
(mm)	0.00	8.34	10.09	11.52	(mm)	0.00	3.15	3.78	4.45
	0.00	6.45	7.83	8.98		0.00	2.39	2.88	3.37
	0.00	3.76	4.38	4.95		0.00	1.86	2.24	2.58
	0.00	11.37	13.39	15.38					
FLECHAS	0.00	12.36	14.65	16.97					
NA	0.00	12.70	15.06	17.49					
SECAO 4	0.00	10.54	12.52	14.51					
(mm)	0.00	8.11	9.65	11.15					
	0.00	6.03	7.19	8.33					
	0.00	3.49	4.07	4.58					

Fig. 119 a

ELASTICA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secao 4

Carregamento na viga 3

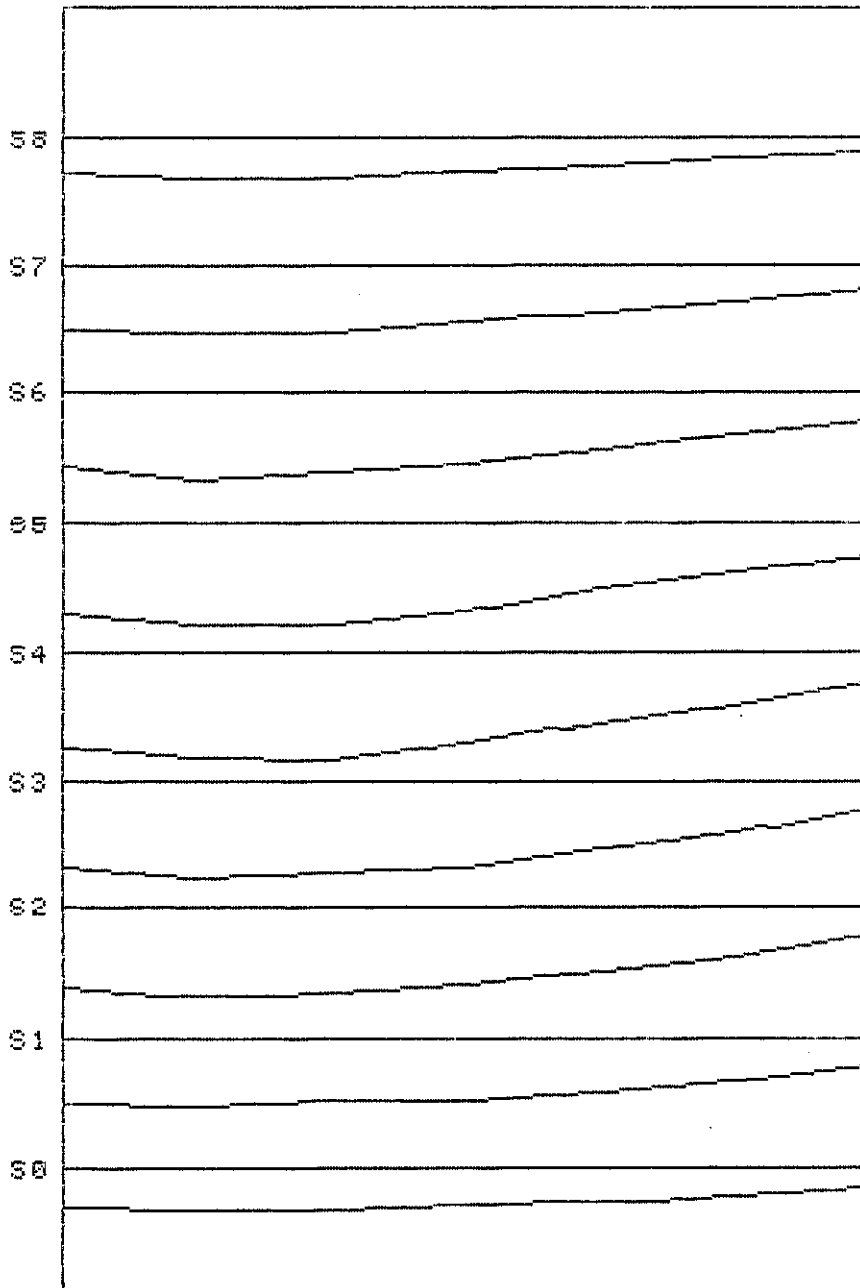


Fig. 119 b

ELASTICA DAS SECÇÕES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secao 4

Carregamento na Viga 3

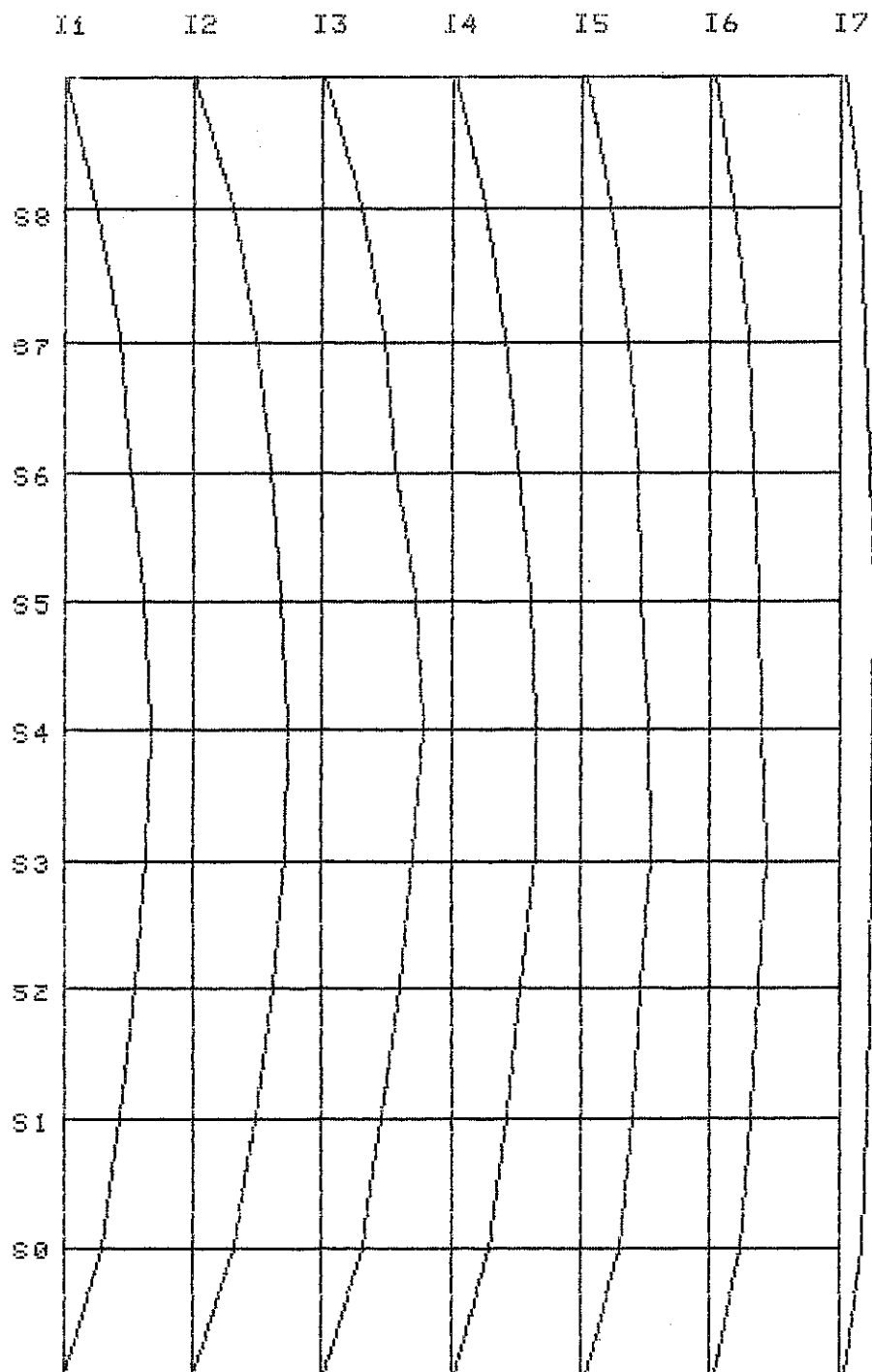


Tabela 49

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
 CARREGAMENTO NA VIGA 2

	CARGA 0	CARGA 23,75	CARGA 28,5	CARGA 33,25		CARGA 0	CARGA 23,75	CARGA 28,5	CARGA 33,25
FLECHAS	0.00	5.30	6.57	7.70	FLECHAS	0.00	13.81	16.33	18.77
NA	0.00	4.69	5.83	6.85	NA	0.00	12.97	15.46	17.88
SECAO 0	0.00	3.81	4.70	5.49	SECAO 5	0.00	10.59	12.68	14.69
(MM)	0.00	3.08	3.86	4.55	(MM)	0.00	7.97	9.49	10.92
	0.00	2.33	2.91	3.44		0.00	5.29	6.34	7.33
	0.00	1.26	1.61	1.93		0.00	3.55	4.30	5.00
	0.00	0.26	0.37	0.47		0.00	1.98	2.39	2.76
FLECHAS	0.00	9.91	11.60	13.19	FLECHAS	0.00	9.99	12.45	14.52
NA	0.00	8.82	10.43	11.98	NA	0.00	9.37	11.70	13.83
SECAO 1	0.00	7.05	8.29	9.43	SECAO 6	0.00	7.08	8.80	10.36
(MM)	0.00	5.46	6.52	7.51	(MM)	0.00	5.57	6.95	8.18
	0.00	3.99	4.88	5.62		0.00	3.62	4.51	5.30
	0.00	2.57	3.13	3.66		0.00	2.60	3.26	3.84
	0.00	1.14	1.43	1.68		0.00	1.50	1.87	2.16
FLECHAS	0.00	10.46	12.98	15.24	FLECHAS	0.00	10.43	12.30	14.11
NA	0.00	10.04	12.52	14.76	NA	0.00	8.98	10.62	12.20
SECAO 2	0.00	7.14	8.82	10.30	SECAO 7	0.00	7.37	8.73	10.03
(MM)	0.00	5.66	7.06	8.31	(MM)	0.00	5.47	6.54	7.56
	0.00	4.23	5.26	6.18		0.00	3.81	4.59	5.30
	0.00	2.79	3.52	4.18		0.00	2.69	3.26	3.79
	0.00	1.07	1.32	1.53		0.00	1.43	1.73	1.97
FLECHAS	0.00	14.46	17.08	19.62	FLECHAS	0.00	5.60	6.51	7.37
NA	0.00	14.31	17.03	19.66	NA	0.00	5.17	6.06	6.90
SECAO 3	0.00	10.14	11.94	13.65	SECAO 8	0.00	4.74	5.56	6.33
(MM)	0.00	8.54	10.18	11.73	(MM)	0.00	3.35	3.97	4.55
	0.00	5.18	6.22	7.20		0.00	2.33	2.80	3.22
	0.00	3.66	4.44	5.17		0.00	1.72	2.07	2.37
	0.00	1.53	1.79	2.01		0.00	1.01	1.20	1.35
FLECHAS	0.00	12.93	16.16	19.05					
NA	0.00	12.64	15.83	18.73					
SECAO 4	0.00	8.88	11.22	13.07					
(MM)	0.00	6.91	8.59	10.11					
	0.00	4.77	5.91	6.94					
	0.00	3.18	4.00	4.72					
	0.00	1.22	1.50	1.75					

Fig. 120 a

ELASTICA DAS SECÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secao .4

Carregamento na viga 2

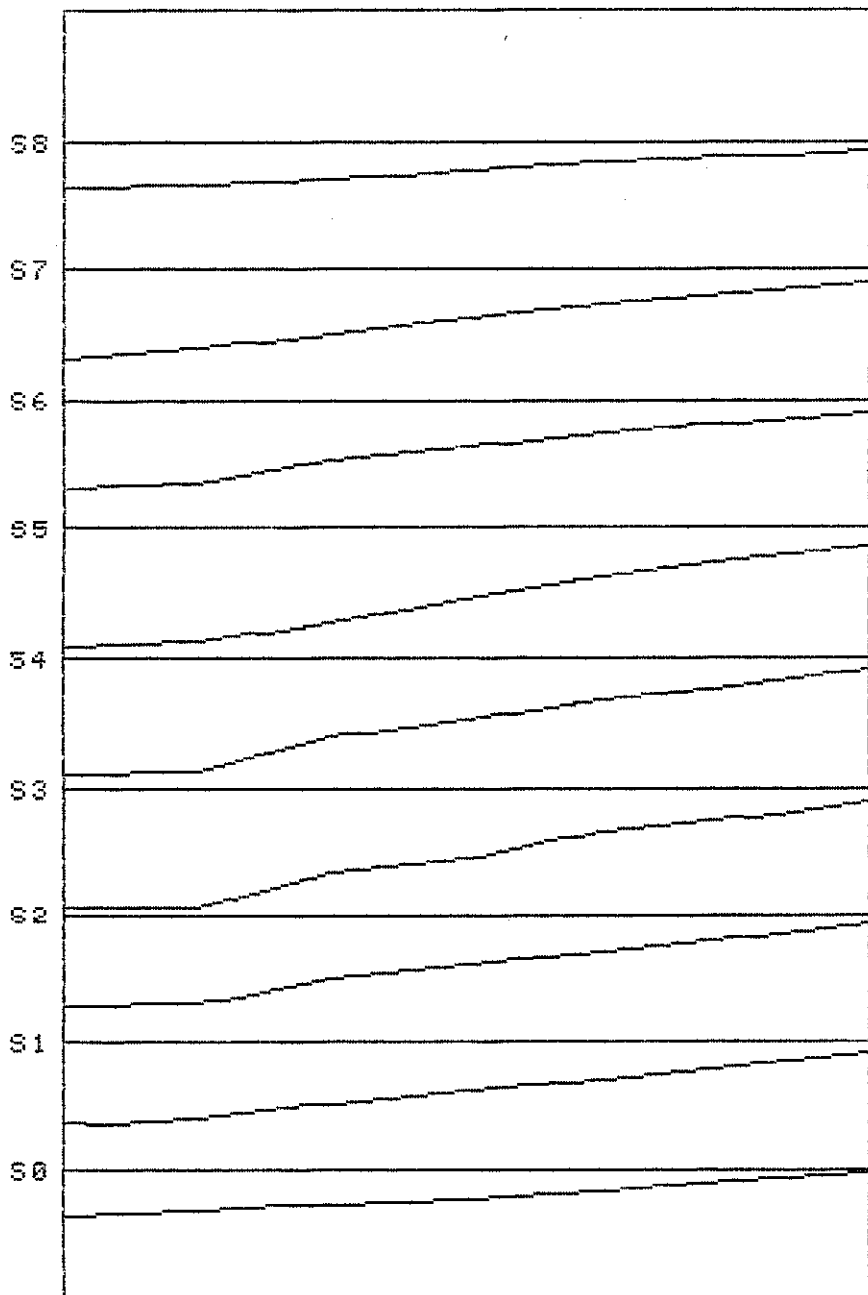


Fig. 120 b

ELASTICA DAS SECOES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secao 4

Carregamento na Viga 2

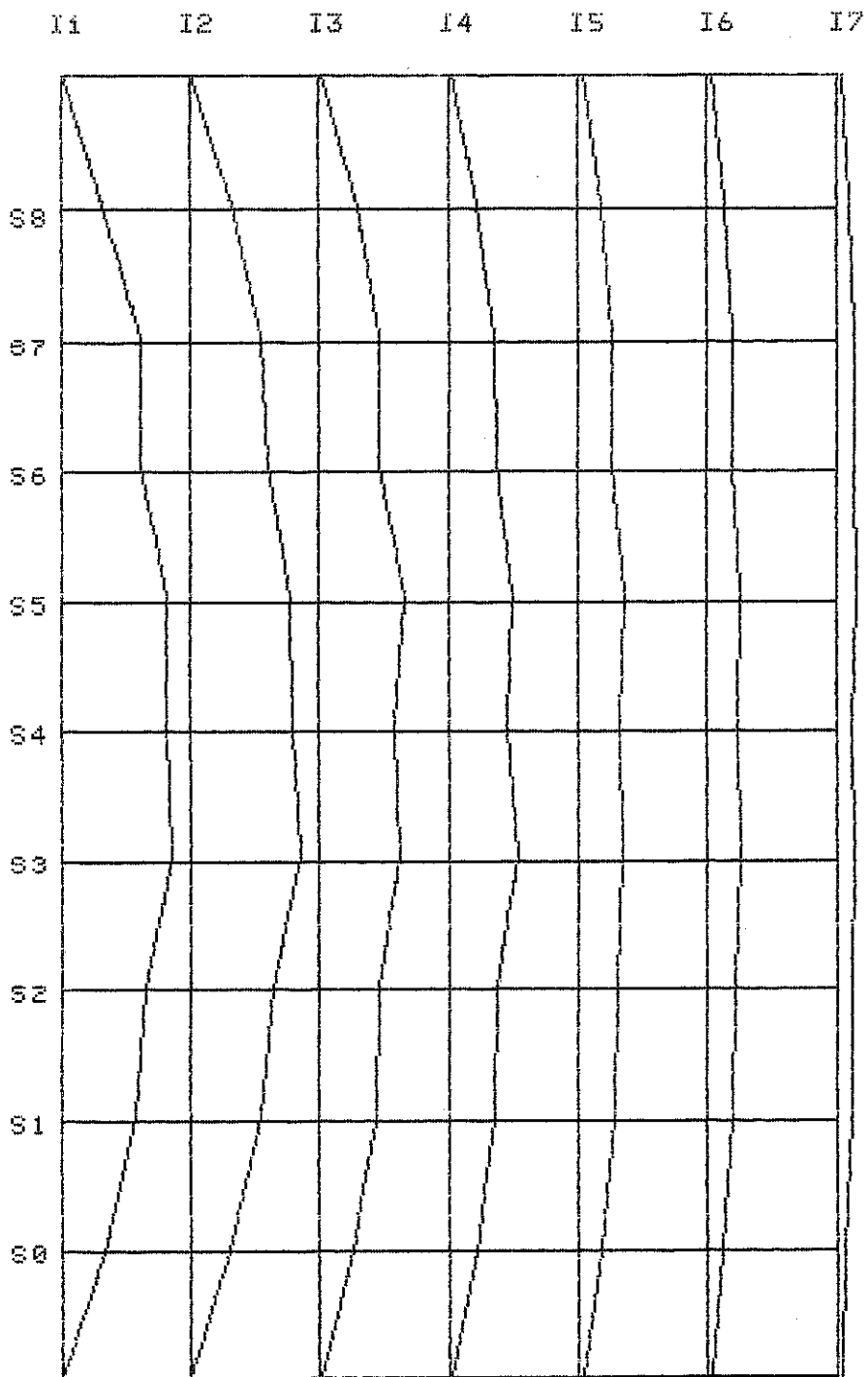


Tabela 50

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
TREM TIPO NAS VIGAS 2 E 6

	CARGA 0	CARGA 28,5	CARGA 33,25	CARGA 38,5		CARGA 0	CARGA 28,5	CARGA 33,25	CARGA 38,0
FLECHAS	0.00	5.30	6.05	6.79	FLECHAS	0.00	11.07	12.72	14.30
NA	0.00	5.42	6.20	6.96	NA	0.00	10.73	12.42	14.07
SECAO 0	0.00	5.26	6.05	6.84	SECAO 5	0.00	10.44	12.05	13.60
	0.00	5.03	5.79	6.54		0.00	9.66	11.19	12.69
(mm)	0.00	5.28	6.12	6.96	(mm)	0.00	9.35	10.94	12.52
	0.00	5.01	5.80	6.59		0.00	9.62	11.29	12.89
	0.00	4.64	5.36	6.08		0.00	8.32	9.72	11.04
FLECHAS	0.00	7.99	9.11	10.15	FLECHAS	0.00	9.59	10.96	12.43
NA	0.00	7.60	8.75	9.85	NA	0.00	9.85	11.30	12.76
SECAO 1	0.00	7.22	8.32	9.37	SECAO 6	0.00	8.77	10.14	11.59
	0.00	7.02	8.13	9.21		0.00	8.49	9.82	11.18
(mm)	0.00	7.24	8.42	9.57	(mm)	0.00	7.91	9.21	10.54
	0.00	6.77	7.90	9.01		0.00	7.90	9.22	10.58
	0.00	6.08	7.09	8.10		0.00	7.31	8.53	9.78
FLECHAS	0.00	9.98	11.37	12.63	FLECHAS	0.00	7.99	9.17	10.25
NA	0.00	10.09	11.60	13.05	NA	0.00	7.76	8.93	10.00
SECAO 2	0.00	9.50	11.30	12.60	SECAO 7	0.00	7.35	8.50	9.58
	0.00	9.00	10.41	11.73		0.00	7.21	8.31	9.35
(mm)	0.00	8.72	10.14	11.41	(mm)	0.00	6.62	7.70	8.74
	0.00	9.08	10.59	12.09		0.00	6.15	7.17	8.14
	0.00	7.61	8.90	10.22		0.00	5.69	6.65	7.58
FLECHAS	0.00	11.01	12.52	13.94	FLECHAS	0.00	4.88	5.55	6.18
NA	0.00	11.67	13.44	15.13	NA	0.00	4.95	5.68	6.38
SECAO 3	0.00	11.06	12.72	14.32	SECAO 8	0.00	4.84	5.57	6.29
	0.00	10.25	11.82	13.35		0.00	4.33	5.01	5.67
(mm)	0.00	9.87	11.42	12.91	(mm)	0.00	4.12	4.78	5.44
	0.00	10.86	12.66	14.40		0.00	3.54	4.12	4.69
	0.00	9.29	10.75	12.20		0.00	3.12	3.63	4.13
FLECHAS	0.00	12.12	13.94	15.86	FLECHAS	0.00	12.19	14.08	15.99
NA	0.00	12.19	14.08	15.99	NA	0.00	11.00	12.71	14.55
SECAO 4	0.00	11.00	12.71	14.55	SECAO 4	0.00	10.27	11.90	13.61
	0.00	10.27	11.90	13.61		0.00	10.33	12.05	13.91
(mm)	0.00	10.33	12.05	13.91	(mm)	0.00	10.95	12.79	14.64
	0.00	10.95	12.79	14.64		0.00	7.68	8.90	10.62
	0.00	7.68	8.90	10.62					

Fig. 121 a

ELASTICA DAS SECÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secao 4

Trem tipo nas vigas 2 e 6

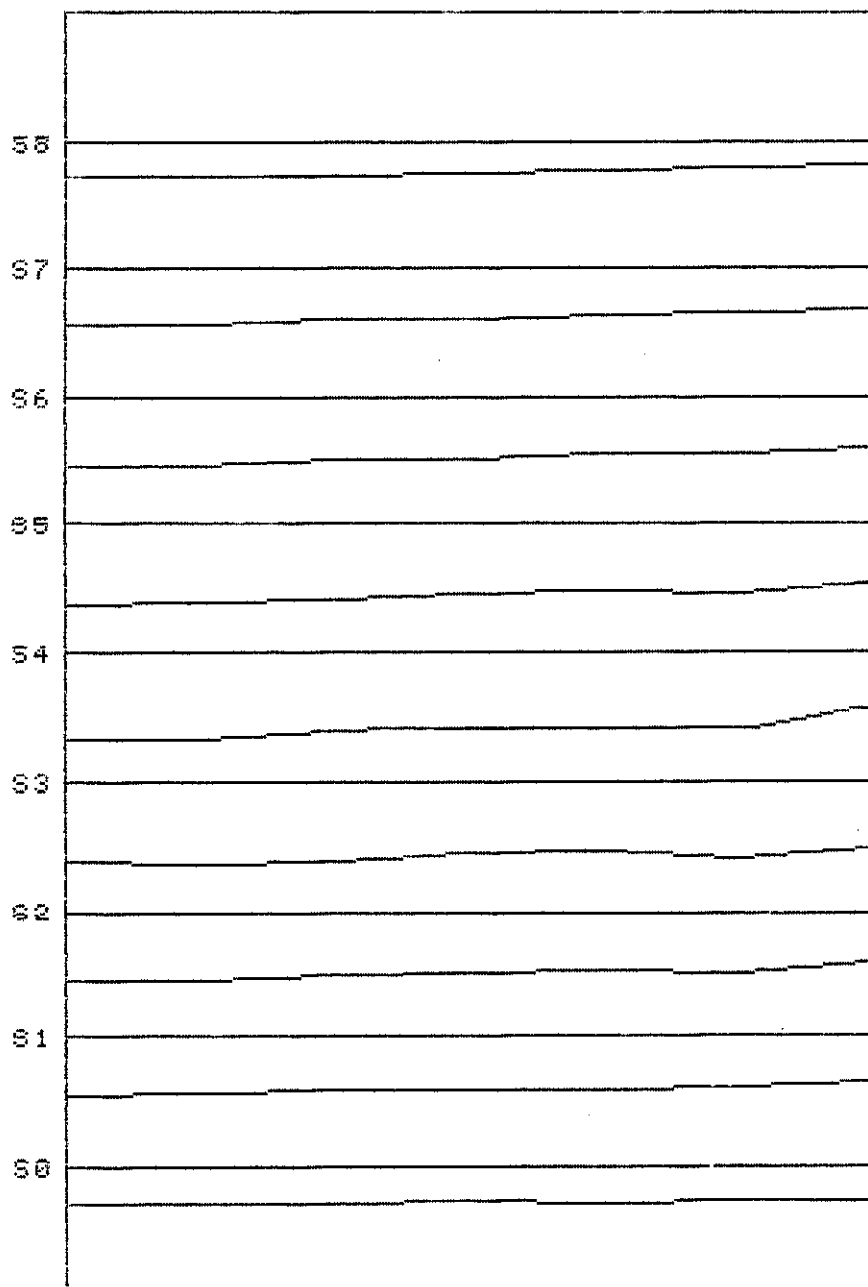


Fig. 121 b

ELASTICA DAS SECÇÕES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secção 4

Trem Tipo nas Vigas 2e 6

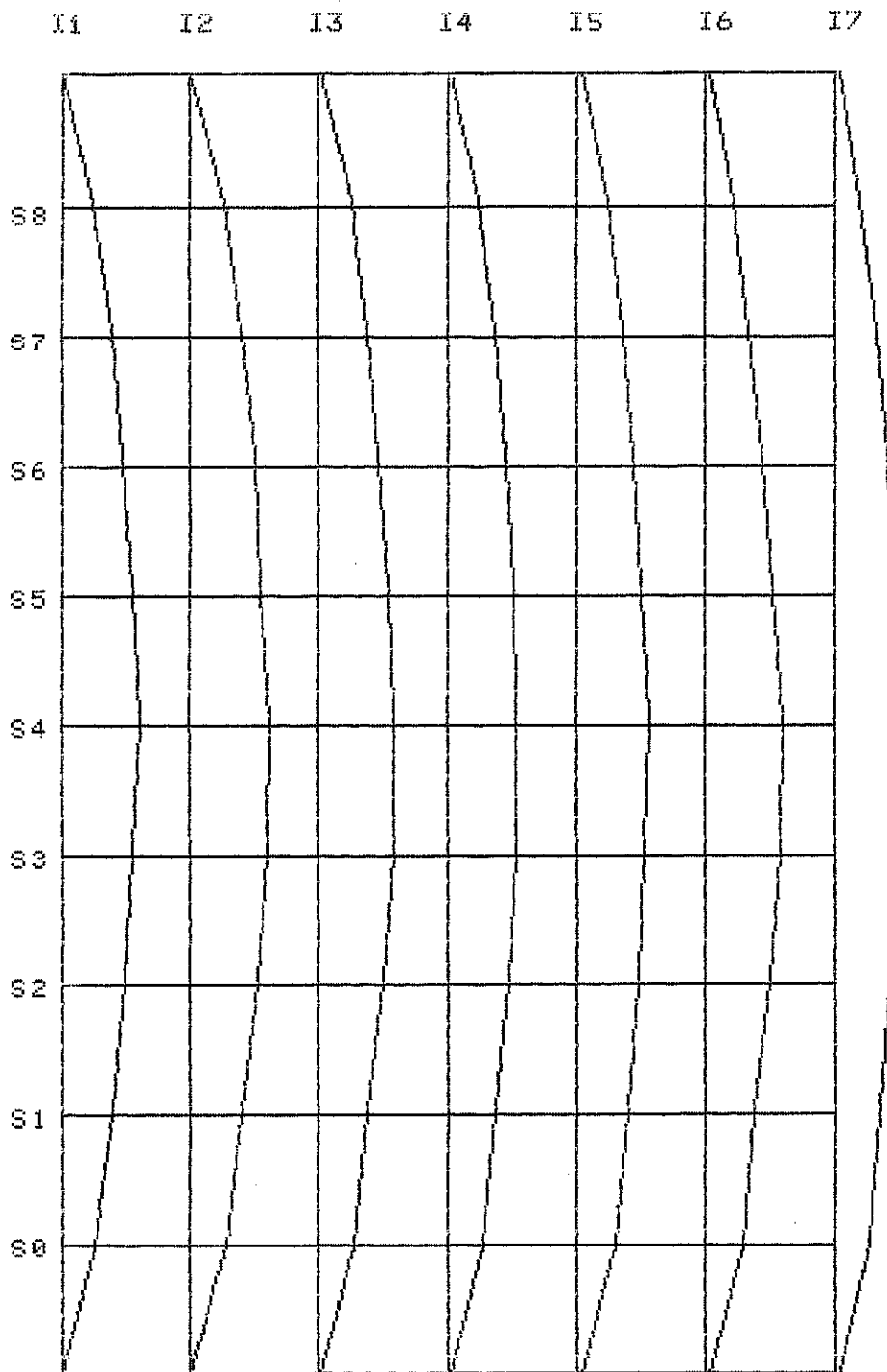


Tabela 51

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
TREM TIPO NAS VIGAS 3 E 7

	CARGA 0	CARGA 28,5	CARGA 33,25	CARGA 38,0		CARGA 0	CARGA 28,5	CARGA 33,25	CARGA 38,0-
FLECHAS	0.00	3.43	4.09	4.70	FLECHAS	0.00	8.14	9.34	10.47
NA	0.00	3.71	4.43	5.11	NA	0.00	9.02	10.43	11.81
SECAO 0	0.00	4.09	4.90	5.67	SECAO 5	0.00	10.06	11.66	13.22
(mm)	0.00	4.01	4.81	5.58	(mm)	0.00	9.66	11.21	12.72
	0.00	4.43	5.33	6.20		0.00	9.52	11.09	12.62
	0.00	4.71	5.70	6.64		0.00	10.35	12.13	13.89
	0.00	4.72	5.70	6.64		0.00	12.62	14.84	17.01
FLECHAS	0.00	5.76	6.59	7.35	FLECHAS	0.00	6.35	7.47	8.49
NA	0.00	6.41	7.39	8.32	NA	0.00	6.97	8.31	9.54
SECAO 1	0.00	6.51	7.54	8.50	SECAO 6	0.00	7.19	8.64	9.98
(mm)	0.00	6.89	8.00	9.04	(mm)	0.00	7.05	8.48	9.81
	0.00	7.34	8.54	9.66		0.00	7.34	8.70	9.99
	0.00	7.57	8.85	10.06		0.00	7.36	8.90	10.37
	0.00	8.36	9.79	11.14		0.00	8.17	9.91	11.59
FLECHAS	0.00	6.10	7.27	8.34	FLECHAS	0.00	6.54	7.45	8.35
NA	0.00	6.88	8.24	9.51	NA	0.00	6.84	7.87	8.86
SECAO 2	0.00	7.16	8.62	9.98	SECAO 7	0.00	7.17	8.30	9.40
(mm)	0.00	7.37	8.87	10.28	(mm)	0.00	6.92	8.02	9.09
	0.00	7.51	9.06	10.53		0.00	6.76	7.87	8.95
	0.00	8.49	10.29	12.01		0.00	6.91	8.06	9.17
	0.00	8.73	10.64	12.52		0.00	7.48	8.78	10.03
FLECHAS	0.00	7.87	8.99	10.01	FLECHAS	0.00	3.77	4.29	4.80
NA	0.00	9.32	10.76	12.13	NA	0.00	4.51	5.17	5.86
SECAO 3	0.00	9.99	11.55	13.04	SECAO 8	0.00	4.68	5.41	6.15
(mm)	0.00	10.21	11.86	13.42	(mm)	0.00	4.30	4.97	5.63
	0.00	9.93	11.54	13.10		0.00	4.21	4.88	5.57
	0.00	11.12	13.00	14.82		0.00	4.02	4.67	5.34
	0.00	12.49	14.63	16.75		0.00	4.15	4.84	5.54
FLECHAS	0.00	7.25	8.61	9.87					
NA	0.00	8.23	9.84	11.37					
SECAO 4	0.00	8.84	10.64	12.36					
(mm)	0.00	8.51	10.24	11.89					
	0.00	8.48	10.23	11.90					
	0.00	9.07	11.01	12.90					
	0.00	11.48	13.95	16.38					

Fig. 122 a

ELASTICA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secao 4

Trem tipo nas vigas 3 e 7

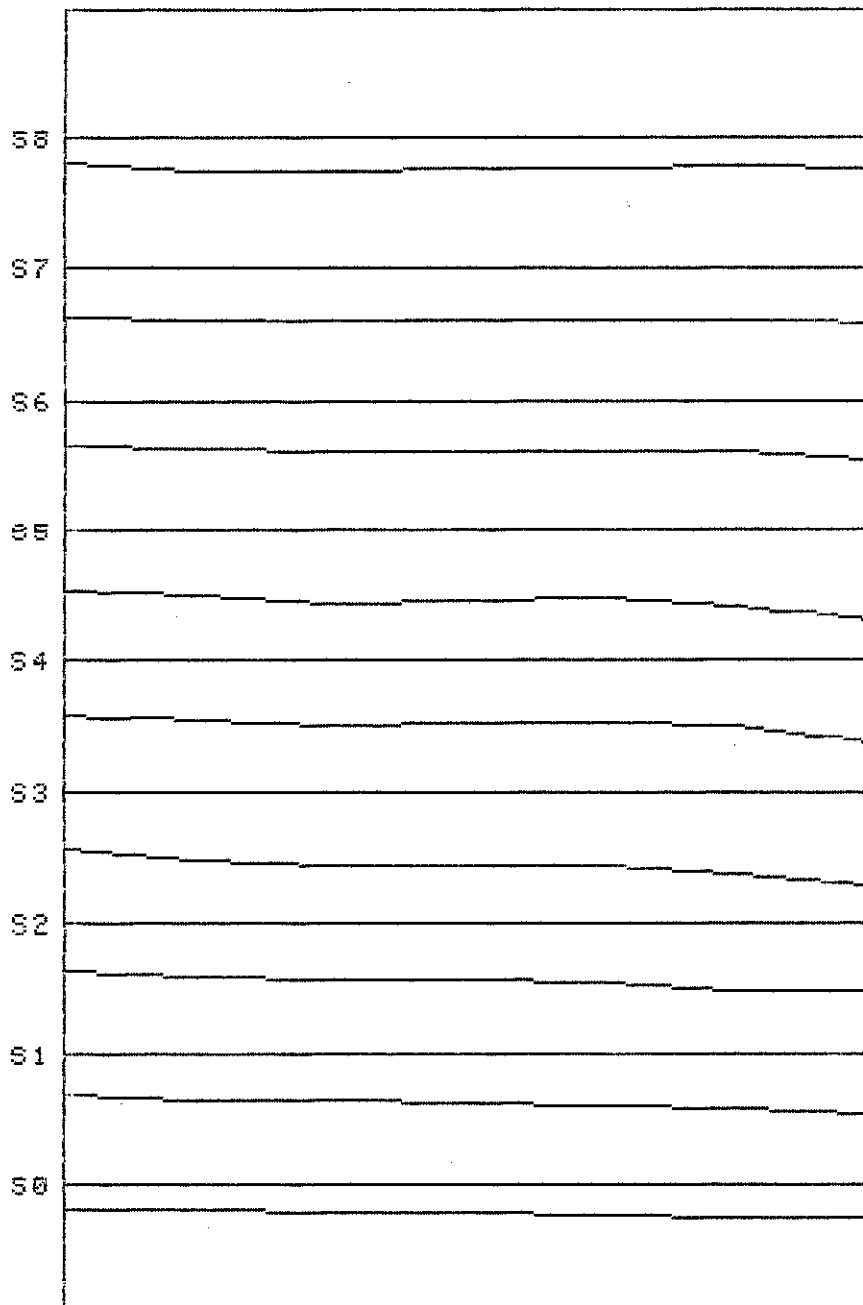
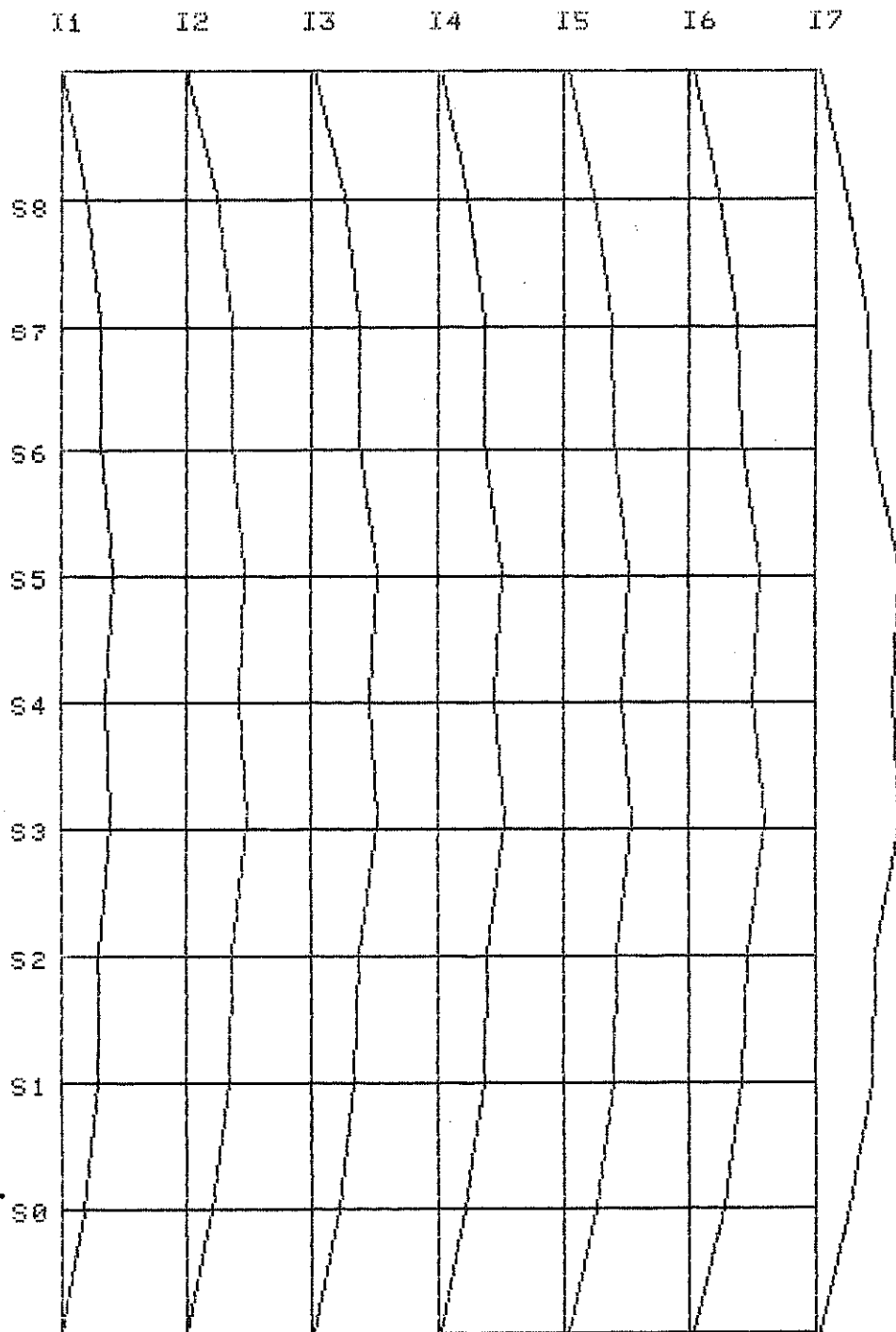


Fig. 122 b

ELASTICA DAS SECOES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secao 4.

Trem Tipo nas Vigas 3e 7



Tablea 52

CARREGAMENTO NA SECAO 4 (em KN)
TREM TIPO NAS VIGAS 1 E 5

	CARGA 0	CARGA 28,5	CARGA 33,25	CARGA 38,0		CARGA 0	CARGA 28,5	CARGA 33,25	CARGA 38,0
FLECHAS	0.00	6.33	7.17	7.99	FLECHAS	0.00	14.56	16.72	18.71
NA	0.00	5.78	6.55	7.32	NA	0.00	12.23	14.10	15.82
SECAO 0	0.00	5.50	6.26	7.05	SECAO 5	0.00	10.09	11.66	13.11
(MM)	0.00	4.83	5.53	6.26	(MM)	0.00	9.78	11.35	12.80
	0.00	4.89	5.63	6.41		0.00	8.99	10.48	11.89
	0.00	3.89	4.48	5.12		0.00	7.09	8.32	9.48
	0.00	3.11	3.58	4.08		0.00	4.71	5.45	6.11
FLECHAS	0.00	9.90	11.23	12.52	FLECHAS	0.00	12.27	13.87	15.48
NA	0.00	8.57	9.77	10.95	NA	0.00	11.25	12.79	14.34
SECAO 1	0.00	7.13	8.20	9.25	SECAO 6	0.00	9.33	10.66	12.03
(MM)	0.00	6.91	7.98	9.06	(MM)	0.00	8.62	9.91	11.23
	0.00	6.63	7.70	8.74		0.00	7.46	8.64	9.85
	0.00	5.54	6.44	7.33		0.00	6.25	7.25	8.27
	0.00	3.76	4.37	4.94		0.00	4.60	5.35	6.10
FLECHAS	0.00	12.51	14.22	15.91	FLECHAS	0.00	9.60	10.94	12.15
NA	0.00	11.50	13.11	14.74	NA	0.00	8.80	10.11	11.31
SECAO 2	0.00	9.45	10.80	12.18	SECAO 7	0.00	7.59	8.75	9.85
(MM)	0.00	8.94	10.27	11.63	(MM)	0.00	6.84	7.90	8.92
	0.00	8.48	9.78	11.14		0.00	6.01	6.98	7.92
	0.00	6.69	7.74	8.82		0.00	4.98	5.79	6.60
	0.00	4.63	5.38	6.11		0.00	3.94	4.59	5.21
FLECHAS	0.00	14.55	16.70	18.68	FLECHAS	0.00	6.00	6.82	7.60
NA	0.00	13.16	15.17	17.00	NA	0.00	5.27	6.04	6.78
SECAO 3	0.00	11.11	12.82	14.40	SECAO 8	0.00	4.95	5.69	6.39
(MM)	0.00	10.18	11.81	13.35	(MM)	0.00	4.38	5.08	5.72
	0.00	9.32	10.88	12.37		0.00	3.75	4.37	4.97
	0.00	8.07	9.45	10.74		0.00	2.99	3.49	3.97
	0.00	5.22	6.07	6.86		0.00	2.17	2.54	2.90
FLECHAS	0.00	16.32	18.58	20.85	FLECHAS	0.00	13.24	15.13	17.04
NA	0.00	13.24	15.13	17.04	NA	0.00	10.79	12.42	14.06
SECAO 4	0.00	10.79	12.42	14.06	SECAO 4	0.00	10.68	12.29	13.94
(MM)	0.00	9.87	11.41	12.99	(MM)	0.00	9.87	11.41	12.99
	0.00	8.04	9.34	10.66		0.00	8.04	9.34	10.66
	0.00	4.36	5.04	5.68		0.00	4.36	5.04	5.68

Fig. 123 a

ELASTICA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secção 4

Trem tipo nas vigas 1 e 5

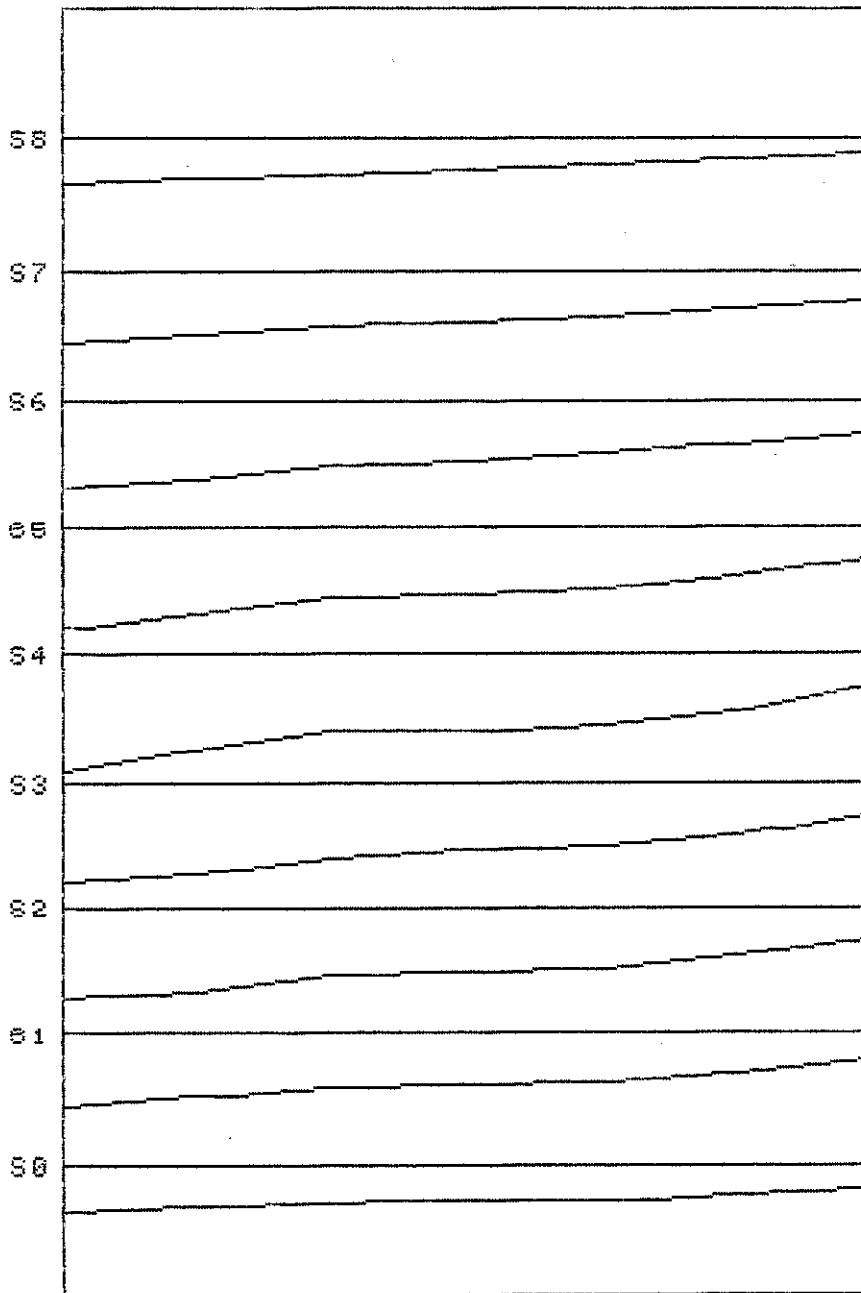


Fig. 123 b

ELASTICA DAS SECÇÕES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secção 4

Trem Tipo nas Vigas 1e 5

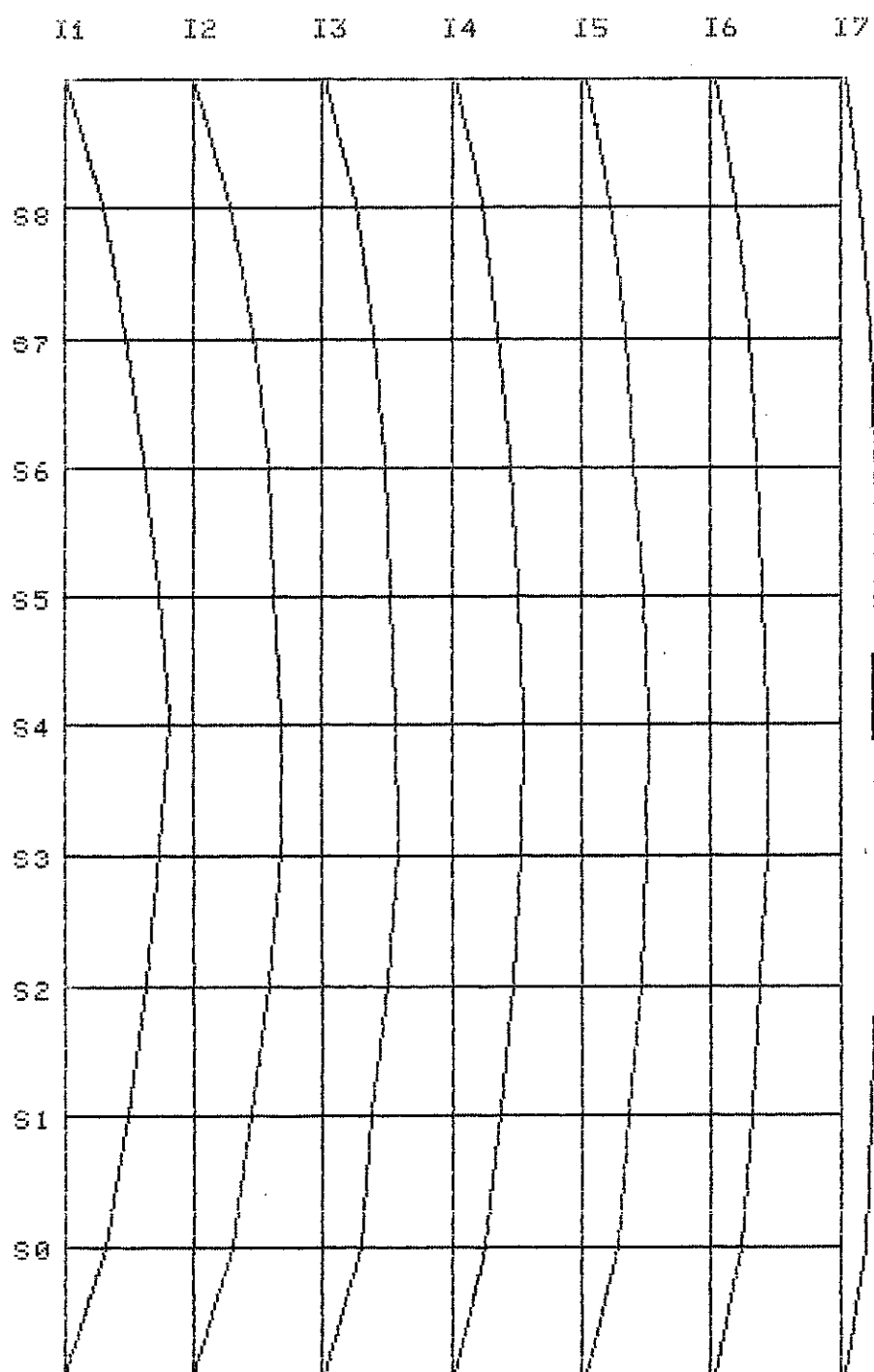


Tabela 53

CARREGAMENTO NA SECAO 2 (em KN)
TREM TIPO NAS VIGAS 2 E 6

	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA		CARGA	CARGA	CARGA	CARGA
	0	28,5	33,25	38,0		0	28,5	33,25	38,0
	0.00	6.07	6.91	7.75		0.00	8.47	9.67	10.83
FLECHAS	0.00	6.24	7.09	7.94	FLECHAS	0.00	8.39	9.58	10.75
NA	0.00	6.02	6.89	7.75	NA	0.00	8.46	9.68	10.88
SECAO 0	0.00	5.73	6.57	7.43	SECAO 5	0.00	7.74	8.90	10.05
	0.00	6.13	7.10	8.08		0.00	7.68	8.89	10.11
(MM)	0.00	6.07	7.06	8.07	(MM)	0.00	7.11	8.28	9.46
	0.00	5.27	6.11	6.98		0.00	6.69	7.81	8.94
	0.00	8.50	9.68	10.85		0.00	7.04	8.04	9.01
FLECHAS	0.00	8.96	10.18	11.39	FLECHAS	0.00	7.49	8.54	9.57
NA	0.00	7.68	8.81	9.93	NA	0.00	7.02	8.05	9.07
SECAO 1	0.00	7.54	8.69	9.86	SECAO 6	0.00	6.50	7.47	8.44
	0.00	8.05	9.33	10.62		0.00	6.05	7.02	7.99
(MM)	0.00	7.96	9.27	10.60	(MM)	0.00	5.79	6.75	7.71
	0.00	6.57	7.67	8.77		0.00	5.43	6.32	7.23
	0.00	9.84	11.24	12.62		0.00	5.88	6.68	7.46
FLECHAS	0.00	11.16	12.77	14.35	FLECHAS	0.00	5.85	6.65	7.44
NA	0.00	9.44	10.82	12.17	NA	0.00	5.46	6.24	7.01
SECAO 2	0.00	9.03	10.42	11.80	SECAO 7	0.00	5.15	5.91	6.65
	0.00	9.06	10.54	12.02		0.00	4.66	5.40	6.14
(MM)	0.00	9.79	11.43	13.08	(MM)	0.00	4.53	5.24	5.96
	0.00	7.62	8.93	10.24		0.00	4.09	4.74	5.42
	0.00	10.37	11.82	13.25		0.00	3.72	4.23	4.73
FLECHAS	0.00	11.00	12.54	14.06	FLECHAS	0.00	3.54	4.02	4.51
NA	0.00	9.69	11.12	12.54	NA	0.00	3.44	3.92	4.43
SECAO 3	0.00	9.33	10.74	12.14	SECAO 8	0.00	3.16	3.62	4.09
	0.00	9.40	10.91	12.45		0.00	3.11	3.59	4.13
(MM)	0.00	9.80	11.41	13.04	(MM)	0.00	2.52	2.92	3.34
	0.00	7.70	9.00	10.32		0.00	2.27	2.65	3.06
	0.00	9.92	11.37	12.81					
FLECHAS	0.00	9.78	11.25	12.67					
NA	0.00	9.13	10.52	11.91					
SECAO 4	0.00	8.66	10.02	11.35					
	0.00	8.68	10.14	11.59					
(MM)	0.00	8.10	9.50	10.92					
	0.00	7.50	8.81	10.11					

Fig. 124 a

ELASTICA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

Carregamento na Secção 2

Trem tipo nas vigas 2 e 6

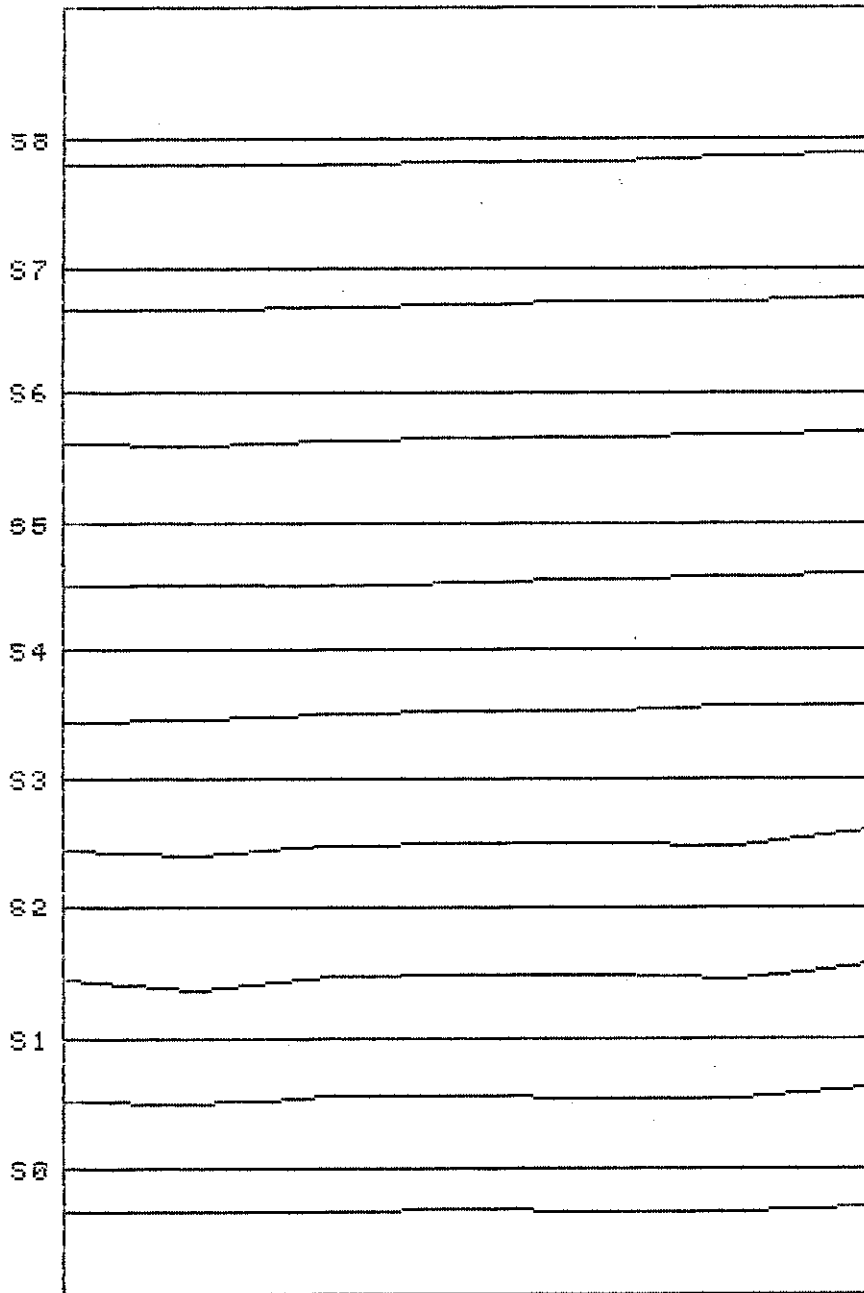
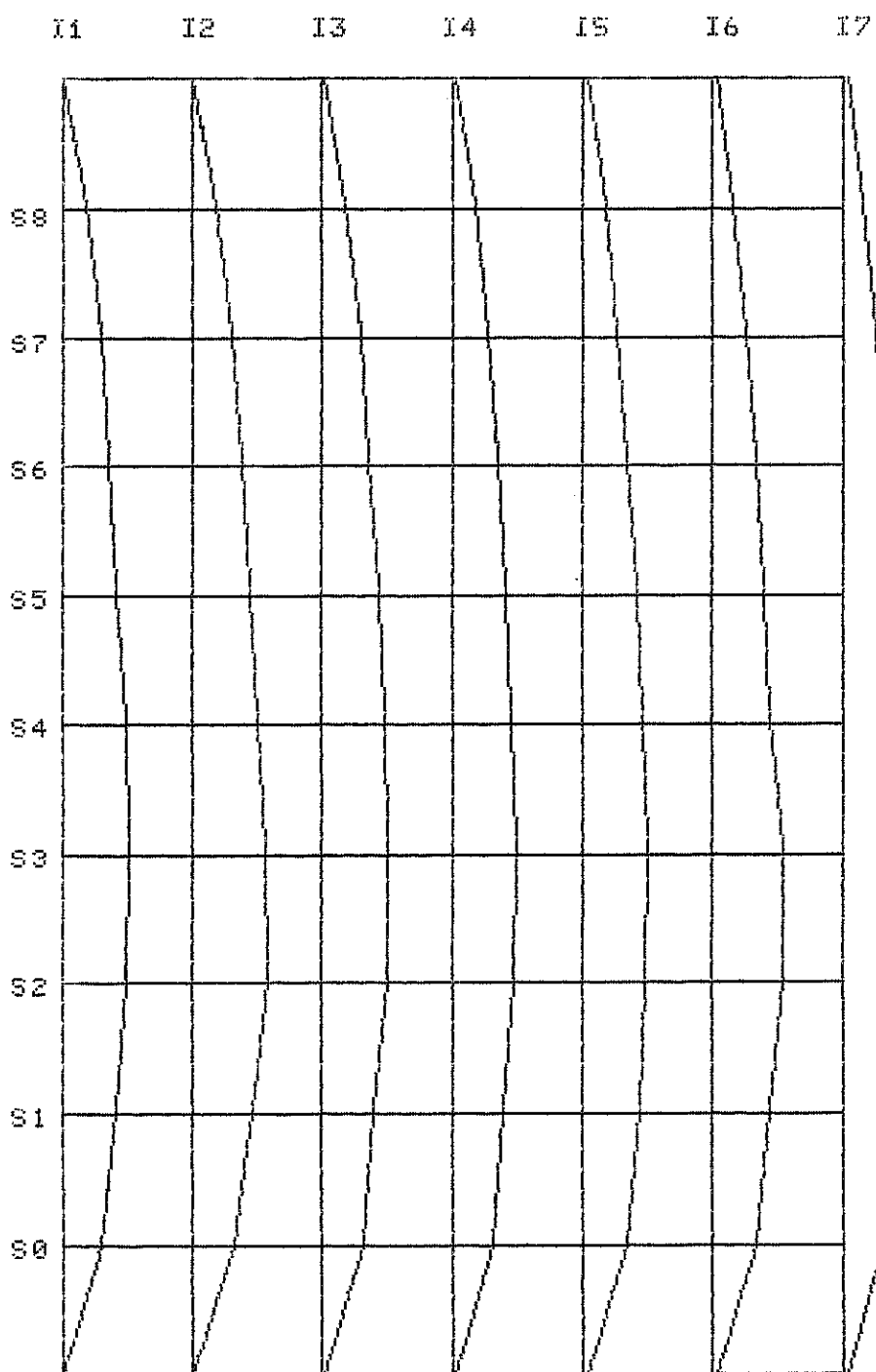


Fig. 124 b

ELASTICA DAS SECÇÕES LONGITUDINAIS

Carregamento na Secção 2

Trem Tipo nas Vigas 2e 6



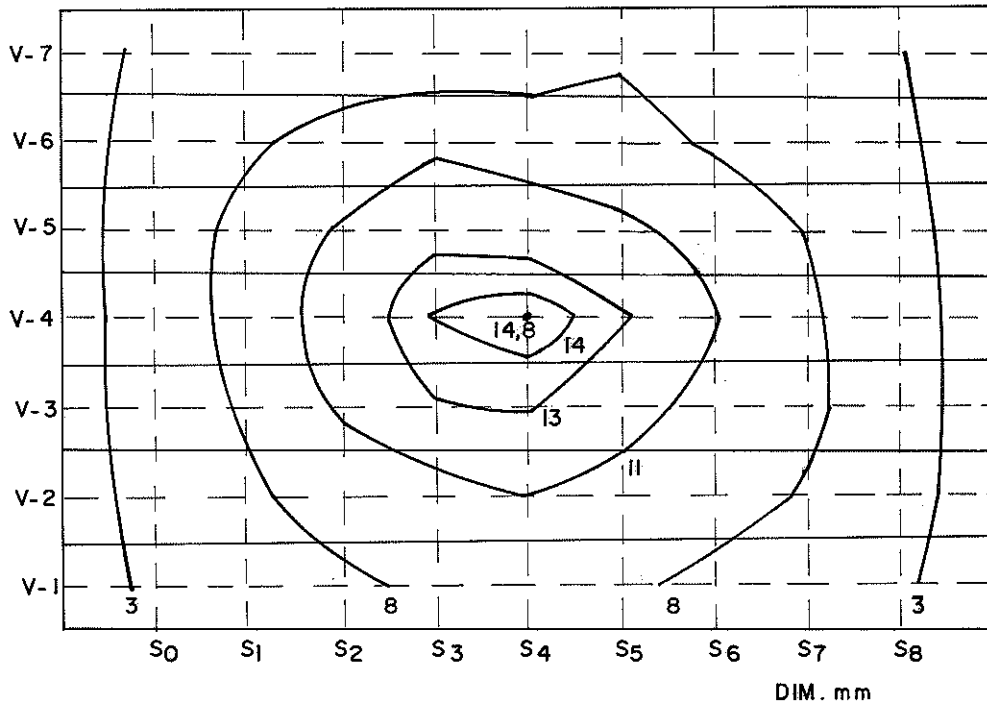


Fig. 125-Representação das curvas de nível (seção nervurada). Carregamento concentrado 28,5 KN na viga 4.

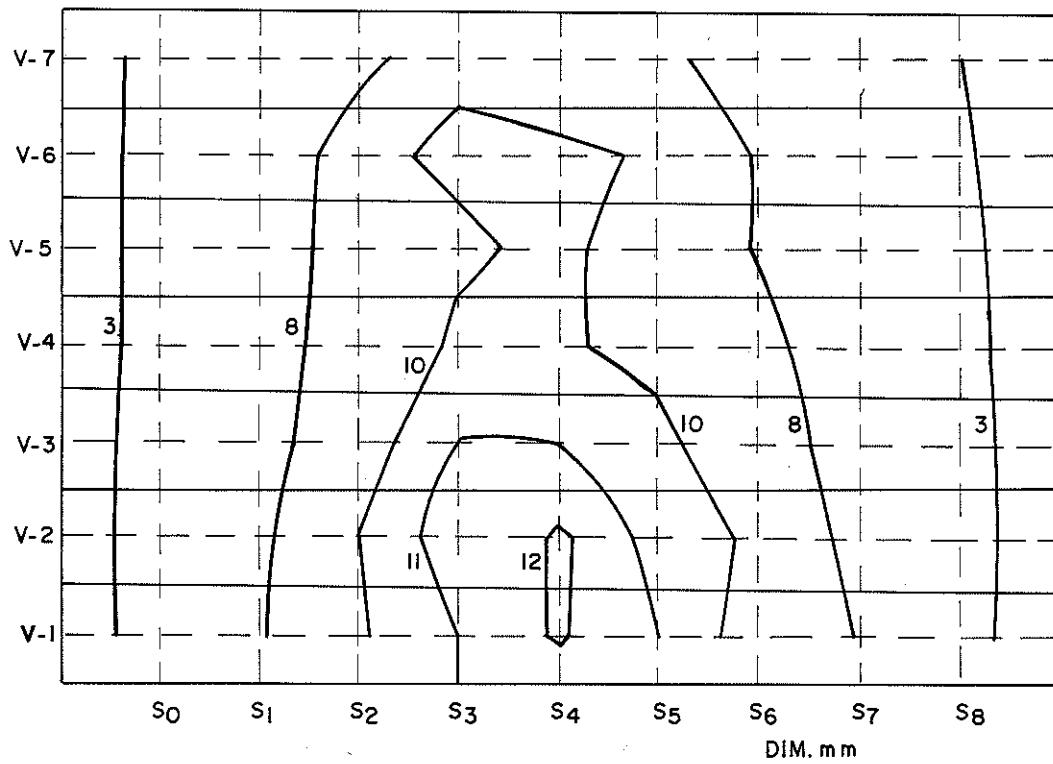


Fig. 126-Representação das curvas de nível (seção nervurada). Carregamento de 28,5 KN do trem-tipo centrado (rodas nas vigas 2 e 6).

5.6- ANÁLISE PRELIMINAR DO MODELO DE SEÇÃO SIMPLES E DE SEÇÃO NERVURADA

No modelo de seção simples, com carregamento concentrado de 14,25 KN, na viga 4, pode-se observar a boa distribuição de carga para as vigas vizinhas, através dos anéis metálicos. A média das flechas das vigas da borda é aproximadamente 80% da flecha da viga central. Fig. 127.

No modelo de seção nervurada, com carregamento concentrado de 28,50 KN, a distribuição não é equivalente às do modelo de seção simples, pois com o aumento da rigidez longitudinal, as flechas maiores concentram-se perto do carregamento. A média das flechas das vigas da borda, correspondente a 50% da flecha na viga central. Fig. 127.

Com o trem-tipo centrado, o modelo de seção simples apresenta a elástica transversal mais uniforme que a do modelo de seção nervurada, devido à rigidez das vigas. Fig. 127.

Para se obter uma mesma flecha, nos dois modelos, com carregamento do trem-tipo centrado, o modelo de seção nervurada suportou uma carga de 2,68 vezes a aplicada no modelo de seção simples, aproximadamente metade da prevista.

Nestas condições evidencia-se que neste ensaio a rigidez das vigas bicirculares não foi totalmente utilizadas, provavelmente devido tanto à configuração geométrica da seção como ao enfraquecimento da seção dos postes pela instalação dos anéis de ligação lateral.

5.7- RUPTURA DO MODELO

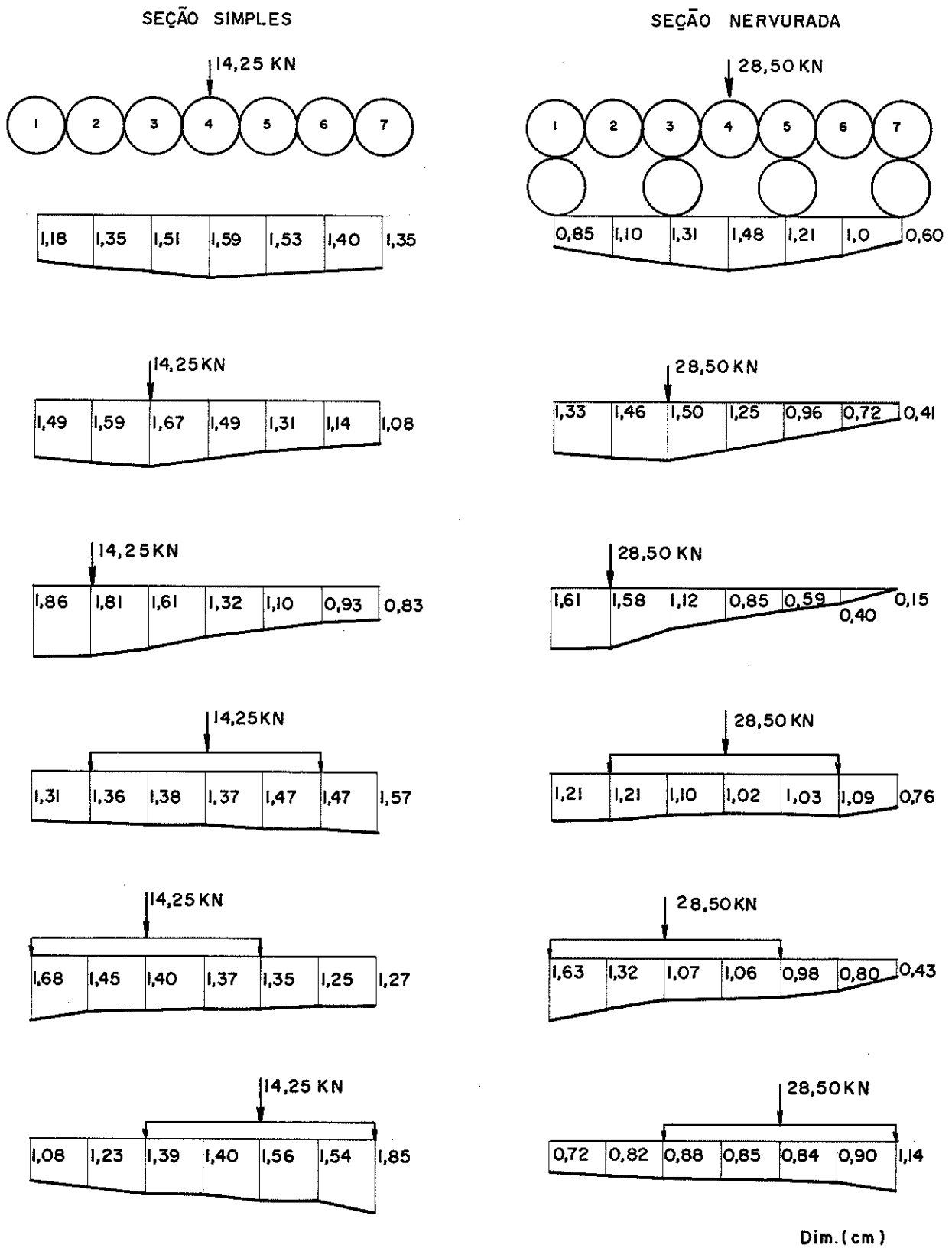
No ensaio final do modelo, regularizou-se uma faixa de 0,5 m, na seção transversal central com argamassa.

Colocou-se o trem-tipo centrado no modelo, e fez-se o carregamento lendo as flechas, em dois relógios comparadores de centésimo de milímetro, instalados sob as vigas 1 e 7.

Fêz-se o carregamento de 11,96 em 11,96 KN, lendo as flechas nos dois relógios comparadores, chegando-se até 119,6 KN de carga, com flechas três vezes superiores à admissível. Fig. 128.

Fig. 127

ENSAIOS DOS MODELOS



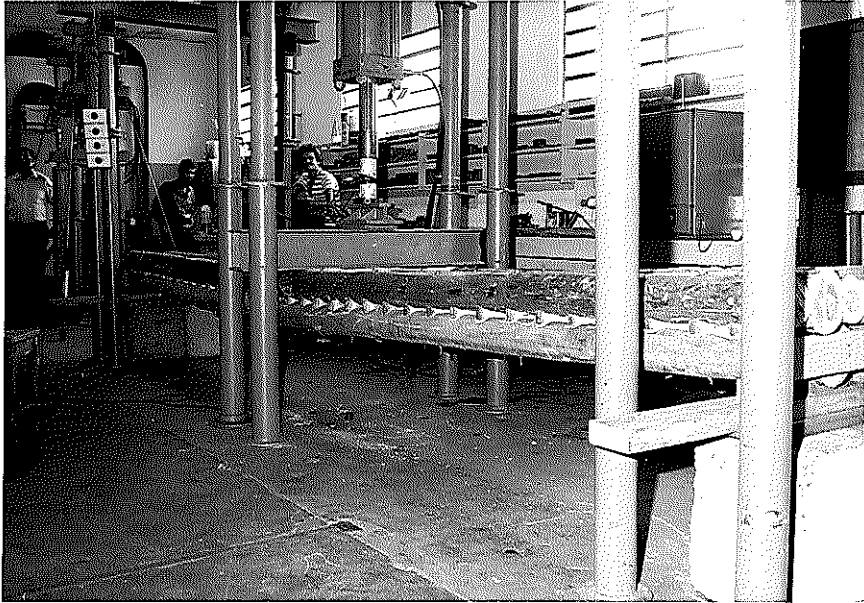


Fig.128-Ensaio de ruptura do modelo

A tabela 54 apresenta o resultado do ensaio.

Tabela - 54 -

Carga KN	Flechas (mm)	
	Relógio 1	Relógio 2
0	0	0
11,96	4,9	3,1
23,92	9,6	7,1
35,88	14,1	11,0
47,48	18,3	14,9
59,80	22,2	18,4
71,76	26,3	22,0
83,72	30,1	25,4
95,68	34,1	28,8
107,64	38,8	32,1
119,6	42,8	35,5

Iniciou-se o carregamento para a ruptura do modelo, mas ,
chegando-se a uma carga de 300 KN e uma flecha de aproximadamente

27 cm, já no limite da curso do pistão do cilindro hidráulico. Des carregando-se o modelo, recuperou-se quase totalmente a flecha e evidenciou-se um início de esmagamento na viga l. Fig. 129.

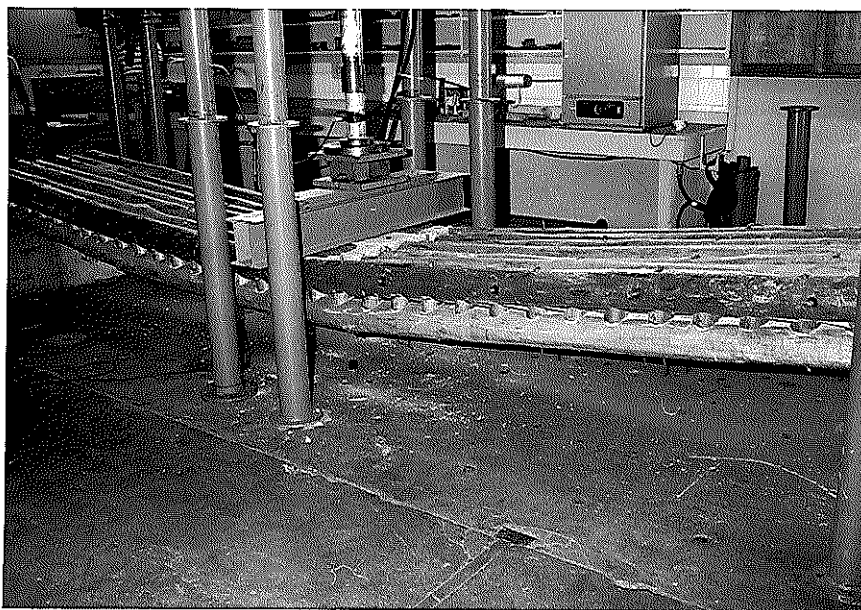


Fig.129-Ensaio de ruptura - flecha de 27 cm

Reiniciando-se o ensaio o modelo começou a entrar em fase de ruptura com uma carga 327,7 KN e uma flecha de aproximadamente 30,0 cm, Fig.130.

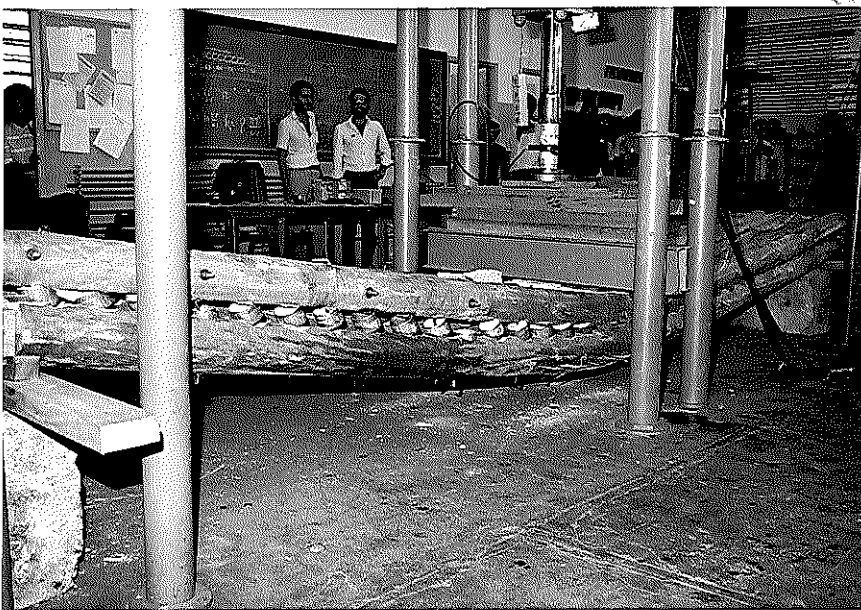


Fig.130-Ruptura do modelo

Os anéis das vigas bicirculares, torceram-se perto das extremidades das vigas, cisalhando a madeira na sua parte interna.

A parte inferior das vigas bicirculares e das vigas simples apresentou ruptura típica de tração, e na parte superior, algumas apresentaram esmagamento devido à compressão. Fig. 131.

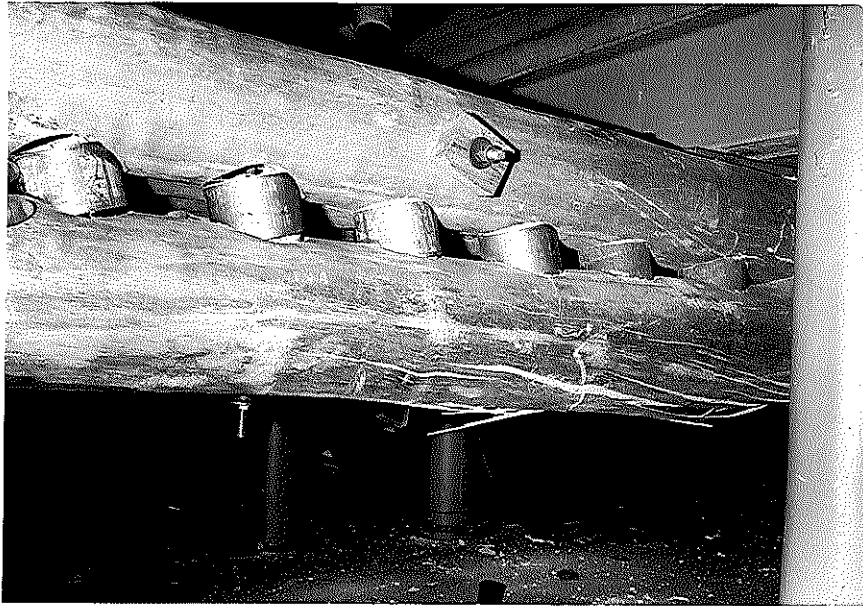


Fig. 131 - Ruptura por tração e por compressão na flexão

5.7.1- Análise do ensaio de ruptura do modelo

A recuperação quase completa do modelo, depois de ter atingido a flecha de 27 cm, demonstra grande elasticidade do conjunto.

A flecha central lida na fase final de ruptura, 30 cm, equivale a vinte e uma vezes a flecha admissível.

A carga de ruptura do modelo de 327,7 KN, corresponde, no protótipo, a um carregamento igual a 5243,2 KN. Esta carga é, aproximadamente, dez vezes a carga acidental prevista para a ponte.

O cálculo simplificado da ponte, apresentou resultados superiores aos obtidos nos ensaios do modelo.

6- INVESTIGAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

6.1- INTRODUÇÃO

Os resultados dos ensaios dos modelos constituídos por vigas retangulares ou por postes, interligados lateralmente por anéis metálicos, evidenciaram excelentes distribuições transversais de carga.

O desconhecimento do comportamento e da rigidez dos anéis metálicos na distribuição da carga de uma viga composta, para outra, tornou necessária a investigação de um modelo matemático adaptado à este tipo de estrutura.

A idéia inicial foi de um modelo matemático baseado na teoria de placas. Mas a heterogeneidade e a descontinuidade do conjunto, bem como o desconhecimento do parâmetro fundamental, o coeficiente de Poisson (ν) da madeira, dificultou a investigação neste sentido.

Optou-se pela teoria de grelha na elaboração do modelo matemático, por ser um modelo mais simples, permitindo a análise com dois materiais diferentes: a madeira e o aço.

6.2- ANÁLISE TEÓRICA DA PONTE PELA ANALOGIA DE GRELHA

Os modelos experimentais podem ser representados teoricamente por um modelo como grelha: cada viga da ponte é representada por um modelo longitudinal da grelha, tendo suas características de rigidez à flexão e à torção bem definidas.

O comportamento real das ligações por anéis metálicos neste tipo de estrutura é de difícil definição, sendo necessária a adoção de algumas hipóteses simplificadoras com o objetivo de equacionar-se o emprego.

Em primeiro lugar, considera-se que as ligações, entre as vigas longitudinais, constituídas por anéis metálicos, não oferecem resistência ao deslocamento devido à torção (ou à flexão das vigas principais). Estas ligações têm capacidade de absorver esforços cortantes e possui baixa rigidez à flexão. Desta forma os anéis metálicos representam os elementos transversais da grelha, com rigidez à torção nula e rigidez à flexão, determinada por tentativas, através de comparação entre os resultados teóricos e os

resultados experimentais obtidos.

No Departamento de Estruturas da EESC, foi desenvolvido, para microcomputador, um programa para Análise de Sistemas Estruturais Reticulados - Análise de Grelhas (22)

A disponibilidade deste programa, facilitou a investigação do comportamento teórico dos anéis metálicos, utilizados nos modelos experimentais.

6.2.1- Modelo composto por 19 vigas retangulares

Representando-se o modelo composto por 19 vigas como uma grelha biapoiada, tem-se as vigas do modelo como sendo os elementos longitudinais da grelha e os anéis metálicos como os elementos transversais.

Considerou-se o comprimento de cada barra longitudinal igual à distância entre as linhas de anéis.

O programa de grelhas considera as transversinas engastadas nas longarinas. Na realidade o comportamento do anel metálico é muito complexo. Procurou-se compatibilizar este comportamento com o programa de grelha, para isto admitiu-se um comprimento fictício para o anel, tentando assim padronizá-lo também para os modelos com postes.

Para as barras transversais (anéis metálicos) admitiu-se o comprimento fictício igual à distância de centro a centro das barras longitudinais.

No modelo constituído por 19 vigas, o comprimento fictício será igual a 6,0cm, ou seja, espessura da viga de Peroba Rosa.

A fig.132 apresenta metade do modelo esquematizada como grelha, com as características das barras utilizadas no programa de cálculo.

As propriedades dos materiais inseridos como dados no programa foram as da madeira e do aço utilizado no modelo experimental.

Lahr (23) e Mascia (24) desenvolveram um estudo para determinar o módulo de elasticidade transversal (G) da Peroba Rosa, em peças de seções quadradas e retangulares, a partir de ensaios de flexão simples, obtendo para G o valor 400 MPa.

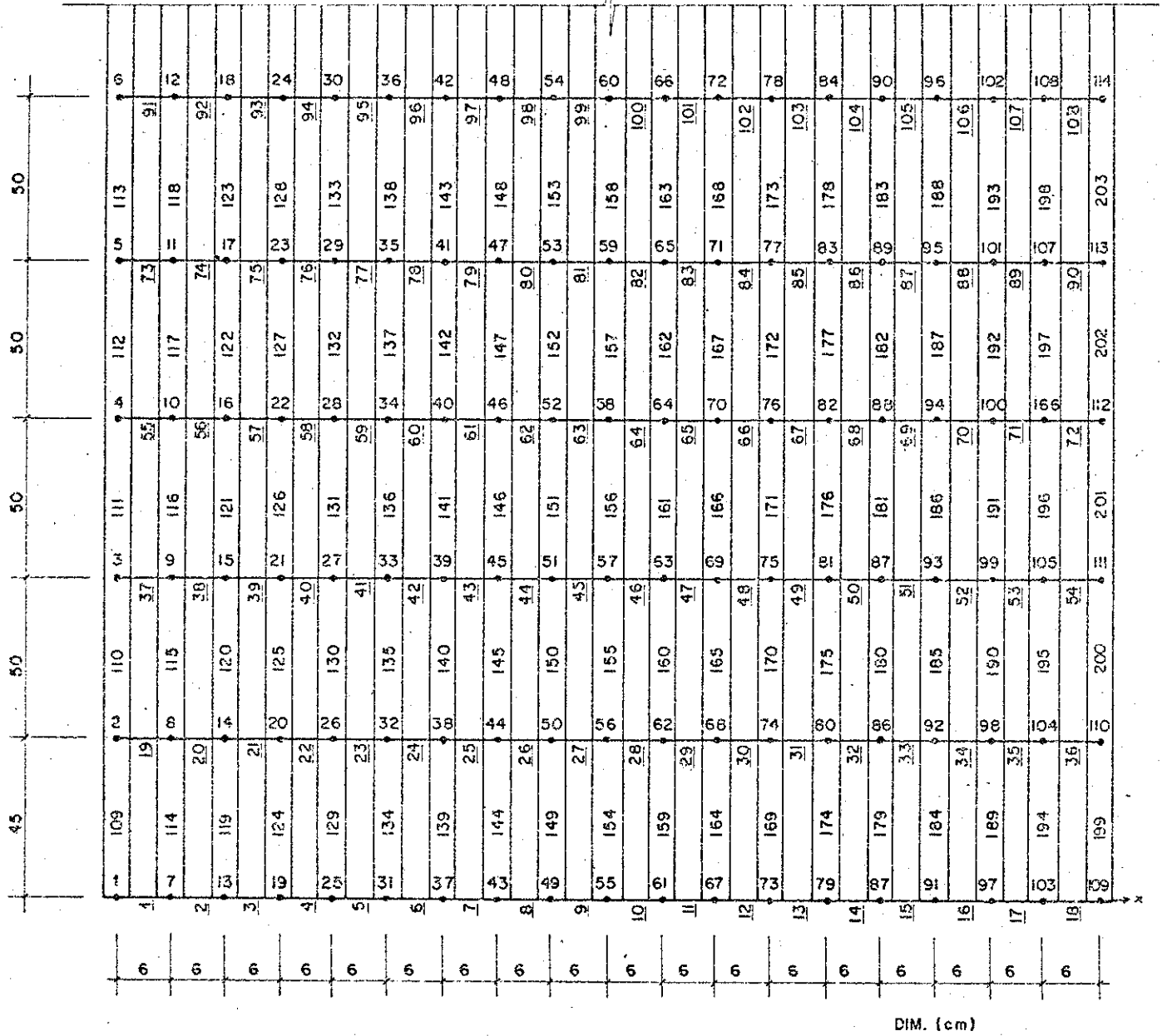


Fig. 132- Esquema do modelo como grelha

PROPRIEDADE DOS MATERIAIS:

Madeira: (Peroba Rosa)

Módulo de elasticidade longitudinal: $E = 11000 \text{ MPa}$

Módulo de elasticidade transversal: $G = 400 \text{ MPa}$

Peso específico: $\gamma = 0,0076 \text{ N/cm}^3$

Aço: (Anéis Metálicos)

Módulo de elasticidade longitudinal: $E = 210000 \text{ MPa}$

Módulo de elasticidade transversal: $G = 80000 \text{ MPa}$

Peso específico: $\gamma = 0,077 \text{ N/cm}^3$

PROPRIEDADES DAS BARRAS:

Longarinas (vigas de Madeira)

Seção 6x16cm Área = 96cm²

Momento de inércia à flexão: $I = 2048 \text{ cm}^4$

Momento de inércia à torção: $I_t = 3456 \text{ cm}^4$

Transversais (Anéis Metálicos)

Diâmetro 2 1/2" Área = 4,09cm²

Momento de inércia à torção: $I_t = 0$

Momento de inércia à flexão: $I = ?$

A rigidez das transversinas (anéis metálicos) será determinada através de tentativas, atribuindo-se valores para o momento de inércia à flexão dos anéis metálicos e comparando os resultados das flechas nas seções transversais obtidas no programa de grelha com as do modelo experimental, para um mesmo carregamento.

Após várias tentativas, o valor mais confiável encontrado para o momento de inércia à flexão do anel metálico foi $I = 2 \text{ cm}^4$, figura 133.

Conhecendo-se as propriedades das barras e dos materiais, para utilizar o programa de grelha, atribuíram-se carregamentos semelhantes aos do modelo experimental, obtendo-se assim os deslocamentos nodais (flechas) em pontos desejados, os esforços nas extremidades das barras e as reações de apoio nas vigas.

A tabela 55 apresenta as flechas nos nós na seção transversal central, obtidas através do programa de grelha e dos ensaios experimentais para uma carga concentrada de 19KN aplicada no nó 60.

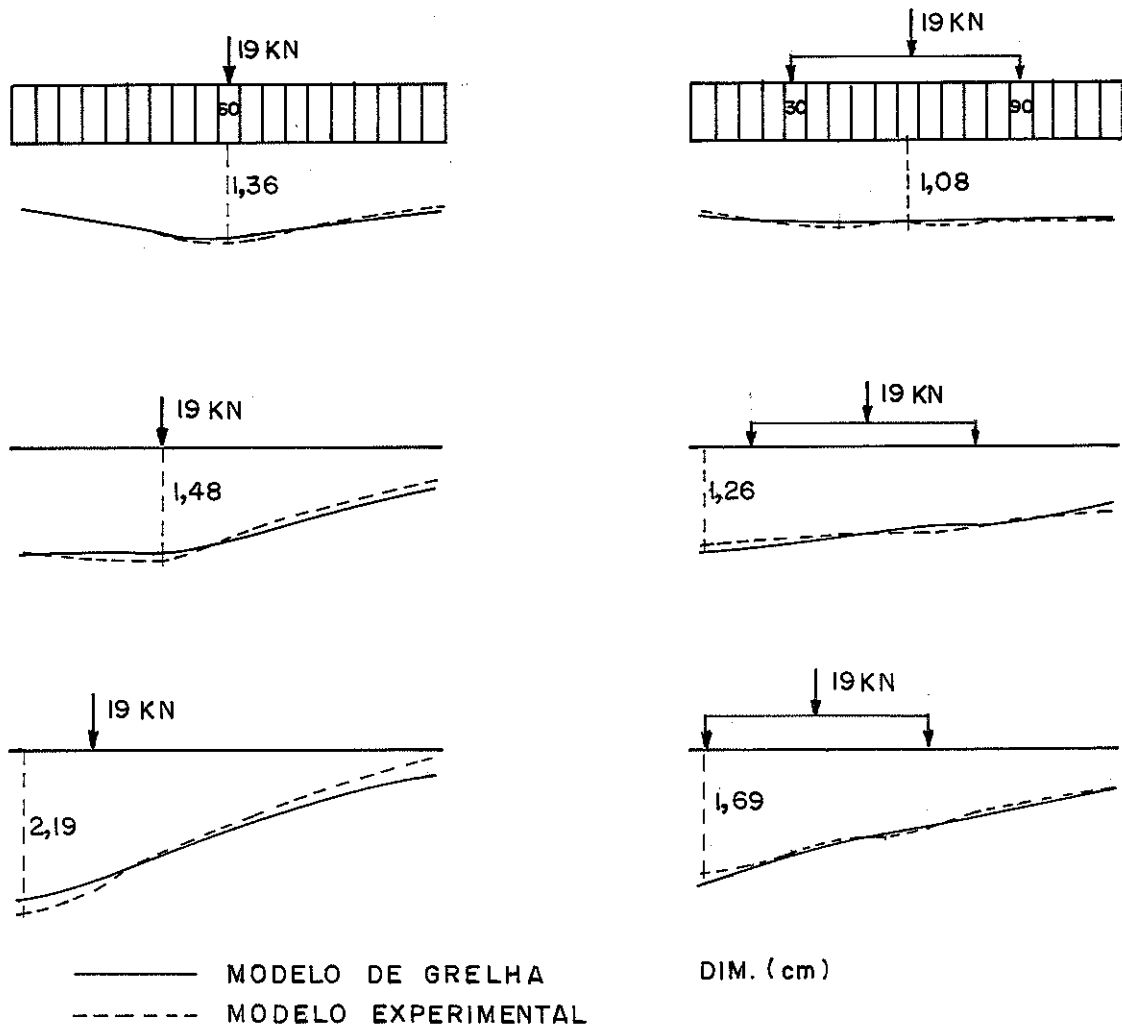


Fig. 133- Elásticas na seção transversal central

Tabela 55

Nó	Flechas nos modelos (cm)	
	Grelha	Experimental
6	0,88	0,86
12	0,92	
18	0,97	0,99
24	1,02	
30	1,07	1,07
36	1,13	
42	1,18	1,17
48	1,22	
54	1,26	1,30
60	1,28	1,36
66	1,26	1,24
72	1,22	
78	1,18	1,17
84	1,13	
90	1,07	1,08
96	1,02	
102	0,97	0,96
108	0,92	
114	0,88	0,83

Na tabela 56 são apresentados os esforços nas extremidades das barras das longarinas, para o carregamento concentrado de 19KN aplicado no nó 60.

Tabela 56

Barra	Nó	Cortante N	Momento Fletor (N.cm)	Momento Torçor (N.cm)
113	5 6	62,2	78940 82050	1546
118	11 12	120	82900 88900	1518
123	17 18	156	87612 95461	1590
128	23 24	190	92919 102449	1773
133	29 30	237	98708 110592	2066
138	35 36	322	104670 120776	2491
143	41 42	491	109835 134405	3070
148	47 48	830	111943 153469	3701
153	53 54	1401	108100 178197	3632
158	59 60	1873	101942 195624	0,68

A tabela 57 apresenta os esforços nas extremidades das barras das transversinas, para o carregamento concentrado de 19KN aplicado ao nó 60.

Tabela 57

Barra	NÓ	Cortante N	Momento Fletor (N.cm)	Momento Torçor (N.cm)
91	6 12	62	- 1546 - 1174	0
92	12 18	181	- 2693 - 1601	0
93	18 24	339	- 3191 - 1157	0
94	24 30	530	- 2929 - 250	0
95	30 36	768	- 1817 - 2792	0
96	36 42	1090	302 6842	0
97	42 48	1581	3773 13263	0
98	48 54	2411	9563 24033	0
99	54 60	3813	20402 43281	0

A tabela 58 apresenta as reações nos apoios, para a carga con centrada de 19KN aplicada no nó 60.

Tabela 58

NÓ	Reação de Apoio (N)	NÓ	Reação de Apoio (N)
1	- 1087	6	634
2	1229	7	667
3	343	8	699
4	602	9	718
5	580	10	726

Os resultados dos programas de grelha com carregamento simulando um trem-tipo de duas rodas (apenas um eixo) são apresentados a seguir

A tab. 59 mostra as flechas na seção transversal central, comparando-se àquelas obtidas da análise teórica com as dos ensaios experimentais, com carregamento trem-tipo de 9,5KN em cada roda situada nos nós 30 e 90.

Tabela 59

Nó	Flechas nos modelos (cm)	
	Grelha	Experimental
6	1,06	0,96
12	1,07	
18	1,08	1,04
24	1,1	
30	1,1	1,09
36	1,1	
42	1,09	1,11
48	1,08	
54	1,08	1,08
60	1,07	
66	1,08	1,09
72	1,08	
78	1,09	1,06
84	1,1	
90	1,1	1,09
96	1,1	
102	1,08	1,02
108	1,07	
114	1,06	1,02

A tabela 60 apresenta os esforços nas extremidades das barras das longarinas, para o carregamento do trem-tipo de 9,5KN em cada roda sobre os nós 30 e 90.

Tabela 60

Barra	Nó	Cortante N	Momento Fletor (N.cm)	Momento Torçor (N.cm)
113	5 6	212	97554 108151	1087
118	11 12	322	98449 114578	1277
123	17 18	494	98452 123180	1615
128	23 24	775	95963 134734	1682
133	29 30	1006	92778 143110	6,7
138	35 36	768	96249 134693	- 1645
143	41 42	484	99103 123345	- 1500
148	47 48	321	99558 115628	- 987
153	53 54	248	99092 111535	- 475
158	59 60	229	98822 110278	0,7

A tabela 61 apresenta as reações nos apoios, para o carregamento com o trem-tipo. A carga de cada roda é de 9,5KN.

Tabela 61

Nó	Reação de Apoio (N)
1	271
7	628
13	492
19	527
25	518

Nó	Reação de Apoio (N)
31	518
37	515
43	512
49	511
55	510

A tabela 62 apresenta os esforços nas extremidades das barras das transversinas, para o carregamento do trem-tipo de 9,5KN em cada roda sobre os nós 30 e 90.

Tabela 62

Barra	Nó	Cortante	Momento Fletor
91	6	212	- 1088
	12		187
92	12	534	- 1090
	18		2118
93	18	1029	501
	24		6681
94	24	1805	4998
	30		15830
95	30	- 1938	15824
	36		4196
96	36	- 1169	5846
	42		- 1169
97	42	- 683	332
	48		- 3771
98	48	- 363	- 2782
	54		- 4961
99	54	- 114	- 4484
	60		- 5170

As figuras 134, 135, apresentam os diagramas dos momentos fletores e dos esforços cortantes respectivamente, em um quarto do modelo, com carregamento concentrado no nó 60, de 19KN.

As figuras 136, 137, apresentam os diagramas dos momentos fletores e dos esforços cortantes respectivamente, em um quarto do modelo, com carregamento do trem-tipo (não centrado) de 9,5KN em cada roda sobre os nós 18 e 78.

Os resultados teóricos obtidos através do modelo de grelha, demonstram claramente a distribuição dos esforços de uma viga para outra, através da ligação por anéis metálicos. O comprimento fictício atribuído para o anel e seu engastamento nas longarinas, representa satisfatoriamente o seu comportamento no modelo experimental.

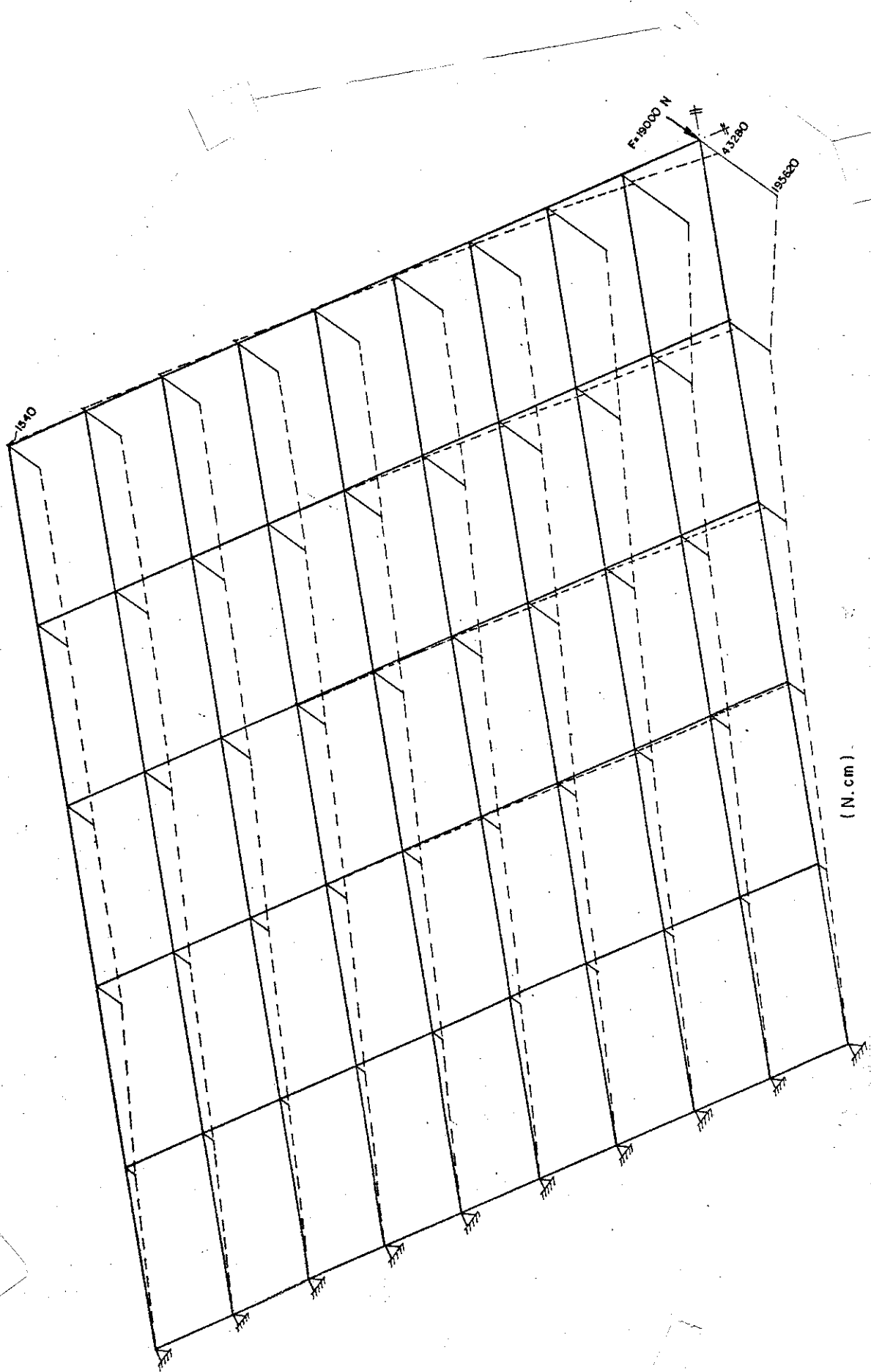


Fig. 134- Diagrama dos momentos fletores - Carga concentrada

(N.cm)

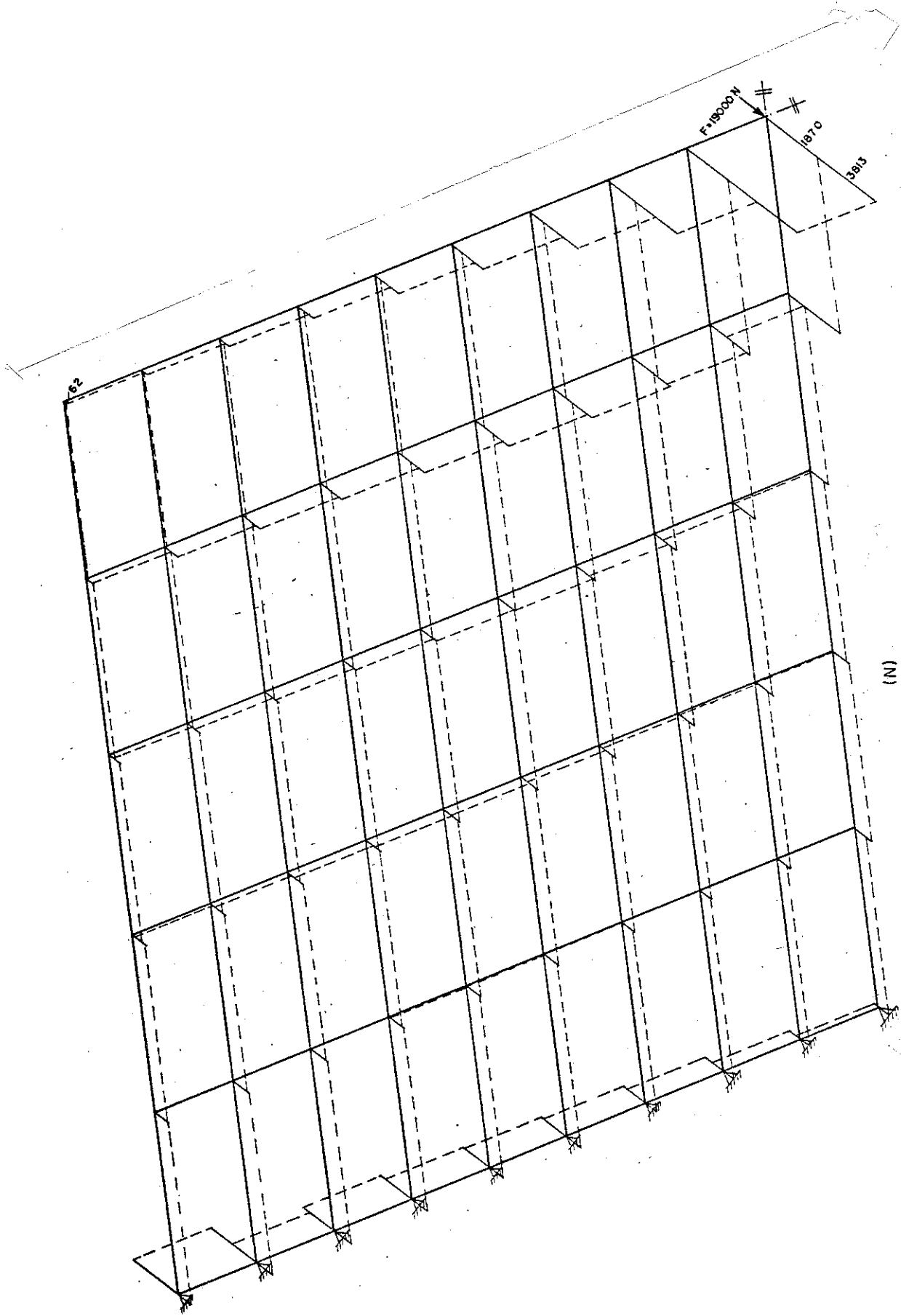


Fig. 135- Diagramas dos esforços cortantes - Carga Concentrada

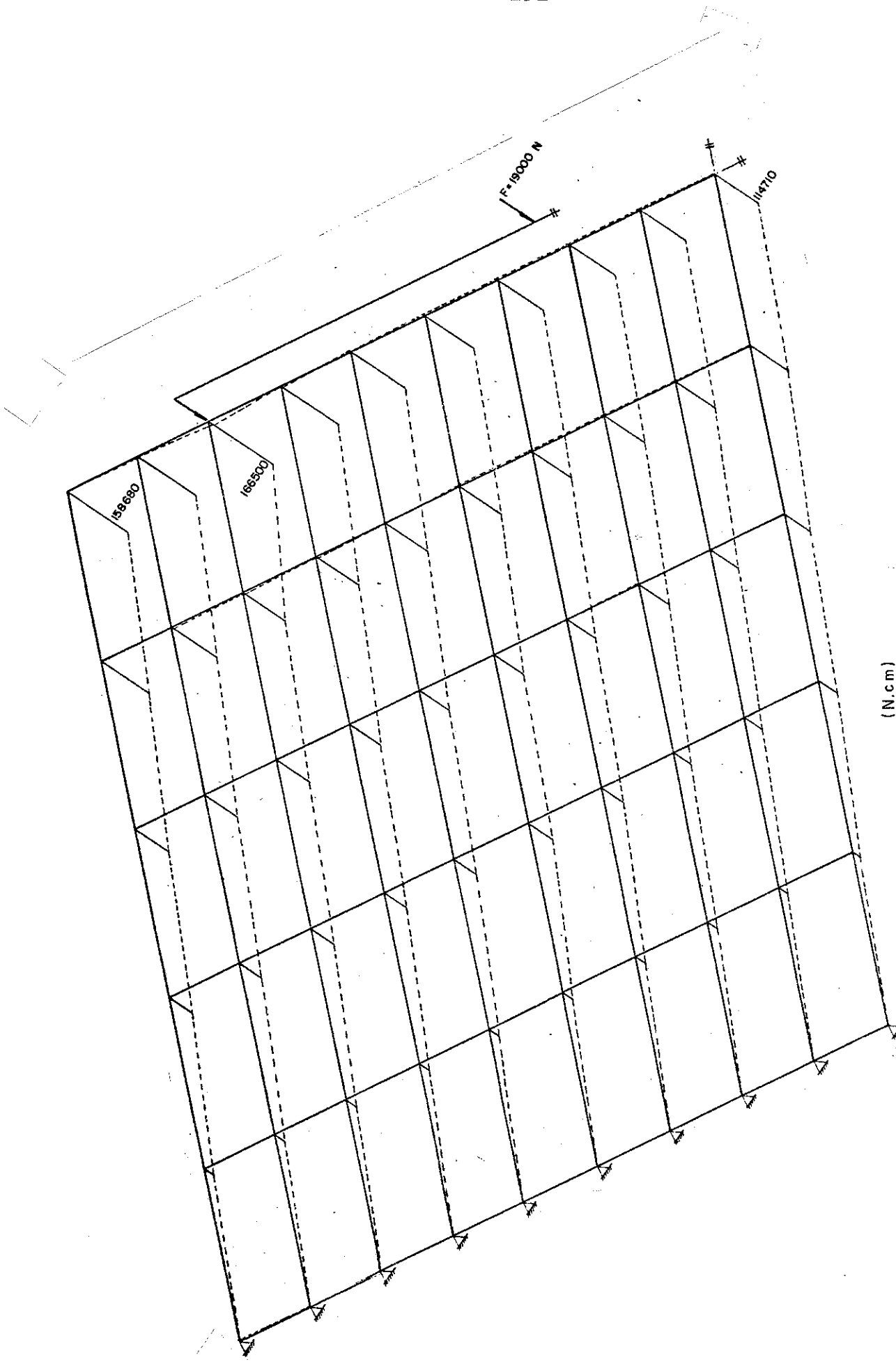


Fig. 136- Diagramas dos momentos fletores - Carga do trem-tipo

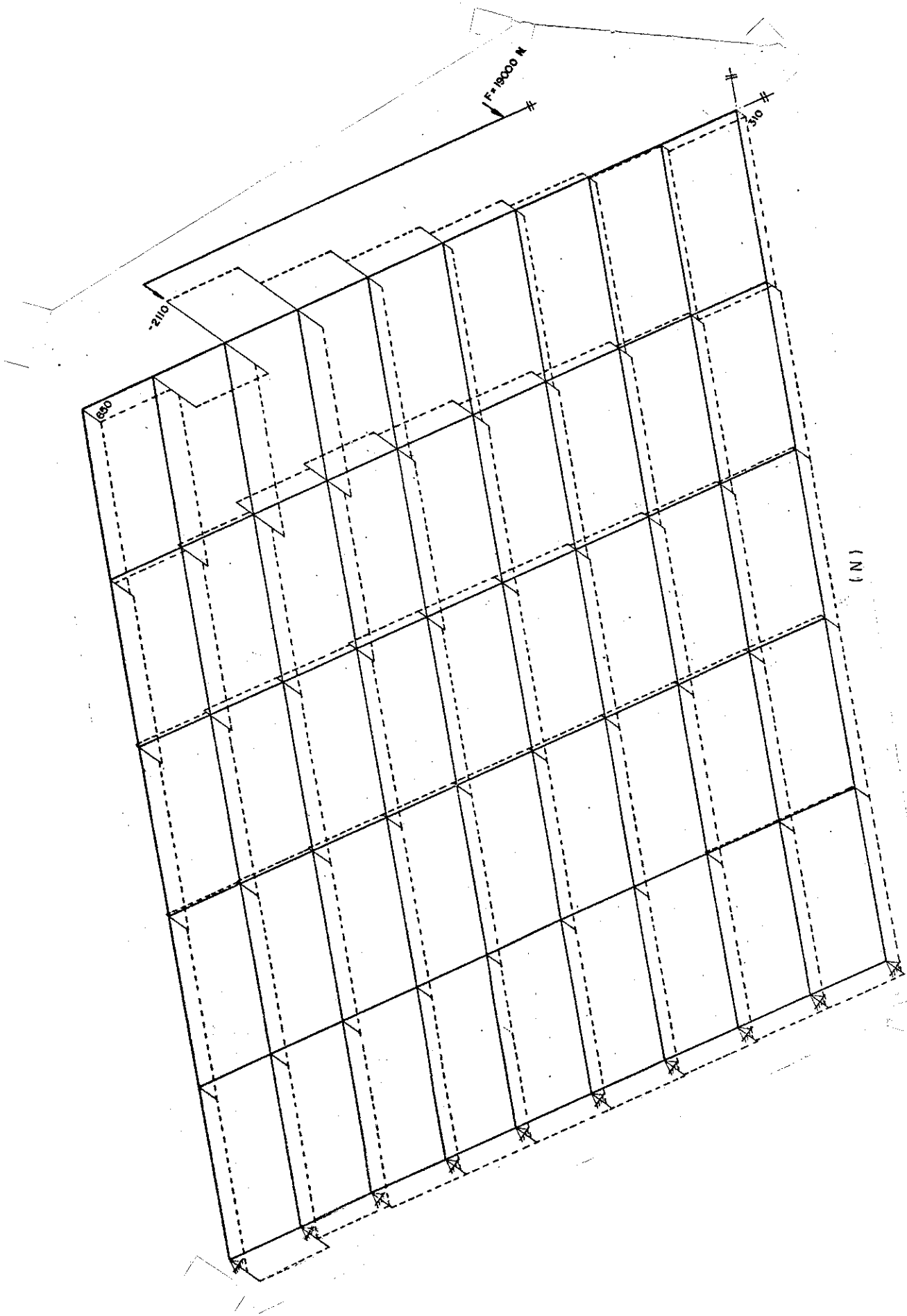


Fig. 137- Diagramas dos esforços cortantes - Carga do trem-tipo

6.2.2- Modelos Compostos por Postes

No estudo de modelos compostos por postes, o módulo de elasticidades transversal (G) do eucalipto citriodora não é conhecido, sendo necessária a realização de ensaios especiais de torção.

6.2.2.1- Ensaio de Torção em Postes

Para se ter uma estimativa do módulo de elasticidade transversal (G) do eucalipto citriodora, foram escolhidos para o estudo de torção seis postes de comprimento igual a 5,0m e diâmetro da base igual a 16cm.

Primeiramente os postes de eucalipto foram ensaiados à flexão simples, para se obter o seu módulo de elasticidade longitudinal (E).

Em seguida montou-se um conjunto especial para ensaiar os postes à torção.

A fig. 138 mostra a base do poste prensada na mesa de apoio, simulando um engastamento.

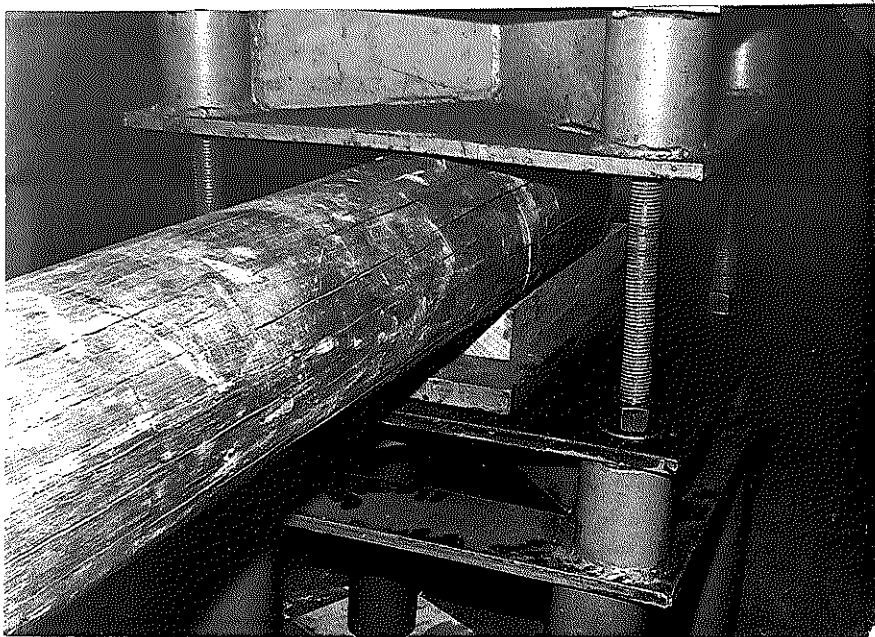


Fig. 138 - Mesa de apoio para fixar o poste

A fig. 139 mostra o topo do poste apoiado sobre um sistema de rodinhas, para realização do carregamento excêntrico.

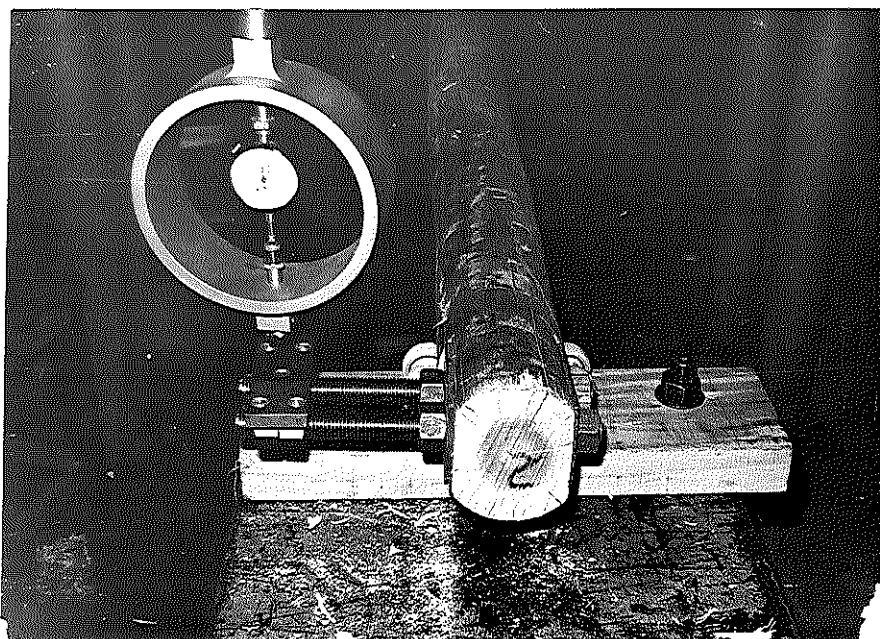


Fig. 139- Carregamento do poste

Ao longo do poste foram instalados 4 relógios comparadores, dois equidistantes 0,5m do centro do poste e dois a 1,0m do do centro.

A fig. 140 mostra o poste submetido à torção, com destaque dos relógios comparadores para medir o giro.

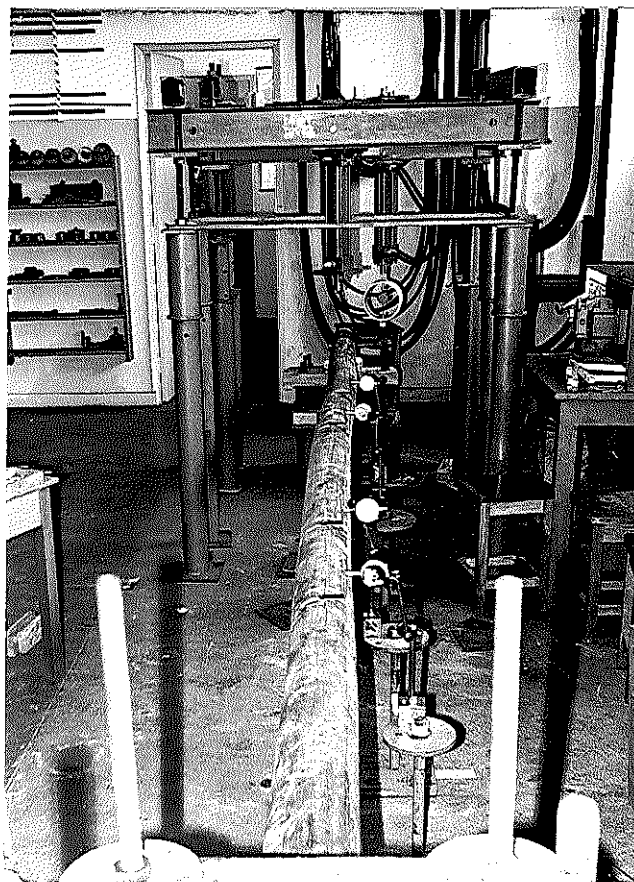


Fig. 140- Ensaio de Torção

De cada poste ensaiado, tem-se seis giros relativos (diferença de giro de um relógio para outro), obtendo-se seis módulos de elasticidade transversal.

A tabela 63 apresenta os módulos de elasticidade longitudinal e transversal, obtidos nos ensaios.

Tabela 63

Poste	Módulo de elasticidade	
	E (MPa)	G (MPa)
1	19702	709
2	18763	719
3	17464	817
4	15180	991
5	18989	863
6	19607	795

Estima-se a relação G/E para os postes de eucalipto citriodora, através dos ensaios experimentais como sendo:

$$\frac{G}{E} \cong \frac{1}{22,5}$$

6.2.2.2- Estudo dos Modelos Compostos por Postes como Grelhas

Representando-se o modelo composto por postes como uma grelha biapoiada, tem-se os postes de eucalipto como sendo os elementos longitudinais da grelha e os anéis metálicos como os elementos transversais.

Considerou-se também o comprimento de cada barra longitudinal igual à distância entre as linhas de anéis.

Tomou-se um comprimento fictício para o anel (barras transversais) igual à distância de centro à centro dos postes, ou seja, igual 14,0cm (diâmetro médio dos postes)

A fig. 141 apresenta o modelo composto por postes (seção simples ou nervurada), esquematizado como grelha, com as características das barras utilizadas no programa de cálculo.

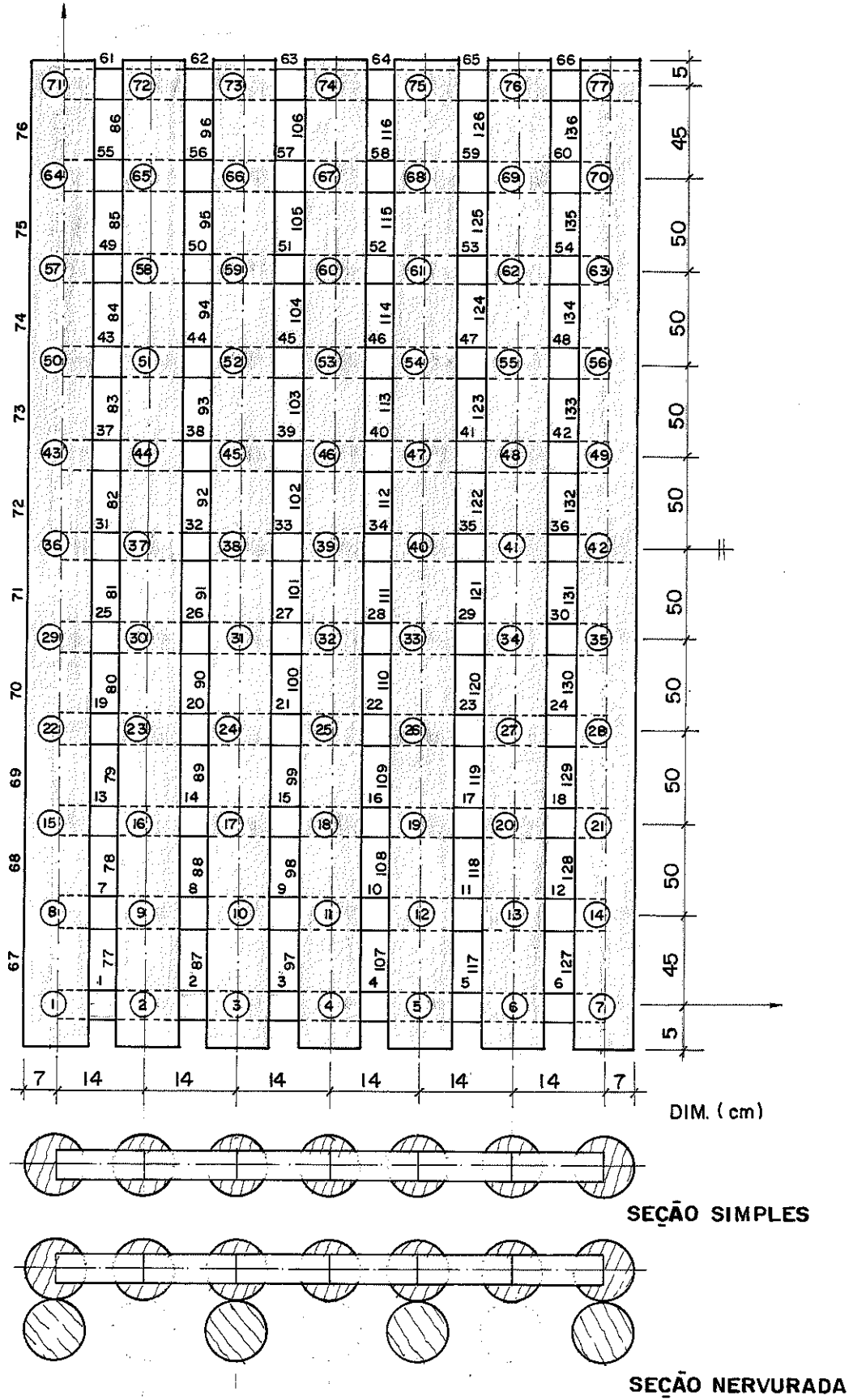


Fig. 141- Esquema como grelha

Nas propriedades dos materiais para o modelo de seção simples, tem-se:

Madeira (Eucalipto Citriodora)

Módulo de elasticidade longitudinal: $E = 18000 \text{ MPa}$

Média dos postes do modelo

Módulo de elasticidade transversal $G = 800 \text{ MPa}$

Retirado da relação $G/E = 1/22,5$

Peso específico: $\gamma = 0,01 \text{ N/cm}^3$

Aço: (Anéis Metálicos)

$E = 210000 \text{ MPa}$

$G = 80000 \text{ MPa}$

$\gamma = 0,077 \text{ N/cm}^3$

Para as propriedades das barras, no modelo de seção simples, tem-se:

Longarinas: (Postes de madeira)

Diâmetro $D_m = 14\text{cm}$ Área = $153,93\text{cm}^2$

Momento de inércia à flexão $I = 1885,7\text{cm}^4$

Momento de inércia à torção $I_t = 3771,5\text{cm}^4$

Transversina: (Anéis metálicos)

Diâmetro $2 \frac{1}{2}''$ Área = $4,09\text{cm}^2$

Momento de inércia à torção $I_t = 0$

Momento de inércia à flexão $I = ?$

Atribuindo-se valores para o momento de inércia, à flexão, dos anéis metálicos, no programa, constatou-se que, para $I = 2\text{cm}^4$ os resultados teóricos foram compatíveis com os experimentais.

A fig. 142 apresenta comparação das elásticas na seção transversal central, dos modelos de grelha e experimental, com carregamento concentrado e com o trem-tipo.

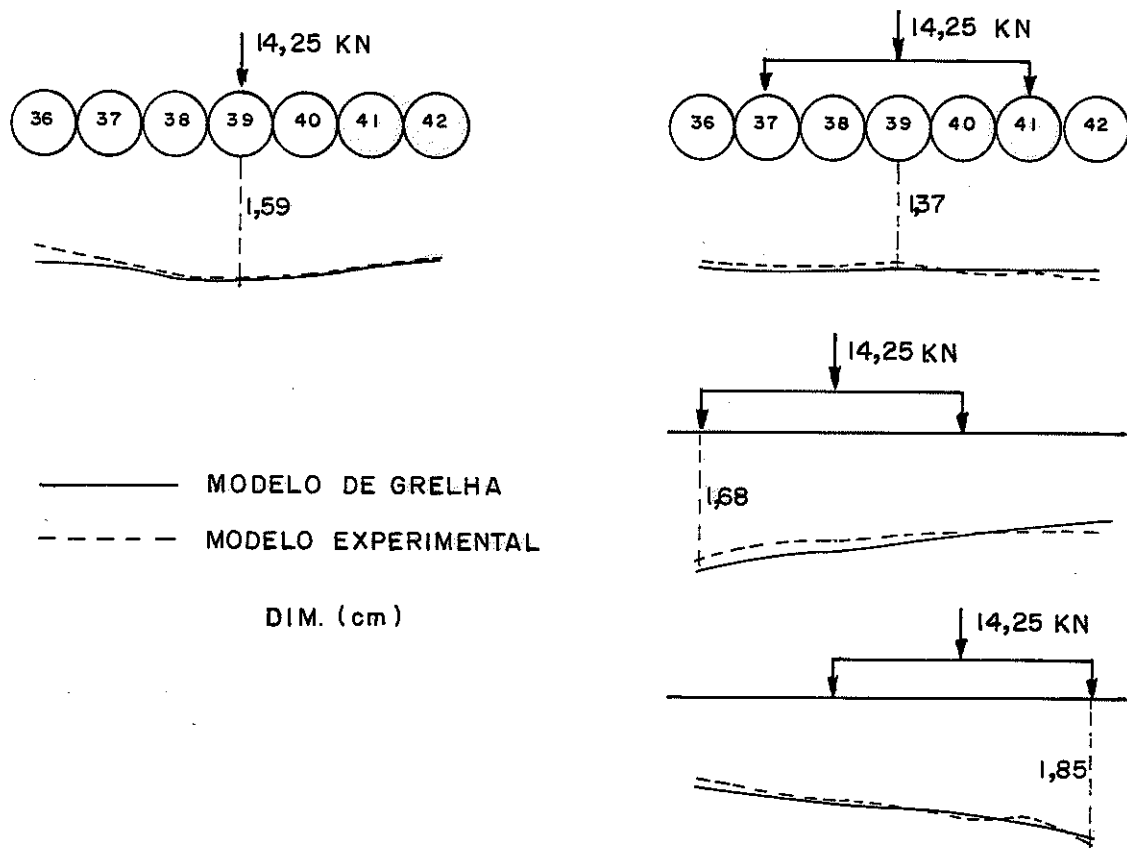


Fig. 142- Comparação das elásticas dos modelos teórico e experimental (seção simples)

As figuras 143, 144, apresentam os diagramas dos momentos fletores e dos esforços cortantes, respectivamente, para metade do modelo, com os carregamentos concentrado no nó 39, de 14,25KN.

As figuras 145, 146, apresentam os diagramas dos momentos fletores e os esforços cortantes respectivamente, com carregamento de 7,125KN em cada roda do trem-tipo, sobre os nós 37 e 41.

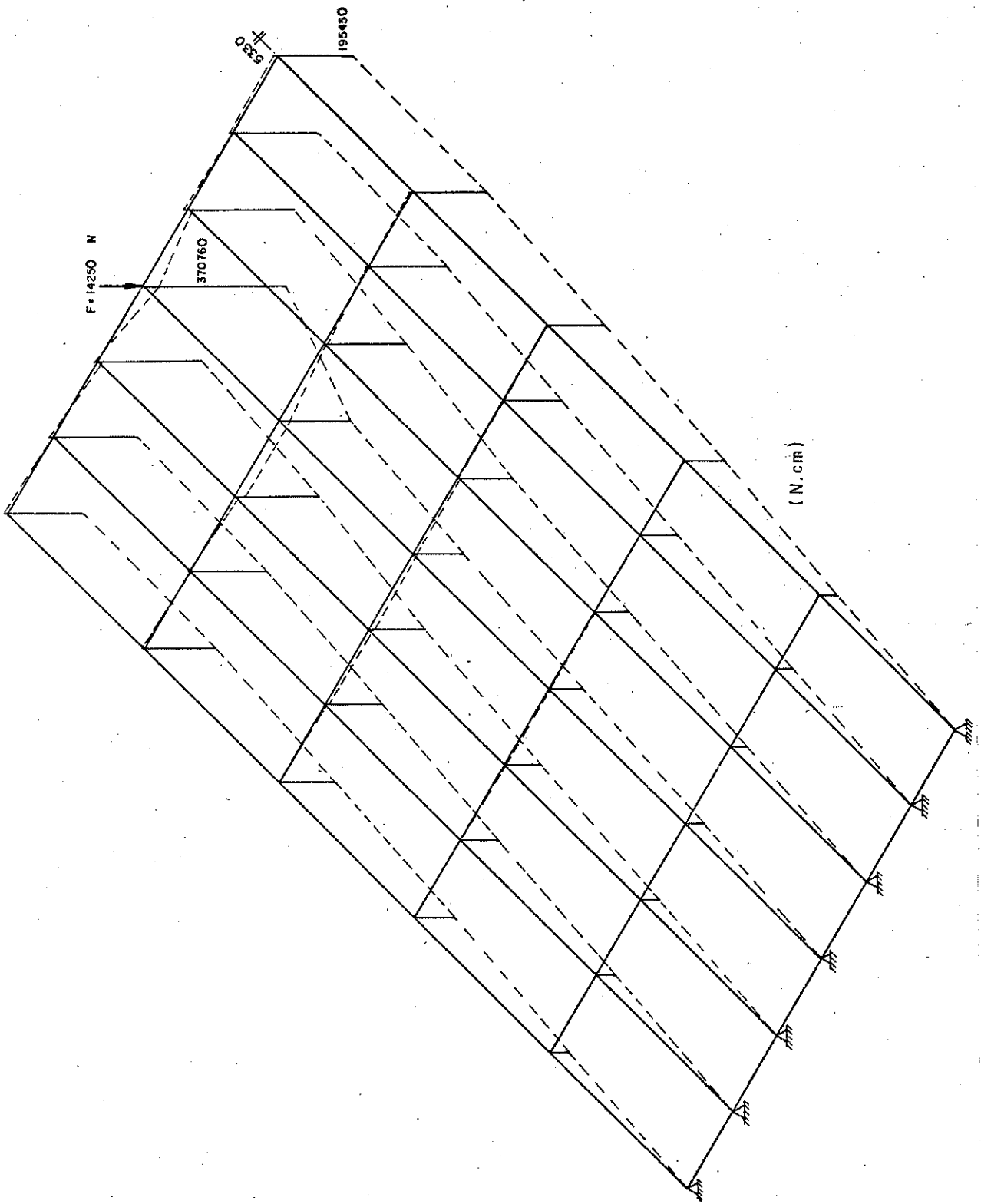


Fig. 143- Diagrama dos momentos fletores - Carga concentrada

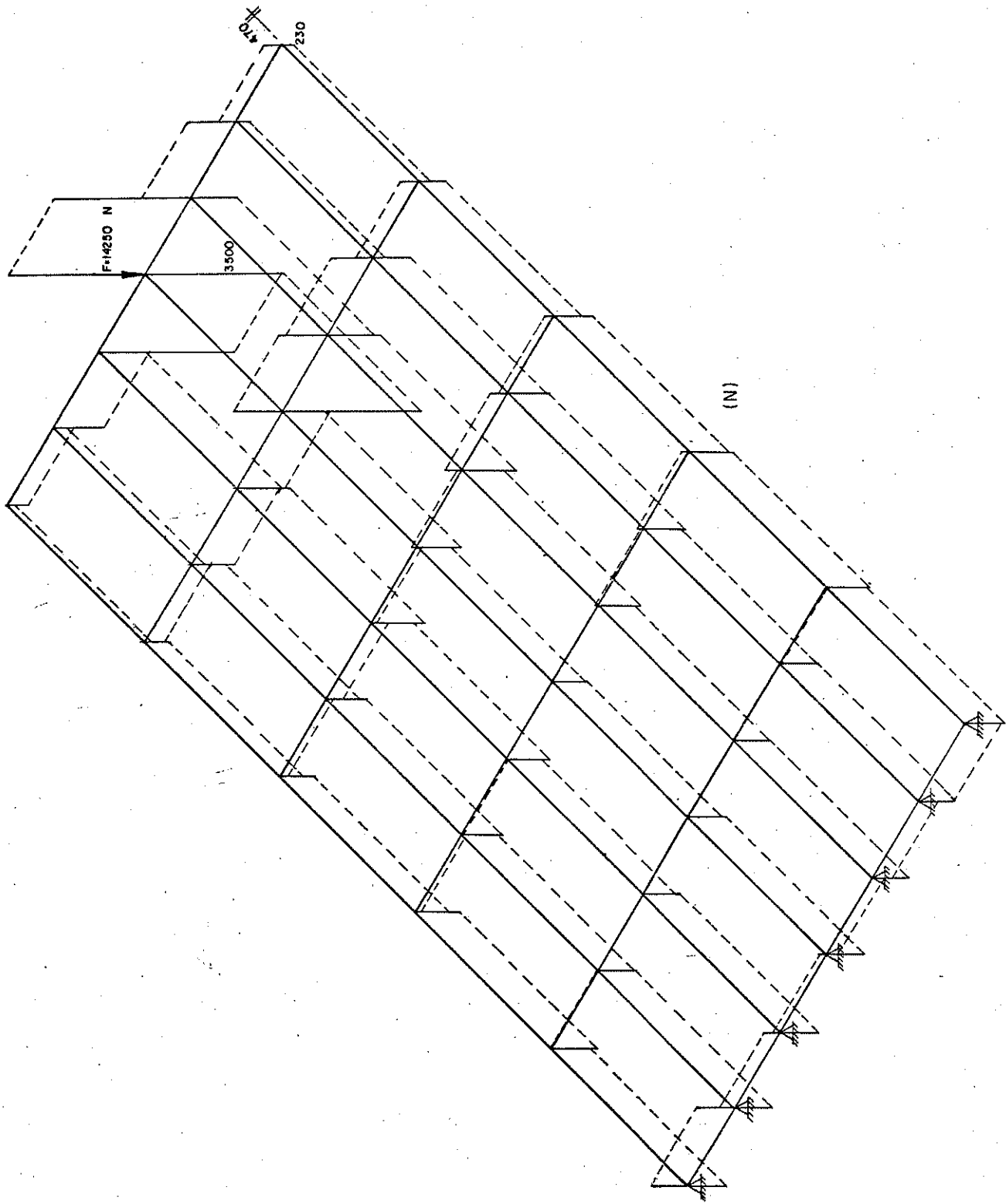


Fig. 144- Diagramas dos esforços cortantes - Carga concentrada

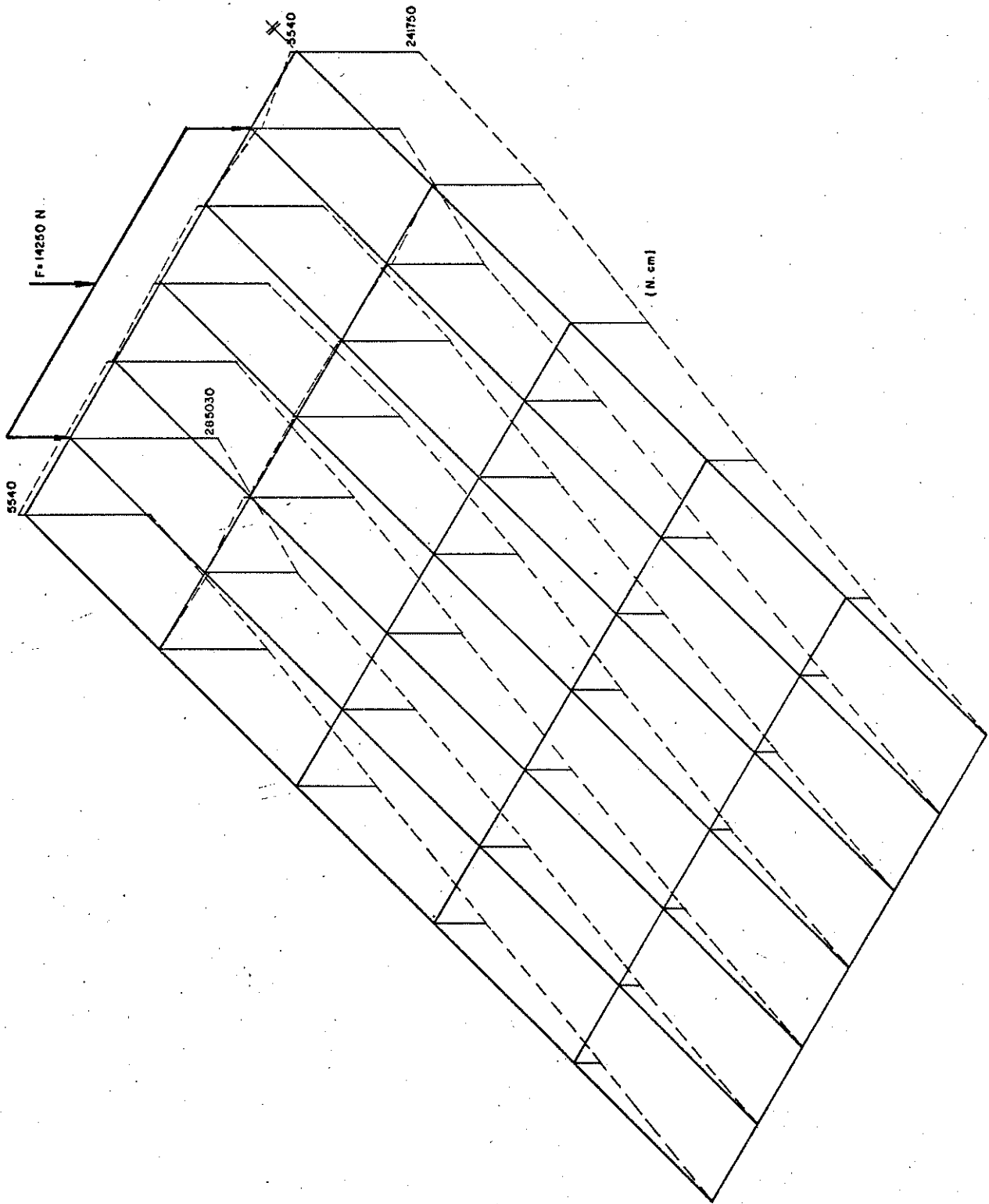


Fig. 145- Diagrama dos momentos fletores - Carga do trem-tipo

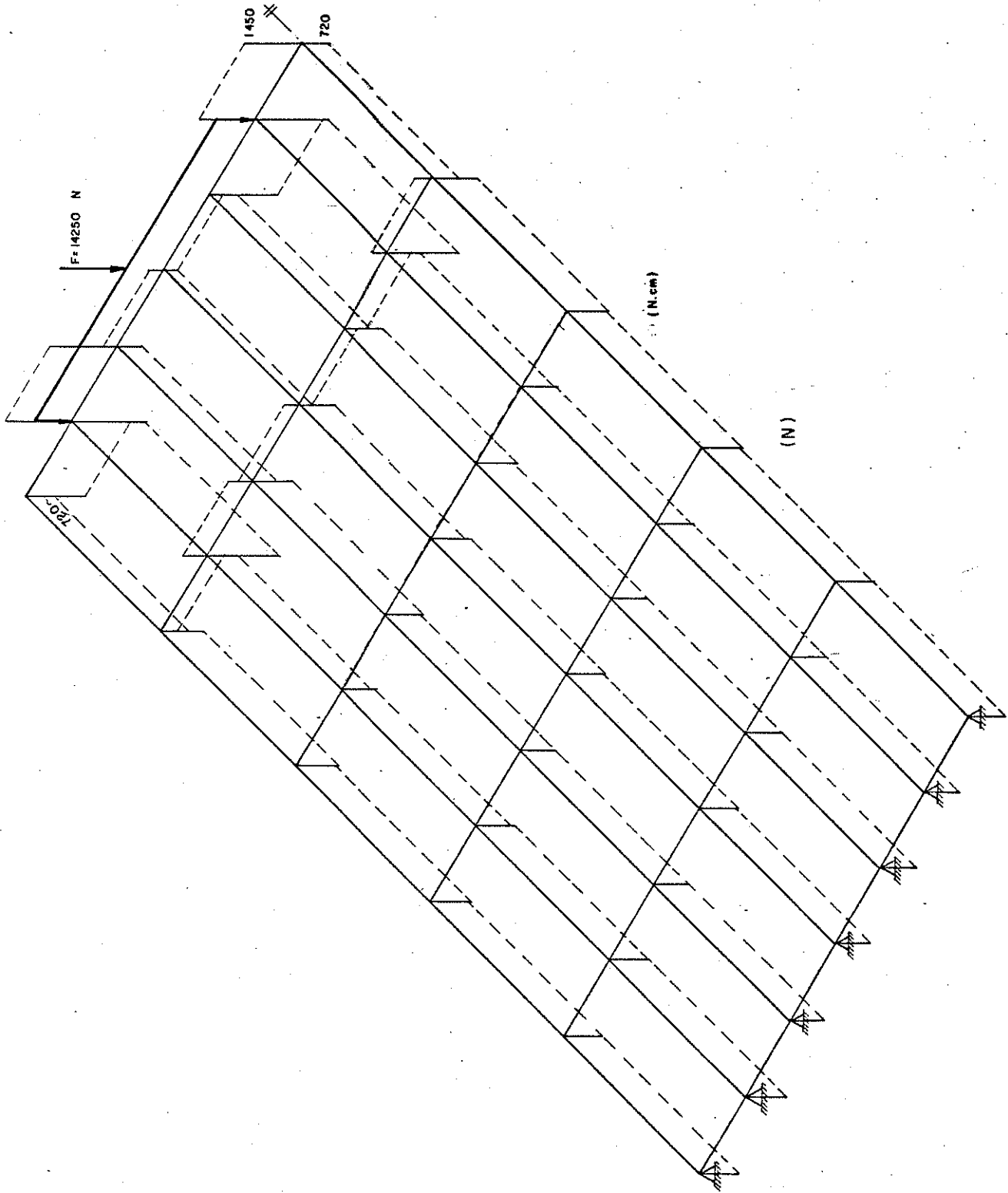


Fig. 146- Diagramas dos esforços cortantes - Carga do trem-tipo

No estudo teórico do modelo composto por postes, de seção nervurada, as propriedades dos materiais são as mesmas consideradas para o modelo de seção simples.

Para as propriedades das barras, considerando inicialmente para o modelo de seção nervurada, o momento de inércia das vigas bicirculares ser igual a oito vezes o de um poste. Num processo de tentativas, eram adotados valores para o momento de inércia dos anéis, utilizando-se o mesmo carregamento do ensaio no programa.

Não foi possível compatibilizar as elásticas do modelo de grelha com a do modelo experimental. Como a única variável modificada no modelo de seção nervurada em relação ao modelo de seção simples, foi a rigidez das vigas bicirculares, fixou-se o momento de inércia à flexão dos anéis metálicos em $I = 2,0\text{cm}^4$ procurando-se, assim, a rigidez das vigas bicirculares para o momento de inércia à flexão das vigas bicirculares igual a 3,71 vezes o de 1 poste, conseguindo-se uma boa aproximação das elásticas entre os modelos teórico e experimental. A fig. 147, apresenta as elásticas na seção transversal central, dos modelos de grelha e experimental, com carregamento concentrado e com o trem-tipo.

A tabela 64 apresenta as flechas nos nós da seção transversal central obtidas através do programa de grelha e dos ensaios experimentais, com carregamento de 14,25KN em cada roda situadas nos nós 37 e 41.

Tabela 64- Flecha dos Modelos

No	Flecha nos modelos (cm)	
	Grelha	Experimental
36	1,14	1,21
37	1,19	1,21
38	1,15	1,10
39	1,13	1,02
40	1,15	1,03
41	1,19	1,09
42	1,14	0,77

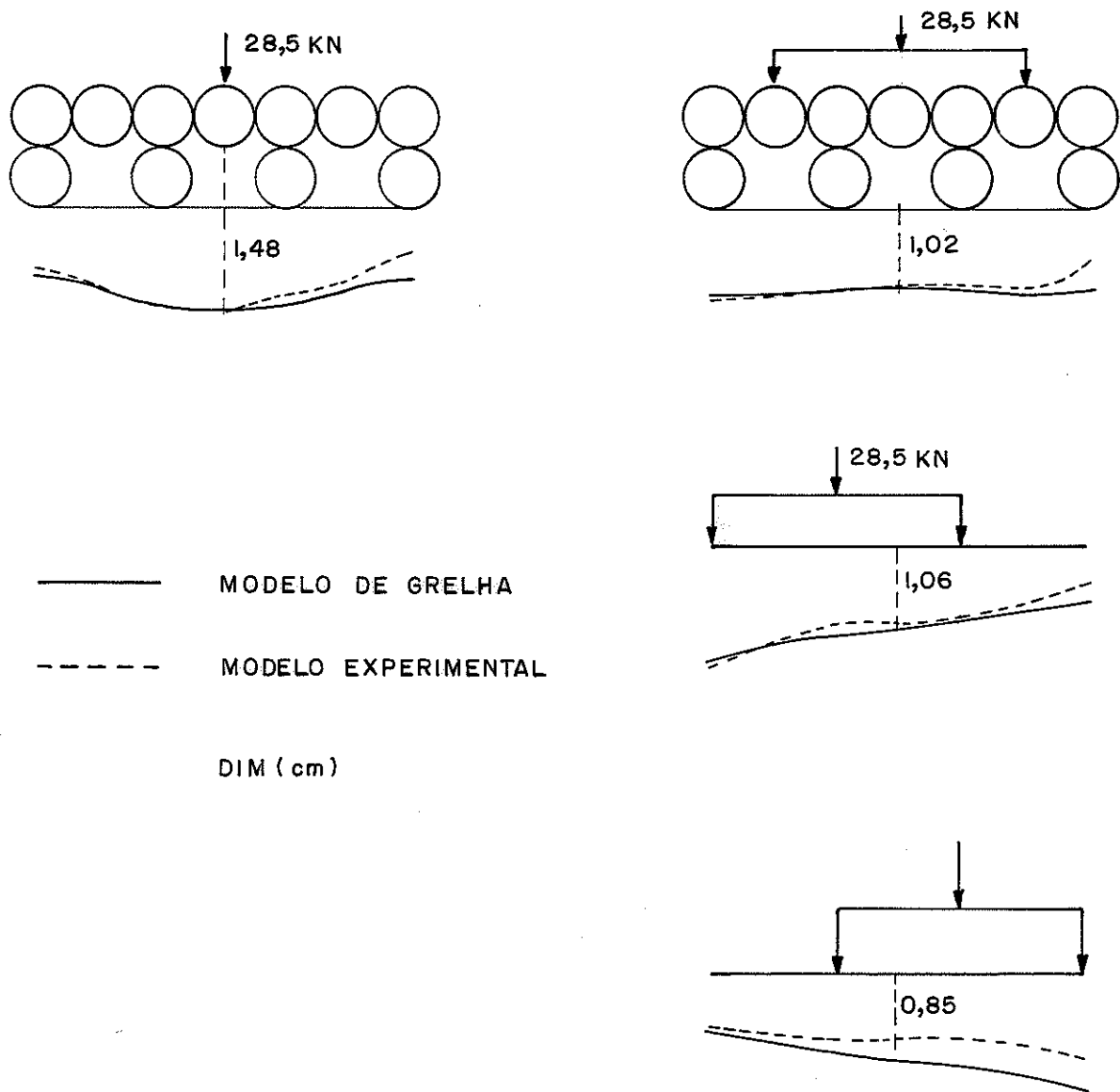


Fig. 147- Comparação das elásticas dos modelos teórico e experimental (seção nervurada)

A tabela 65 apresenta os esforços nas extremidades das barras das longarinas, para o carregamento do trem-tipo de 14,25KN em cada roda sobre os nós 37 e 41.

Tabela 65

Barra	Nó	Cortante N	Momento Fletor (N.cm)	Momento Torçor (N.cm)
71	29 36	1862	589315 682443	7354
81	30 37	3234	127070 288794	- 26
91	31 38	1977	593947 692829	- 5921
101	32 39	100	158332 163373	- 0,3
111	33 40	1977	593947 692826	5920
121	34 41	3234	127070 288792	25
131	35 42	1862	589306 682420	- 7355

A tabela 66 apresenta os esforços nas extremidades das barras das transversinas, para o carregamento do trem-tipo de 14,25 KN em cada roda, nos nós 37 e 41.

Tabela 66- Esforços nas barras transversais (anéis)

Barra	Nó	Cortante N	Momento Fletor (N.cm)
31	36 37	3724	- 14710 37437
32	37 38	- 4056	37488 - 19298
33	38 39	- 100	- 7455 - 8867
34	39 40	100	- 8867 - 7455
35	40 41	4056	- 19296 37487
36	41 42	- 3724	37436 - 14711

A tabela 67 apresenta as reações nos apoios, para o carregamento com o trem-tipo centrado. A carga de cada roda é de 14,25KN.

Tabela 67- Reações de Apoio

NÓ	Reação de Apoio (N)
1	2770
2	953
3	2995
4	814
5	2995
6	953
7	2770

AS figuras 148, 149, apresentam os diagramas dos momentos fletores e dos esforços cortantes respectivamente, para o modelo de seção nervurada, com carregamento centrado no nó 39, de 28,5KN.

As figuras 150, 151, apresentam os diagramas dos momentos fletores e dos esforços cortantes respectivamente, para o modelo de seção nervurada, com carregamento do trem-tipo de 14,25KN em cada roda sobre os nós 37 e 41.

6.3- CONCLUSÕES DO MODELO DE GRELHA

O modelo matemático do cálculo de grelha, explica perfeitamente o comportamento dos anéis metálicos nas ligações, bem como a distribuição das parcelas de carga de uma viga para outra.

A hipótese de considerar o comprimento fictício do anel, como sendo igual à distância do centro das longarinas, permitiu usar o mesmo momento de inércia à flexão do anel para os três modelos estudados, conhecendo-se assim, sua rigidez.

Neste modelo matemático pode-se constatar que a rigidez das vigas bicirculares é igual a 3,71 vezes a rigidez de um poste simples para este tipo de estrutura.

Conclui-se que, para este tipo de modelo composto por postes de eucalipto, pode-se utilizar o programa de cálculo por grelhas para o dimensionamento da estrutura.

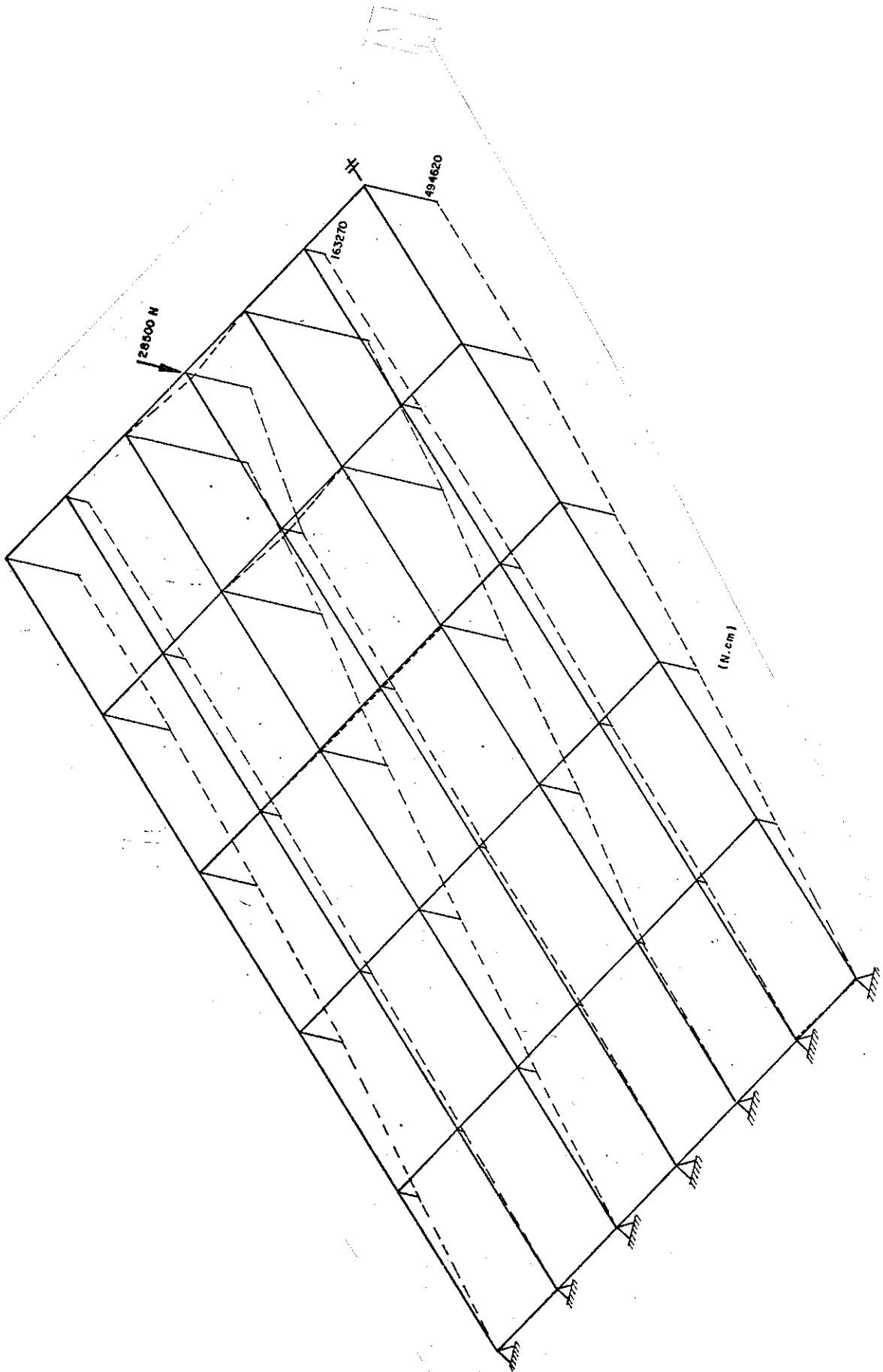


Fig. 148- Diagrama dos momentos fletores - Carga concentrada

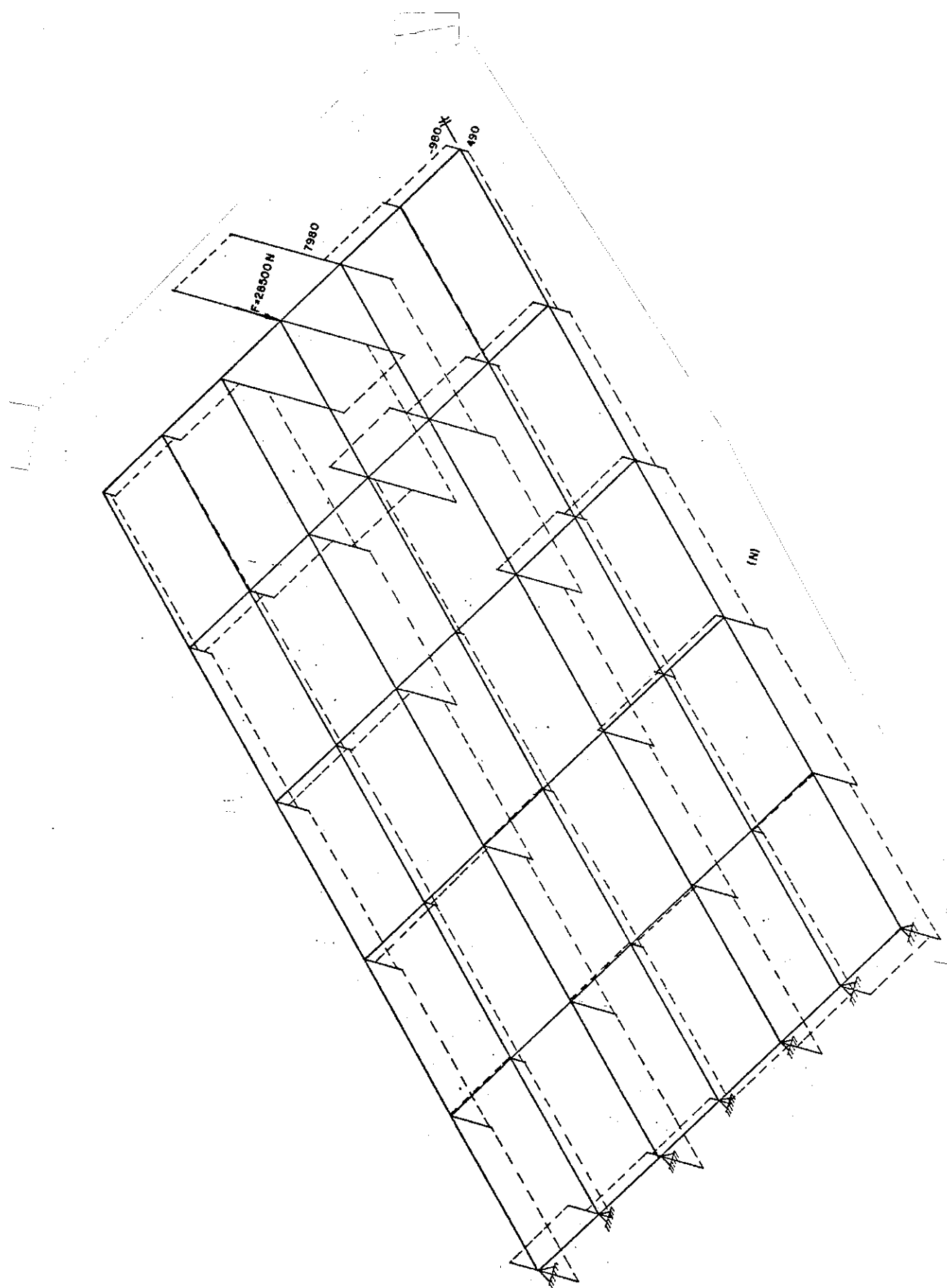


Fig. 149- Diagrama dos esforços cortantes - Carga concentrada

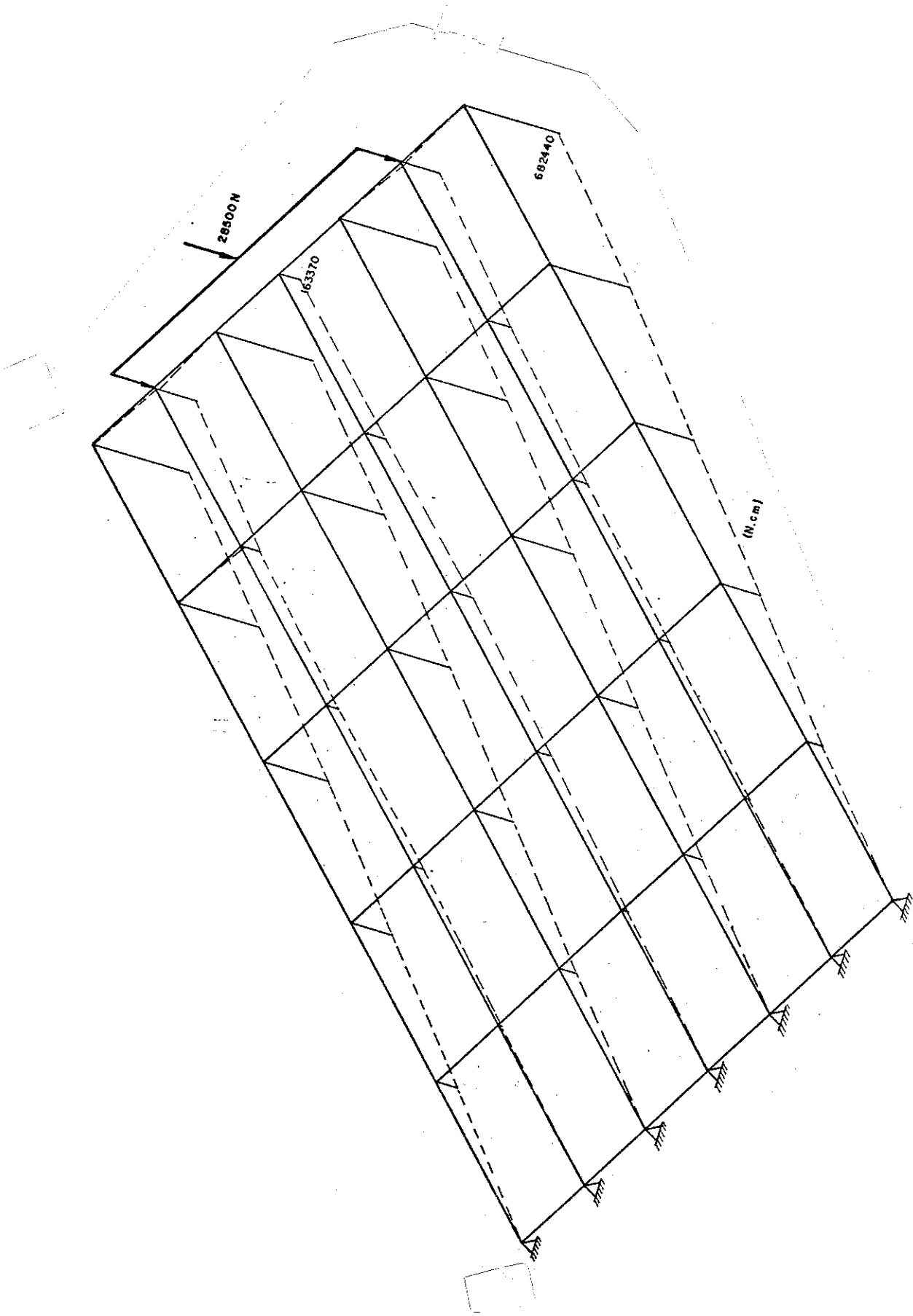


Fig. 150- Diagrama dos momentos fletores - Carga do trem-tipo

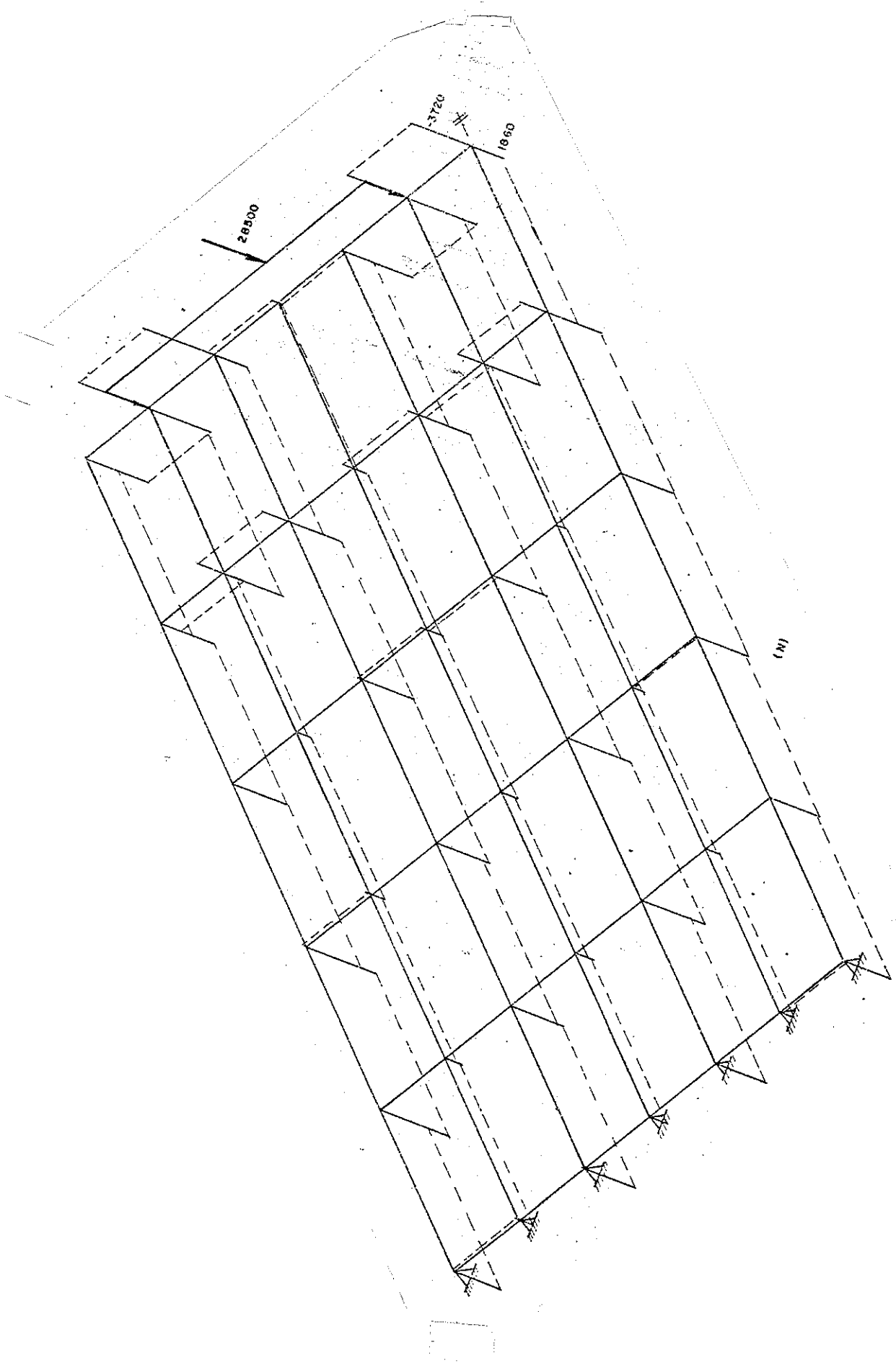


Fig. 151- Diagrama dos esforços cortantes - Carga do trem-tipo

7- CONCLUSÕES

1- As placas de madeira serrada ensaiadas na forma de modelos reduzidos (1:3,3 e 1:20), biapoiados e com carga concentrada, apresentaram comportamento comparável com o de placas ortotrópicas.

2- A experimentação do modelo em dimensões maiores, constituído por vigas serradas de madeira, interligadas lateralmente através de anéis metálicos partidos, evidenciou a viabilidade de seu comportamento, tipo placa ortotrópica, constituindo uma ponte.

3- Os anéis metálicos partidos evidenciaram comportamento excelente na solidarização lateral das cargas, permitindo o comportamento do conjunto de vigas como uma placa.

4- A experimentação de pontes constituídas de postes de madeira interligados lateralmente por anéis metálicos partidos, formando seções simples ou nervuradas, evidenciou a viabilidade de seu comportamento, tipo placa ortotrópica, adequado para utilização do esquema como ponte.

5- O cálculo simplificado da ponte com esquema estrutural em seção nervurada não se mostrou compatível com os resultados dos ensaios. Assim sendo, na melhor das hipóteses pode ser utilizado à nível de ante-projeto.

Entretanto, o momento de inércia teórico da viga bicircular deveria ser reduzido significativamente.

6- O cálculo da ponte com esquema estrutural em seção nervurada, considerada como grelha, mostrou-se plenamente compatível com os resultados dos ensaios.

7- O projeto e a execução da ponte de postes de madeira, na forma de viga simples e bicirculares, lateralmente interligadas através de anéis metálicos partidos, devido à excelente distribuição transversal das cargas concentradas à elevada rigidez e à elevada resistência, tornou-se plenamente aceitável.

8 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- SANDERS, W. W.; MUCHMORE, F. W.; TUOMI, R.L. - Behavior of Alaskan native log stringer bridge. Bridge Engineering, 2: 228-235, 1978. (Transportation Research Record 665).
- 2- MUCHMORE, F.W., Design guide for native log stringer bridges. U.S. Forest Service (region 10), 1977. 20p.
- 3- MUCHMORE; F.W. et alii - Native log stringer bridge research in the Alaska region. U.S. Forest Service Field Notes 9, 1977. p. 9-17.
- 4- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - Standart Method for design stresses for round timber piles - specification D-2899-74, 1974. (ASTM Standards 22). p. 816-818.
- 5- SANDERS, W.W. & ELLEBY, H.A. - Distribution of wheel loads on highway bridges. NCHRP, 1970. (Rept. 83). 56p.
- 6- WILLIS, R. - Log stringer bridge inspection and analysis in Alaska. U.S. Forest Service Field Notes 7, 1975. p. 10-16.
- 7- WERREN, F. - Evaluation of the stiffness of a roof system made of glued-laminated beams and heavy timber decking. USDA-FS-FPL, Mad, Wis., (2229), Oct. 1961. 24p.
- 8- LEWIS, W.C. - Fatigue resistance of quarter-scale bridge stringers in flexure and shear. USDA-FS-FPL, Mad. Wis., (2236), Sept. 1962. 102p.
- 9- ERICKSON, E.C.O. & ROMSTAD, K.M. - Distribution of wheel loads on timber bridges. USDA-FS-FPL, Mad., Wis, Dec. 1965. (Res.Paper FPL 44). 62p.
- 10-BOHANNAN, B. - FPL timber bridge deck research. Journal of the structural Divison, 98 (3): 729-740. March, 1972.

- 11-McCUTCHEON, W. & TUOMI, R.L. - Procedure for design of glued-laminated orthotopic bridge decks. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., 1973. (Res. Paper 210) 72p.
- 12-YOUNGQUIST, J.A. et alii - Design, fabrication, testing, and installation of a press-lam bridge. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., 1979. (Res. Pap. FPL 332). 19p.
- 13-GUTKOWSKI, R. M. & WILLIAMSON, T.G. - Timber bridge: state-of-the-art. Journal of Structural Engineering, 109 (9): 2175-2189, Sept. 1983.
- 14-BAKHT, B. - Statistical analysis of timber bridges. Journal of Structural Engineering, 109 (8): 1761-1779, Aug. 1983.
- 15-ZURITA, C.E. et alii - Ligações entre peças estruturais de madeira: anéis metálicos. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1971. 49p. (Trabalho de formatura).
- 16-HELLMEISTER, J.C. - Pontes de Eucalipto citriodora. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1978. Tese (Prof. Livre-Docência) 85p.
- 17-MATTHIESEN, J.A- Ligação de peças estruturais de madeira por anéis metálicos. Orientador: Prof. Dr. J. C. Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1981. Dissertação (Mestre-Eng. de Estruturas).
- 18-LOGSDON, N.B. - Contribuição ao estudo das pontes de madeira. Orientador: Prof. Dr. J.C. Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1982. Dissertação (Mestre-Eng. de Estruturas).
- 19-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cálculo e execução de estruturas de madeira - NBR 7190/82. Rio de Janeiro, ABNT, 1982. 23p.
- 20- _____ - Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre- NBR 7188. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. 6p.

- 21-DIAS, A.A. - Contribuição para o estudo da distribuição transversal de cargas em pontes de madeira. Orientador: Prof. Dr. João Cesar Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1987. Dissertação (Mestre-Eng. de Estruturas).
- 22-CEOTTO, L.H.; RAMALHO, M.A.; CORREA, M.R.S. - Sistema laser: linguagem para análise de sistemas estruturais reticulados - Programa GPLAN. CONGRESSO LATINO-AMERICANO SOBRE MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA ENGENHARIA, 7., São Carlos-SP, 4 a 7 de Novembro de 1986.
- 23-ROCCO LAHR, F.A. - Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1983. Tese (Doutor em Eng. de Estruturas).
- 24-MASCIA, N.T. - Contribuição ao estudo da flexão estática em peças de madeira. Orientador: Prof. Dr. J. C. Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1985. Dissertação (Mestre Eng. de Estruturas).

9 - BIBLIOGRAFIA

- ALBENGA, G. - I ponti: la pratica. 2.ed. Torino, Torinese, 1953. 568p.
- THE AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - Standard specifications for highway bridges. 12.ed. Washington, D.C., Association General Offices, 1977. 496p.
- AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION - Timber construction manual. 2.ed. New York, John Wiley and Sons, 1974.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - 1984 Annual book of ASTM standards. Philadelphia, PA, ASTM, 1984. v.04.09 - Wood (Section 4 - construction).
- _____ - Standard method for design stresses for round timber piles - specification D-2899-74, 1977. (ASTM Standards 22). p.816-818.
- ANDREWS, H.J. - An introduction to timber engineering. London, Pergamon, 1967. 221p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cálculo e execução de estruturas de madeira - NBR 7190/82 Rio de Janeiro, ABNT, 1982. 23p.
- _____ - Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre - NBR 7188. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. 6p.
- BAKHT, B. - Statistical analysis of timber bridges. Journal of Structural Engineering, 109 (8): 1761-1779, Aug. 1983.
- BOHANNAN, B. - FPL timber bridge deck research. Journal of the structural Division, 98(3): 729-740, March, 1972.
- BREYER, D.E. - Design of wood structures. New York, McGraw-Hill, 1980. 542p.
- BROCHARD, F.X. - Bois et charpentes en bois: le materiau et son utilisation. Paris, Eyrolles, 1960. 255p.

- CEOTTO, L.H.; RAMALHO, M.A.; CORREA, M.R.S. - Sistema laser: linguagem para análise de sistemas estruturais reticulados - Programa GPLAN. CONGRESSO LATINO-AMERICANO SOBRE MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA ENGENHARIA, 7., São Carlos-SP, 4 a 7 de Novembro de 1986.
- DIAS, A.A. - Contribuição para o estudo da distribuição transversal de cargas em pontes de madeira. Orientador: Prof. Dr. João Cesar Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1987. Dissertação (Mestre-Eng. de Estruturas).
- ERICKSON, E.C.O. & ROMSTAD, K.M. - Distribution of wheel loads on timber bridges. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., Dec. 1965. (Res. Paper FPL 44). 62p.
- FONROBERT, F. - Grundzüge des holzbaues im hochbau. 6ed. Berlin, W. Ernst, 1953. 276p.
- FONROBERT, F. & STOY, W. - Holz-nagelbau. 6.ed. Berlin, W. Ernst, 1949. 64p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY - Wood handbook: basic information on wood as a material of construction with data for its use in design and specification. Washington, D.C., FPL-FS-USDA, 1955. (Agriculture Handbook nº 72). 528p.
- GASC, Y. & DELPORT, R. - Les charpentes en bois. Paris, Eyrolles, 1954. (Traité du Batiment). 332p.
- GATTNAR, A. & TRYNA, F. - Hölzerne dach - und hallenbauten. 6.ed. Berlin, W. Ernst, 1954. 348p.
- GIORDANO, G. - La moderna técnica delle costruzioni in legno. 3.ed. rev. e amp. Milão, V. Hoepli, 1964. 798p. 2v.
- GUTKOWSKI, R.M. & WILLIAMSON, T. G. - Timber bridge: state-of-the-art. Journal of Structural Engineering, 109 (9): 2175-2189, Sept. 1983.
- HALÁSZ, R. Von - Holzbau-taschenbuch. Berlin, W. Ernst, 1974. 759p.

- HAMBLY, E.C. - Bridge deck behaviour. London, Chapman and Hall; New York, John Wiley & Sons, 1976. 272p.
- HANSEN, H.J. - Diseño moderno de estructuras de madera. México, Continental, 1961. 349p.
- HELLMEISTER, J.C. - Pontes de Eucalipto citriodora. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1978. Tese (Prof. Livre-Docência) 85p.
- HEMPEL, G. - Freigespannte holzbinder. 6.ed. Karlsruhe: Bruder, 1959. 408p.
- _____ - Geprüfte nagelbinder 1 e 2. Karlsruhe, Bruderverlag, 1979. 2v.
- HOYLE, J.R. - Wood technology in the design of structures.
- KARLSEN, G.G. et alii - Wooden structures. Moscou: Mir., 1967. 638p.
- LASKUS, A. - Hölzerne Brücken. 8.ed. Berlin: Wilhelm Ernst, 1955. 259p.
- LEWIS, W.C. - Fatigue resistance of quarter-scale bridge stringers in flexure and shear. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., (2236), Sept. 1962. 102p.
- LOGSDON, N.B. - Contribuição ao estudo das pontes de madeira. Orientador: Prof. Dr. J.C. Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1982. Dissertação (Mestre - Eng. de Estruturas).
- MASCIA, N.T. - Contribuição ao estudo da flexão estática em peças de madeira. Orientador: Prof. Dr. J.C. Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1985. Dissertação (Mestre Eng. de Estruturas).
- MATEUS, T.J.E. - Bases para o dimensionamento de estruturas de madeira. Lisboa, LMEC, 1962. 306p.

- MATTHIESEN, J.A - Ligação de peças estruturais de madeira por anéis metálicos. Oreintador: Prof. Dr. J.C. Hellmeister. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1981. Dissertação (Mestre - Eng. de Estruturas).
- McCUCHEON, W. & TUOMI, R. L. - Procedure for design of glued-laminated orthotropic bridge decks. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., 1973. (Res. Paper 210) 42p.
- MOTTA, V.F. - Curso de teoria da semelhança. Porto Alegre, U.F.R.G.S., 1972. 154p.
- MUCHMORE, F.W. - Design guide for native log stringer bridges. U.S. Forest Servic (region 10), 1977. 20p.
- MUCHMORE, F.W. et alii - Native log stringer bridge research in the Alaska region. U.S. Forest Service Field Notes 9, 1977. p. 9-17.
- OBERG, F.R. - Heavy timber construction. 2.ed. USA, AST, 1968. 408p.
- O'CONNOR, C. - Pontes: superestruturas. Rio de Janeiro Livros Técnicos e Científicos; São Paulo, EDUSP, 1975. 281p.
- OZELTON, E.C. & BAIRD, J.A. - Timber designer's manual. London: Crosby Lockwood Staples, 1976. 517p.
- PEARSON, R. G. ; KLOOT, N.H.; BOYD, J. D. - Timber engineering design handbook. Melbourne: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1958. 248p.
- PEET, C. - Mis primeros conocimientos de puentes. México, Compañía General de Ediciones, 1963. 70p.
- ROCCO LAHR, F.A. - Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1983. Tese (Doutor em Eng. de Estruturas).
- ROCHA, M. - Dimensionamento experimental das estruturas. Lisboa, LNEC, 1952. (Public nº 21). 72p.

- SANDERS, W.W. & ELLEBY, H.A. - Distribution of wheel loads on highway bridges. NCHRP, 1970. (Rept. 83). 56p.
- SANDERS, W.W.; MUCHMORE, F.W.; TUOMI, R.L. - Behavior of Alaskan native log stringer bridges. Bridge Engineering, 2: 228-235, 1978. (Transportation Research Record 665).
- SCOFIELD, W.F. & O'BRIEN, W.H. - Modern timber engineering. 4.ed. New Orleans, SPA, 1954. 232p.
- WATANABE, E. - Study of load distribution in multibeam highway bridges. Ames, Iowa, Iowa State University, 1968. Thesis (Master of Science).
- WERREN, F. - Evaluation of the stiffness of a roof system made of glued laminated beams and heavy timber decking. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., (2229), Oct 1961. 24p.
- STOY, W. - Der holzbau. 5.ed. Berlin, Springer-Verlag, 1950. 203p.
- STEINMAN, D. B. & WATSON, S.R. - Bridges and their builders. New York, Dover, 1957. 401p.
- VÖLTER, O. - Gerüste und schalungen. Stuttgart, s.n.t. p. 531-615
- WILLE, F. - Holzbau. Braunsfeld, R. Müller, 1969. 317p.
- WILLIS, R. - Log stringer bridge inspection and analysis in Alaska. U.S. Forest Service Field Notes 7, 1975. p.10-16.
- WITTFOHT, H. - Puentes: ejemplos internacionales. Barcelona, Gustavo Gili, 1975. 320p.
- _____ - Triumph der Spannweiten. Düsseldorf, Beton Verlag, 1972. 313p.
- YOUNGQUIST, J.A. - et alii - Design, fabrication, testing, and installation of a press-lam bridge. USDA-FS-FPL, Mad., Wis., 1979. (Res. Pap. FPL 332). 19p.

ZURITA, C.E. et alii - Ligações entre peças estruturais de madeira:
anéis metálicos. São Carlos, LAMEM-EESC-USP, 1971. 49p.
(Trabalho de formatura).