

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

O USO DA PROTENSÃO EM PEÇAS  
DE CONCRETO DE SEÇÃO DELGADA  
(ARGAMASSA ARMADA PROTENDIDA)

Eng. SYDNEY FURLAN JUNIOR

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de  
São Carlos da Universidade de São Paulo, como  
parte dos requisitos para a obtenção do título de  
"Mestre em Engenharia de Estruturas".

Orientador : PROF.DR. JOÃO BENTO DE HANAI

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

SÃO CARLOS, FEVEREIRO DE 1991

## AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho contou com a colaboração de muitas pessoas, cujas contribuições e sugestões gostaria de agradecer com sinceridade.

Ao meu orientador João Bento de Hanai, pela presença segura e constante, que o tornou um companheiro imprescindível

Aos professores Toshiaki Takeya e José Samuel Giongo, pela contribuição especialmente no trabalho experimental.

Ao professor Norberto Costardi, à bibliotecária e demais funcionários. À João Marques Póvoa Jr e técnicos do Laboratório de Estruturas da EESC-USP, que participaram na execução dos modelos. E a Dimas Milaneto, desenhista do DECIV da UFSCAR, pelos desenhos.

E finalmente, aos amigos e companheiros de pós-graduação, em especial a Ruy Franco Bentes, Narbal Ataliba Marcelino e Flávio Barboza de Lima, que acompanharam e contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

Dedico este trabalho à Silvia e ao Leonardo,  
meus companheiros do dia a dia.  
E a meus pais, grandes incentivadores.

## RESUMO

Apresenta-se neste trabalho o efeito da protensão em elementos de concreto pré-moldado de seção delgada, que podem ser entendidos como de argamassa armada protendida ou de concreto protendido leve. É uma alternativa estrutural para a argamassa armada, que reduz os deslocamentos e retarda ou elimina a fissuração. O uso da protensão também pode proporcionar a utilização de telas de aço soldada com malhas de maior abertura, a redução nas taxas de armadura, e facilitar a moldagem, o transporte e a montagem das peças.

Apresenta-se o potencial de aplicação dos elementos protendidos de seção delgada nas diversas obras de engenharia e discute-se as diferenças com a argamassa armada e o concreto protendido tradicionais. O estudo investiga a interface entre estes materiais, com enfoque especial para o cobrimento mínimo das armaduras, o nível de protensão, a eficiência da aderência, a estabilidade dos elementos, o comportamento na fissuração, os tipos de tela e outros fatores.

Descreve-se o projeto de alguns elementos pré-moldados, componentes de um pequeno galpão comercial, industrial ou rural.

Completam este trabalho os ensaios de duas vigas, de mesma seção transversal em duplo-T, mas com tipos de tela diferentes: uma foi armada com tela de aço soldada (diâmetro dos fios de 2,5mm e malha 50mm x 50mm) e a outra com tela de chapa de aço expandida (abertura da malha de 18mm x 52mm).

Foram medidas as perdas de protensão, o momento fletor de fissuração, a abertura e espaçamento das fissuras e o momento fletor resistente último.

As conclusões referem-se principalmente à viabilidade do desempenho estrutural e ao potencial de aplicação do material.

## ABSTRACT

This work presents the effect of prestressing in precast thin-walled concrete elements, that can be seen as ferrocement or reinforced mortar ones. It is a structural alternative for ferrocement that reduces the deflections and delays or eliminates the cracking. The use of prestressing techniques also permits the application of large opening welded wire meshes, reduction of the steel ratio, easy casting, transporting and erection.

The potential of thin-walled pretensioned elements in the Civil Construction is presented, and its differences with traditional ferrocement and reinforced concrete are discussed. The study investigates the interface between ferrocement and prestressed concrete, with special regards for the minimum reinforcement cover, prestress level, adherence effectiveness, stability of thin-walled elements, cracking performance, mesh types and other factors.

A design example of some precast elements for a small storage building for commercial, industrial and agricultural purposes is described.

To complete this work, the results of experimental tests over two beams are presented. The beams had the same double-T section, but the mesh reinforcements were different: one of them was reinforced with welded wire mesh (2.5 mm wire diameter and 50 x 50 mm mesh) and the other was reinforced with an expanded metal mesh (diamond type with 18 x 52 mm openings).

Loss of prestress, cracking moment, width and spacing of cracks, deflections and ultimate strength were measured.

The conclusions mainly refer to the viability of structural performance and potential applications.

## CONTEÚDO

Capítulo 1 - APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS .....	1
1.1 - Introdução .....	1
1.2 - Objetivos .....	3
1.3 - Apresentação .....	4
Capítulo 2 - ARGAMASSA ARMADA - FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	8
2.1 - Histórico e evolução .....	8
2.2 - Características e propriedades .....	12
2.2.1.- Materiais .....	13
2.2.1.1 - Argamassa .....	13
2.2.1.2 - Cimento .....	16
2.2.1.3 - Aditivos .....	17
2.2.1.4 - Agregados .....	18
2.2.1.5 - Armadura .....	18
2.2.1.6 - Outros materiais .....	20
2.2.2 - Técnicas de execução .....	21
2.2.2.1 - Fôrmas .....	21
2.2.2.2 - Montagem da armadura .....	23
2.2.2.3 - Lançamento e adensamento .....	24
2.2.2.4 - Cura .....	24
2.2.2.5 - Outros aspectos .....	27
2.2.3 - Procedimentos de projeto .....	28
2.2.3.1 - Composição estrutural .....	28
2.2.3.2 - Dimensões .....	29
2.2.3.3 - Armadura:disposições complementares .....	32
2.2.3.4 - Dimensionamento .....	33

Capítulo 3 - CONCRETO PROTENDIDO - FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....47

3.1 - Conceitos gerais .....	47
3.1.1 - Protensão .....	47
3.1.2 - Tipos de protensão .....	48
3.1.3 - Grau de protensão .....	50
3.1.4 - Materiais para concreto protendido .....	51
3.1.5 - Aderência .....	53
3.1.6 - Noções sobre perdas de protensão .....	54
3.1.6.1 - Acomodação na ancoragem .....	54
3.1.6.2 - Deformação imediata do concreto ....	55
3.1.6.3 - Retração e fluência do concreto ....	55
3.1.6.4 - Relaxação e fluência do aço .....	57
3.2 - Execução da protensão .....	57
3.2.1 - Ancoragem .....	59
3.2.2 - Contrôles da protensão .....	60
3.3 - Projeto .....	61
3.3.1 - Escolha do grau de protensão .....	61
3.3.2 - Comportamento resistente .....	64
3.3.3 - Determinação da força de protensão .....	67
3.3.4 - Cálculo das perdas .....	69
3.3.4.1 - Ancoragem .....	69
3.3.4.2 - Encurtamento elástico do concreto ..	69
3.3.4.3 - Perdas progressivas .....	70
3.3.5 - Dimensionamento .....	75
3.3.5.1 - Estados limites de utilização .....	75
3.3.5.2 - Estados limites últimos .....	78

Capítulo 4 - ARGAMASSA ARMADA PROTENDIDA .....82

4.1 - Revisão bibliográfica .....	82
4.1.1 - Norma soviética .....	83
4.1.2 - Trabalhos experimentais .....	83
4.2 - Potencial de aplicação .....	86
4.3 - Fundamentos teóricos .....	93
4.4 - Materiais .....	95
4.4.1 - Cimento .....	95
4.4.2 - Água .....	96
4.4.3 - Agregados .....	96
4.4.4 - Armadura ativa .....	97
4.4.5 - Armadura passiva .....	98
4.5 - Argamassa .....	98
4.6 - Arranjo das armaduras .....	99
4.7 - Cobrimento .....	100
4.8 - Aderência .....	101
4.9 - Introdução da protensão .....	102
4.10 - Estabilidade .....	103
4.11 - Fissuração .....	104
4.12 - Deformação .....	107
4.13 - Ruptura .....	107

Capítulo 5 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO .....108

5.1 - Sistema estrutural .....	109
5.2 - Situações de análise .....	111
5.3 - Dimensionamento .....	112
5.3.1 - Viga-calha .....	116
5.3.2 - Viga-cumeeira .....	124
5.3.3 - Viga-telha .....	128
5.3.4 - Painel .....	130
5.3.5 - Viga-baldrame .....	132
5.4 - Comentários .....	137

Capítulo 6 - ANÁLISE EXPERIMENTAL .....140

6.1 - Modelos experimentais .....	140
6.2 - Fôrmas .....	142
6.3 - Argamassa .....	142
6.4 - Armaduras .....	145
6.5 - Execução dos modelos .....	152
6.6 - Ensaios .....	158
6.7 - Resultados dos ensaios .....	163
6.8 - Análise dos resultados .....	182
6.8.1 - Força de protensão .....	182
6.8.2 - Estados limites de utilização .....	185
6.8.2.1 - Momento fletor de fissuração .....	185
6.8.2.2 - Deslocamentos .....	187
6.8.2.3 - Fissuração .....	188
6.8.3 - Estado limite último .....	192

Capítulo 7 - CONCLUSÕES .....194

Capítulo 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E BIBLIOGRAFIA  
COMPLEMENTAR .....199

8.1 - Referências bibliográficas .....	199
8.2 - Bibliografia complementar .....	203

## CAPÍTULO 1

### APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS

#### 1.1. INTRODUÇÃO

A argamassa armada caracteriza-se por ser um material que utiliza armadura difusa, de telas de aço de fios finos com malhas de abertura limitada, além de possíveis barras de aço complementares, associadas a uma argamassa estrutural de cimento Portland e agregado miúdo. A NBR-11173 - Projeto e Execução de Argamassa Armada [1990]<sup>1</sup> define peça de argamassa armada como aquela de pequena espessura, de dimensão menor que o valor convencional de 40mm, sendo a armadura citada distribuída em toda seção transversal da argamassa.

O material está em estágio de acelerado desenvolvimento tecnológico e demonstra significativa participação nas obras correntes da Engenharia Civil, quer em elementos acessórios ou em componentes estruturais de edificações, quer na construção de infra-estrutura urbana e rural. As pesquisas na área, especialmente as de caráter experimental, a difusão das técnicas com a consequente disseminação das aplicações em argamassa armada, introduzindo-a definitivamente como uma consistente opção tecnológica, são fatores que apontam para um material já possuidor de um bom controle de qualidade. Inúmeros problemas, inicialmente observados nas obras executadas no período de introdução do material no Brasil, foram superados.

Conforme relata HANAI [1987]<sup>2</sup>, os diversos estudos do Grupo de São Carlos sobre as propriedades mecânicas da argamassa armada com diversos tipos de tela, propriedades da argamassa, corrosão das armaduras e durabilidade das construções; processos de cálculo e execução, normalização técnica; sistemas construtivos e equipamentos urbanos alternativos, são contribuições que permitem ao material a ocupação de um espaço no mercado, com respostas de comportamento bastante razoáveis.

Neste contexto de desenvolvimento e aprimoramento das técnicas e do material, inserem-se propostas novas que devem ser testadas e então disseminadas. Uma delas refere-se à introdução da protensão nestes elementos delgados. A expectativa neste caso é a obtenção de um desempenho superior das peças em relação à fissuração, com o retardamento do aparecimento da primeira fissura (aumento do momento fletor de fissuração da peça). Complementarmente, espera-se um melhor comportamento nas diversas etapas da vida do elemento, na fabricação, transporte e em serviço.

A protensão nas peças de argamassa também pode proporcionar outras vantagens, em especial a possibilidade de diminuição das taxas de armadura difusa de tela de aço, elemento de peso na composição dos custos, possivelmente possibilitando o uso de malhas de aberturas maiores. Peças para vãos maiores, com deformação minimizada pela protensão e uso de telas alternativas, como por exemplo, a tela de aço de chapa expandida, conjugado com a protensão, são possibilidades detectáveis numa análise inicial, mas que carecem de comprovação experimental para serem confirmadas.

A ocorrência de problemas decorrentes da pré-compressão nas peças de argamassa armada, principalmente com a estabilidade da peça e a fissuração da argamassa na região de transferência da força de protensão por aderência, não se confirmaram nos ensaios realizados. A priori parece ser o nível de protensão o parâmetro principal a ser estudado para controlá-los. A disposição de armadura de fretagem eficiente é complicada em função da pequena espessura; se as tensões de aderência forem muito elevadas, a possibilidade de haver o fendilhamento da argamassa deve ser pesquisada.

Outros aspectos não se constituem em problemas, mas são motivos de estudos específicos. Por exemplo, o cobrimento reduzido da armadura de protensão e a eficiência da aderência desta armadura a uma argamassa de granulometria fina, são detalhes que devem ser investigados para se adequarem à utilização da protensão nas peças de argamassa armada.

Portanto, em função das inúmeras vantagens que a associação dos conceitos relativos à argamassa armada e ao concreto protendido em geral pode trazer, e sem perder de vista a possibilidade de ocorrência de diversos problemas dela decorrentes, é que se justifica este trabalho. É um "novo material" que se situa na interface entre a argamassa armada e o concreto protendido, ou que se caracteriza como mais um componente da família dos concretos estruturais. Ele pode ocupar um espaço ainda pouco explorado, tanto em termos de mercado como de pesquisas.

Devido à extensão do tema, o estudo é direcionado para os casos de peças solicitadas predominantemente à flexão e cisalhamento, enfocando apenas protensão por pré-tração, mais afim com este tipo de peça. As diretrizes que devem reger o comportamento das peças de argamassa armada protendida e os principais procedimentos de execução e projeto, são os prescritos nas normas correlatas, NBR-11173 [1990]<sup>1</sup> e NBR-7197 [1989]<sup>3</sup> - Projeto de Estruturas de Concreto Protendido. Não se pretende obedecer rigorosamente a estas normas, o que seria inclusive impossível, já que elas são incompatíveis em alguns tópicos. Isto equivale a dizer que, por exemplo, peças com espessuras maiores que 40mm (não classificadas como de argamassa armada pela NBR-11173), ou peças com níveis de protensão reduzidos, independentemente do tipo de ambiente a elas associadas (em desacordo com a NBR-7197), inserem-se no espírito deste trabalho, e não seriam descartadas no desenvolvimento dos estudos.

## 1.2 - OBJETIVOS

A partir do exposto no item anterior, este trabalho pretende contribuir ao desenvolvimento, aprimoramento e busca de novas técnicas e propostas para os concretos estruturais, incluindo a argamassa armada como mais um membro de referência dessa família. Para isso, sua proposta básica é estudar o comportamento geral de peças de concreto protendido de seção delgada sujeitas predominantemente a esforços de flexão e de

cisalhamento. Deseja explorar o espaço intermediário das peças de argamassa armada e dos pré-moldados protendidos atualmente produzidos no Brasil, e se possível, viabilizar o uso destas peças neste e em outros campos de aplicação.

Um objetivo complementar, mas não menos importante, é a retomada pelo Grupo de São Carlos das experiências em laboratório com peças protendidas, ultimamente interrompidas depois de intensos trabalhos na década de 1960. É o início de um trabalho que visa ao domínio da técnica de protensão no meio acadêmico, amplamente difundido nas fábricas de pré-fabricados de concreto.

### 1.3. APRESENTAÇÃO

No capítulo 2 apresenta-se um resumo dos fundamentos da tecnologia da argamassa armada, para possibilitar ao leitor acesso a informações mínimas necessárias para o projeto e execução das peças deste material, ainda em desenvolvimento e para muitos desconhecido.

Faz-se um breve histórico da argamassa armada, especialmente no Brasil, além do acompanhamento de sua evolução, através do registro das principais obras, reforçando o caráter genuíno do material aqui aplicado. Mostram-se as principais características e propriedades dos materiais constituintes, as técnicas executivas e os procedimentos de projeto, principalmente os referentes às peculiaridades do material.

No Capítulo 3 a exposição é análoga, referente agora ao concreto protendido em geral. Por se tratar de um assunto amplamente difundido, com inúmeras publicações e de um material consolidado, permite-se uma apresentação mais compacta. O enfoque é direcionado aos tópicos mais pertinentes à análise do objeto de estudo do trabalho, as peças delgadas. Abdica-se portanto dos temas relativos a sistemas de protensão por pós-tração, de cabos curvos, de estruturas hiperestáticas e de outros aspectos que por ora não são analisados na sua relação com a argamassa armada. Também os fenômenos específicos relacionados à protensão - cálculo exato das perdas progressivas

por exemplo - que por si só merecem uma exposição detalhada, não são objetivos aqui. O espírito deste capítulo e do anterior é fornecer informações necessárias e suficientes para projetar e executar peças simples de argamassa armada protendida.

Os conceitos gerais da protensão, os tipos e graus de protensão, os materiais constituintes e o cálculo corriqueiro das perdas são apresentados. Finalmente, a execução da protensão e o projeto de peças protendidas, incluindo a escolha do grau de protensão e a análise de estados limites últimos e de utilização, são também apresentados.

No Capítulo 4 efetua-se um estudo das interferências entre os principais conceitos mostrados nos Capítulos 2 e 3, sendo a argamassa armada protendida caracterizada como produto da fusão tecnológica dos materiais e processos de produção, tanto do concreto protendido como da argamassa armada. Há uma breve apresentação das referências bibliográficas sobre a protensão em peças de argamassa armada. Posteriormente, discute-se o potencial de aplicação da argamassa armada protendida, em que se mostram as principais alternativas de produção das peças, que se adequam a uma realidade econômica. A seguir, procura-se especular sobre as situações onde a solução do material seria viável, identificando-se alguns exemplos reais e representativos dessas situações.

São analisadas as perspectivas de um desempenho superior, resultado da conjunção de idéias fundamentais relativas aos dois materiais (argamassa armada e concreto protendido), assim como os problemas que potencialmente podem advir desta combinação. No primeiro grupo, de vantagens, estão entre outros, o aumento da resistência à fissuração - com melhor comportamento em serviço -, a possibilidade de vencer maiores vãos, minimizando a tensão de tração no concreto e a deformação excessiva. No segundo grupo, de desvantagens, a possível instabilidade das paredes delgadas, a fissuração na região da ancoragem e a corrosão da armadura de protensão.

O capítulo está estruturado de modo a analisar principalmente os aspectos que revelam maiores dificuldades de combinar as prescrições das normas NBR-11173 e NBR-7197 e os que

apresentam peculiaridades decorrentes da aplicação da protensão em peças delgadas. São eles: materiais constituintes, argamassa, arranjo de armaduras, espessura, cobrimento, aderência, introdução da protensão, instabilidade, fissuração, deformação e ruptura.

No Capítulo 5 apresentam-se algumas propostas de aplicação da argamassa armada protendida, na forma de exemplos de componentes de uma estrutura para galpão industrial leve pré-moldado, com variadas dimensões. Dentre as várias potencialidades apontadas nos capítulos anteriores, o galpão foi escolhido por ser uma utilização representativa e por contemplar a possibilidade de uso de vários elementos: telhas, painéis e vigas. São desenvolvidos projetos destas peças para atender a uma situação real de projeto.

O Capítulo 6 é um complemento do trabalho, que lhe acrescenta um caráter experimental em adição à investigação teórica, representado pelo ensaio de duas vigas de seção transversal em duplo-T. Foram inúmeras as dificuldades enfrentadas, desde a necessidade de implantação de toda a unidade de protensão - pista, equipamentos, fôrmas, etc - até a inexperiência com o tipo de ensaio. Apesar de serem poucos os modelos ensaiados e não representarem um universo capaz de proporcionar comprovações concludentes, eles apresentam um bom indicativo do comportamento do material.

São apresentados os equipamentos, dispositivos e os principais procedimentos adotados nos ensaios. As duas vigas têm a mesma seção transversal e igual força de protensão. Numa delas se utiliza tela de aço soldada e na outra tela de aço de chapa expandida. A seção adotada é idêntica a de um dos modelos ensaiados por Giongo [1990]<sup>4</sup> e repetida em estudos sobre a aplicação da tela de aço de chapa expandida por Barboza [1990]<sup>5</sup>. Com isso pretende-se comparar os resultados de uma mesma viga, ora armada com tela de aço soldada, ora de chapa expandida, sem protensão nos trabalhos citados, e agora protendidas. Os modelos são dimensionados para se ter o mesmo momento teórico de ruptura que os seus antecessores das pesquisas citadas. Os resultados destes ensaios estão no final deste capítulo.

O Capítulo 7 é reservado para as conclusões decorrentes deste estudo, como fruto tanto da análise do comportamento teórico dos exemplos do capítulo 5 como dos resultados dos ensaios mostrados no Capítulo 6.

Esta pesquisa tem um caráter exploratório sobre as possibilidades de uso da argamassa armada pretendida. Aliado a isto, a novidade da proposta induz a um recorte talvez excessivo no objeto de estudo. Desta maneira, outros temas importantes, aqui relegados a um plano secundário, constituem-se em pesquisas potenciais que poderão dar continuidade a este trabalho. Estão relacionados principalmente aos problemas e dúvidas apontados no Capítulo 4, e outros, apresentados no final deste texto.

## CAPÍTULO 2

### ARGAMASSA ARMADA - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A argamassa armada é um material de aplicação recente, que se desenvolveu mais intensamente nas últimas décadas. Exceto para os centros de pesquisa, ela pode ser considerada ainda uma novidade. Em função disso, este capítulo estende-se um pouco na tentativa de representar o que é hoje a argamassa armada e um pouco a sua história e evolução.

Conforme fica claro no decorrer deste trabalho, o material enfocado tem características muito próximas da argamassa armada. A protensão em peças delgadas introduz alguns novos conceitos; conservam-se porém as principais características da argamassa armada. Justifica-se assim uma conceituação mais detalhada do material.

#### 2.1. HISTÓRICO E EVOLUÇÃO

A origem da argamassa armada data de 1848, quando Joseph Louis Lambot patenteou um material de construção para substituir a madeira em diversas situações: o "ferciment", constituído por uma rede de arames ou barras metálicas encaixadas ou cimentadas, de modo a formar peças de qualquer tamanho. Era o primeiro registro da associação de uma matriz com um reforço metálico. A partir daí, o "ferciment" ficou restrito a poucas aplicações em embarcações e peças artesanais durante quase 100 anos, caracterizando um estado de latência do material. Em conjunto com Nervi, o grande responsável pelo desenvolvimento do material nos anos de 1940, Guido Oberti, professor italiano, realizava estudos experimentais de caracterização do ferro-cimento; seus resultados comprovaram o grande aumento de alongabilidade para taxas de armadura situadas entre 400 e 500 kg/m<sup>3</sup>. Ao contrário, o concreto armado consolidava-se no campo da construção, contando para isso com a contribuição de diversos pesquisadores.

A retomada do desenvolvimento se deu em 1943 com Pier Luigi Nervi, engenheiro italiano. Nervi realizou obras que se caracterizaram pela beleza e ousadia, aproveitando-se das propriedades peculiares do material. O "ferro-cimento" de Nervi substanciava-se em sua "infissurabilidade" e grande alongabilidade, decorrentes de armaduras finamente subdivididas e distribuídas numa matriz muito rica em cimento. Ele utilizava telas de aço com fios de diâmetro de 0,5mm, com malhas de abertura de 10mm. A argamassa tinha consumo de cimento da ordem de 950 a 1200kgf/m<sup>3</sup>. O consumo final de aço era aproximadamente 500kgf/m<sup>3</sup>.

As principais obras de Nervi são descritas por Hanai<sup>2</sup>. A contribuição de Nervi é marcante no desenvolvimento da argamassa armada. Da divulgação de seus estudos e aplicações decorre a transferência da tecnologia pelo mundo.

No Brasil, as primeiras aplicações se deram na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, em 1960, com Martinelli e Schiel. Os primeiros perfis pré-moldados (utilizados para cobertura) apresentaram ótimas características de desempenho nos ensaios realizados. Já com o espírito de adequação à realidade brasileira - quer na redução de custo, com a diminuição do consumo de cimento e aço, quer em sistemas construtivos mais simples - como uma redefinição do ferro-cimento de Nervi, empregou-se um material com características mais próximas da argamassa armada atualmente produzida no Brasil. O principal parâmetro que identifica este fato é o menor consumo de cimento e aço. A utilização de telas com malhas mais abertas e fios mais grossos ocorreu em experiências posteriores. As características principais dos primeiros ensaios efetuados por Martinelli e Schiel são:

- Consumo de armadura: 250kgf/m<sup>3</sup> de argamassa armada;
- Consumo de cimento: 700kgf/m<sup>3</sup> de argamassa;
- telas entrelaçadas com malhas de abertura 12,7mm e fios constituintes de diâmetro 1,25mm;
- barras complementares de diâmetro 4,8mm.

Com estes dados, as primeiras fissuras nas peças de argamassa armada foram observadas com deformações correspondentes a uma relação flecha/vão de 1/100, o que revela a sua grande flexibilidade.

Portanto, o "ferro-cimento" surge no Brasil com uma visão diferenciada. Abandona-se o conceito do sinergismo do material, ou seja, que ele se comporte como um terceiro material que possui novas propriedades, distintas das de seus constituintes. O Grupo São Carlos trabalhou desde o início com uma variante do "ferro-cimento" de Nervi, cujo uso se intensifica; conserva porém os conceitos qualitativos que envolvem o material, no Brasil denominado argamassa armada.

A partir daí surgem inúmeros estudos e aplicações que firmaram o grupo de pesquisas dedicado ao desenvolvimento da tecnologia. Constituem-se obras importantes deste período inicial a cobertura da Fábrica de Laticínios de São Carlos (1975), a cobertura do Terminal Rodoviário de Florianópolis (1980), os reservatórios de Araraquara, São Carlos e Americana (1980). Neste contexto se introduziu uma nova tipologia para as telas, agora com fios mais grossos e malhas mais abertas; o material aproxima-se das características do concreto armado; as diferenças com os experimentos internacionais se acentuam.

Porém, é com o arquiteto João Filgueiras Lima (Lelé) que a argamassa armada ganha um maior impulso e vive sua grande fase; ao penetrar de fato no mercado, sua utilização se dá em maior escala. Em 1980 ele dirigiu a equipe da RENURB - Companhia de Renovação Urbana de Salvador - e com a ajuda de Frederico Schiel para dimensionar os elementos, implantou um sistema construtivo singular de urbanização de favelas no Vale de Camurugipe. Esta intervenção caracteriza e retrata muito bem a idéia que se aborda na investigação do potencial da argamassa armada protendida. São soluções inovadoras em situações atípicas, com interferências mínimas ao local da intervenção, que respeitam uma situação vigente. A obra envolveu a execução de escadarias com função adicional de drenagem e de canais no fundo do vale, para escoar o esgoto pluvial e sanitário, garantindo as condições de estabilidade ao controlar a erosão

das encostas. As estruturas eram pré-moldadas, a menos de pequenas concretagens "in loco" para concluir a montagem.

Após trabalhar em Goiás, num sistema construtivo para a execução de "Escolas Transitórias", Lelé coordenou a instalação da Fábrica de Escolas do Rio de Janeiro em 1983, cuja produção chegou a 600m<sup>2</sup>/dia de elementos pré-fabricados. Também em Salvador, trabalhou na construção de creches e outros equipamentos comunitários. A sua trajetória é o retrato de uma contribuição que extrapola os limites do desenvolvimento da argamassa armada e consolida sua significação num âmbito mais amplo da Engenharia e Arquitetura.

Atualmente a argamassa armada situa-se num estágio bastante evoluído. Seus conceitos e características se ampliam e renovam continuamente. Hoje é possível afirmar com convicção que é um material genuíno, à margem da interpretação internacional predominante; as transformações e adaptações a partir do "ferro-cimento" de Nervi resultam num produto próximo ao concreto armado, pelo menos enquanto análise das propriedades mecânicas.

Neste contexto de interpretação atual da argamassa armada e sabendo-se que, via de regra, um material só é viável quando os custos são competitivos, justifica-se o direcionamento das pesquisas e da própria tecnologia para um produto mais barato, atendidos os requisitos mínimos de desempenho. É a perspectiva de se ter na argamassa armada uma alternativa, cuja potencialidade resulta de suas características peculiares, especialmente a leveza, pré-moldagem, baixa permeabilidade e fissuração controlada.

Algumas pesquisas representativas do estágio atual da argamassa armada no Brasil são encontradas em El Debs [1986]<sup>6</sup>, que propõe uma solução alternativa de galerias enterradas em argamassa armada; em Migliore Jr [1987]<sup>7</sup>, sobre estruturas de contenção em argamassa armada; em Libório [1990]<sup>8</sup>, que estuda a patologia das obras de argamassa armada no Brasil; entre tantas outras que contribuem para o aprimoramento das técnicas.

Mesmo que pareça insistente a tentativa de definir e justificar claramente a situação atual da tecnologia do

material, há mais um enfoque que justifica a escolha das taxas de armadura menores. No desenvolvimento da argamassa armada, diante das duas alternativas, a de se adotar taxas elevadas e intensamente subdivididas, que garanta a uniformidade em toda a seção e retarde o aparecimento de fissuras macroscópicas (além de requerer cobrimentos reduzidos), e a de trabalhar com taxas menores, esta segunda opção que contempla o menor consumo é principalmente uma imposição de custos. Amparada num comportamento satisfatório atestado por obras e ensaios, ela se consolida e se apresenta como a mais viável.

Estas idéias de adequação da argamassa armada são gerais, conceituais. A dosagem dos materiais constituintes não é uma receita rígida; ao contrário, os consumos de cimento e aço são determinados, dentro deste contexto, principalmente pelos requisitos de desempenho.

As pesquisas em desenvolvimento envolvem diversos parâmetros intervenientes no comportamento da argamassa armada. Tópicos relativos à corrosão das armaduras, tipos de agregados e de telas e qualidade da argamassa são investigados na busca de resultados continuamente melhores, na tentativa de se desvendar completamente a tecnologia do material. Este trabalho situa-se no mesmo contexto e procura, além de apresentar um quadro geral da argamassa armada e as potencialidades que a introdução da protensão proporciona, viabilizar a aplicação do material em situações ainda inadequadas, ou apenas otimizar o seu desempenho e o comportamento em geral.

## 2.2. CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES

As características e propriedades da argamassa armada aqui abordadas referem-se basicamente aos materiais constituintes, às técnicas de execução e aos procedimentos de projeto. São tratados sucintamente, de modo a proporcionar um bom entendimento na análise posterior das peças protendidas delgadas, onde esses conceitos direcionam-se à interface das peças de concreto protendido e de argamassa armada. Aqui eles devem cumprir o objetivo de retratar a argamassa armada. Ao

mesmo tempo, introduzir e preparar a introdução da protensão, quando surgem detalhes inerentes a ela, mantendo porém praticamente todas as características analisadas a seguir. Os procedimentos de projeto abordados são o mínimo necessário para o dimensionamento dos protótipos e dos exemplos aplicativos.

### 2.2.1. MATERIAIS

Além das proporções em que são utilizados, importa muito o tipo de cada material constituinte da mistura. As propriedades finais são portanto resultado da influência das quantidades e das tipologias empregadas.

#### 2.2.1.1. ARGAMASSA

A qualidade da argamassa é relevante em toda obra estrutural, pois além de influenciar na resistência, ela é determinante na durabilidade, atuando como o principal agente de proteção das armaduras contra a corrosão. Também a cor e a textura das peças aparentes são caracterizadas a partir deste parâmetro. Em peças de argamassa armada a sua importância se acentua conforme mostra a leitura desse texto.

A permeabilidade a líquidos e gases não se dissocia da argamassa, por menor que seja a sua manifestação. As limitações e dificuldades na execução das peças podem agravar as microfissuras pré-existentes decorrentes de bolhas de ar, poros ou falhas de aderência; por isso as técnicas executivas assumem maior relevância. Quando se analisa o pequeno cobrimento das peças de argamassa armada (mas que deve ser suficiente para garantir a proteção da armadura e a segurança da peça), prioriza-se a utilização de argamassas de alta qualidade e resistência que, tendo sua fissuração controlada através de armadura difusa, cumpre sua função protetora a contento. As proporções usuais de cimento e agregado miúdo que têm atendido essas exigências situam-se entre 1:2 e 1:3, com consumos de cimento da ordem de  $700\text{kgf/m}^3$  a  $500\text{kgf/m}^3$  respectivamente; complementarmente, considera-se um limite de 0,45 para relação

água/cimento.

Identificadas portanto as duas propriedades finais da argamassa mais importantes na definição da sua qualidade, ou seja, a resistência e a compacidade (que indiretamente mede a sua permeabilidade), deve-se investigar com maior rigor os procedimentos para torná-las satisfatórias.

Em relação à resistência da argamassa existem vários fatores que participam ativamente na determinação do seu valor; os principais são a relação água/cimento, a relação cimento/agregado e as características do agregado. As características desejáveis para o agregado são avaliadas no item 2.2.1.4, quando se trata do tema especificamente.

O fator água/cimento é primordial na resistência da argamassa e sua importância se estende à qualidade final, pois influencia sobremaneira também a porosidade, além de ser determinante na consistência da pasta fresca e na trabalhabilidade da mistura. Desde que se consiga uma trabalhabilidade e adensamento satisfatórios, quanto menor o fator água/cimento maior a resistência mecânica da argamassa. Porém, esta afirmação não é totalmente correta. Neville [1982]<sup>9</sup> explica com detalhes que, dada a multiplicidade de parâmetros envolvidos no fenômeno, isto nem sempre é verdade. Para misturas com baixo valor de água/cimento e ricas em cimento, as tensões devidas à retração são maiores e podem resultar em resistências menores (a restrição que os agregados oferecem a estas tensões provocam fissuras na pasta de cimento ou perda da aderência da pasta com o agregado). Para situações com relação água/cimento iguais, a quantidade total de água é maior no traço mais rico em cimento; portanto os vazios ocupam maior volume na argamassa, prejudiciais à resistência. São exemplos que ilustram a explicação de Neville.

Quanto à relação cimento/agregado, no aspecto de resistência indica-se um alto consumo de cimento. Porém, não se pode dissociar completamente os fatores característicos da qualidade da argamassa, em especial aqui a sua resistência e compacidade. Estes fatores não são independentes, estanques. Ao contrário, eles se integram, e de um conjunto harmonioso é que

se tem um produto de alta qualidade. Assim, em relação à compacidade, que foi definida como a outra característica fundamental da qualidade da argamassa, a solução para se alcançar uma pasta pouco porosa (e portanto quase impermeável) aponta procedimentos semelhantes, de alto consumo de cimento, mas com enfoque um pouco diferente.

Para se alcançar argamassas pouco porosas é necessário haver um controle maior da fissuração decorrente da retração, cujo fenômeno é mais intenso em elementos com grande superfície exposta e em misturas ricas em cimento. Antes da pega do cimento ocorre a retração plástica, que consiste na redução do volume do sistema cimento e água. Sua ocorrência é intensificada com a evaporação da água de superfície (que potencializa a formação das fissuras de superfície). Daí vem a importância de se iniciar rapidamente as atividades para a cura das peças, tão logo seja completado o adensamento. As fissuras advindas deste tipo de retração também podem ser devidas à obstaculização da armadura a esta deformação.

Uma outra modalidade de retração é a que ocorre por secagem e está relacionada com o equilíbrio higrotérmico. Ela é parcialmente irreversível. É mais relevante em peças com grande superfície exposta ao ambiente e em misturas com quantidades elevadas de água (quer seja por um alto consumo de cimento, que exige mais água, ou por um fator água/cimento excessivo).

Portanto, do que foi exposto ficam algumas conclusões importantes que proporcionam a resistência mecânica e compacidade adequadas.

- fator a/c baixo, o mínimo necessário para se ter trabalhabilidade satisfatória e conseguir um adensamento eficiente;

- mistura razoavelmente rica em cimento, para se ter alta resistência, mas retração minimizada;

- composição granulométrica bem graduada ou com adição de parcela de agregado mais graúdo (pedrisco por exemplo).

Esta última recomendação visa a diminuir a quantidade total de água necessária, sem abdicar de uma pasta rica em cimento. Seguí-las todas não garante uma argamassa de alta

qualidade, mas com certeza o êxito é alcançado se outros cuidados na execução forem tomados (principalmente no adensamento e cura) e a qualidade individual de cada constituinte da mistura for garantida.

Em trabalho recente, Libório<sup>8</sup> recomenda a diminuição no consumo de cimento para preservar a durabilidade das peças, frequentemente comprometida com a retração e conseqüente fissuração. Esta recomendação é enfática, colocada como indispensável à qualidade das obras.

#### 2.2.1.2. CIMENTO

Para as situações gerais utiliza-se basicamente o Cimento Portland Comum. Eventualmente pode ser aconselhável, às vezes imprescindível, o uso de cimentos especiais, ora em função de requisitos de desempenho, ora do processo executivo. Dos cimentos especiais destaca-se principalmente o Cimento de Alta Resistência Inicial (ARI), além do Pozolânico e do Alto Forno.

O cimento ARI é especialmente indicado quando se deseja que a resistência mecânica se desenvolva com maior velocidade, ou seja, que nas primeiras idades ela já seja significativa. É possível obter resistência mecânica superior a 20MPa após 24 horas, mesmo com cura normal. Com cura a vapor, que cria condições para acelerar as reações de endurecimento, a velocidade é ainda mais acentuada. Esta propriedade do cimento ARI é imprescindível na produção de elementos pré-moldados em escala, onde o prazo para a desforma deve ser curto. Evita-se com isso o uso de aditivos aceleradores de pega (muitas vezes com cloretos, proibitivos para argamassa armada devido à possibilidade de corrosão). Se além de pré-moldada a peça for protendida, o uso do cimento ARI é quase obrigatório, indicando-se também a cura a vapor, já que o elemento deve ter resistência suficiente para absorver o esforço da protensão nas primeiras idades. É um tipo de cimento largamente utilizado nas fábricas de pré-moldados.

O Cimento Pozolânico e o de Alto Forno são particularmente indicados para a obtenção de argamassas mais

impermeáveis, mas podem prejudicar no aspecto da corrosão (possível diminuição da alcalinidade) e carbonatação respectivamente. Não são usualmente empregados em peças de argamassa armada.

### 2.2.1.3. ADITIVOS

Os aditivos são produtos que, adicionados à argamassa na etapa de sua execução em condições e quantidades adequadas, melhoram permanentemente algumas de suas propriedades, referentes à mistura fresca ou endurecida. O emprego dos aditivos deve ser criterioso pois pode haver efeitos indesejáveis.

Em peças de argamassa armada a utilização de aditivos é ainda restrita, limitando-se a algumas aplicações esparsas. Dentre eles, destaca-se principalmente os plastificantes e a microssílica. Dos plastificantes interessa a possibilidade de redução da água de amassamento, de modo a preservar a trabalhabilidade requerida. Dessa forma obtém-se argamassas mais resistentes, impermeáveis e duráveis.

Já a microssílica, cujas perspectivas são excelentes para os concretos estruturais em geral, proporciona a obtenção de misturas muito resistentes, superiores a 100 MPa na compressão simples. Também a compacidade, a impermeabilidade e a durabilidade são favorecidas, pois o grau de finura da microssílica é muito baixo (superfície específica aproximadamente igual a sessenta vezes a do cimento normal) e não favorece a retração.

O uso de aditivos, apesar de aumentar o custo da argamassa, pode ser viável, pois no custo final do elemento a parcela da argamassa não é preponderante. Além disso, a argamassa de boa qualidade é uma necessidade em peças de argamassa armada.

#### 2.2.1.4. AGREGADOS

O agregado normalmente utilizado em argamassa armada apresenta granulometria em concordância com a respectiva Norma<sup>1</sup>, que limita a dimensão máxima em 1/4 da menor espessura da peça e 1/2 da menor abertura da tela simples ou da abertura resultante das telas quando justapostas. Com relação aos requisitos de resistência e grau de pureza, segue-se o disposto na NBR- 6118 e NBR-7211 (Agregados para concreto - Especificações) [1983]<sup>10</sup>.

A areia natural ou artificial deve ser dosada em função do que se deseja caso a caso. As parcelas miúda e gráuda (areia fina e areia grossa) variam então com a aplicação. Porém, conforme se argumenta no item 2.2.1.1, é sempre interessante ter areias bem graduadas para se obter melhor qualidade da argamassa. Também a introdução do pedrisco pode ser uma ótima alternativa para minorar problemas de retração e para melhorar a consistência da argamassa.

Além da granulometria, a forma dos grãos é importante na escolha do tipo de agregado. As formas lisas e arredondadas proporcionam argamassas mais plásticas e possibilitam a redução do fator água/cimento. As ásperas e irregulares melhoram a resistência à tração e ao desgaste, já que a aderência com a pasta é melhor. Diante disso, salvo situações particulares que priorizem algumas dessas propriedades, o agregado indicado é aquele que apresenta parcelas dos dois tipos, de modo a se ter uma argamassa que contemple satisfatoriamente estas propriedades. Destaca-se também a inadequação das partículas com formas lamelares.

#### 2.2.1.5. ARMADURA

A armadura das peças de argamassa armada distingue-se claramente em duas categorias: difusa e discreta. A armadura difusa é geralmente constituída de telas de aço e a discreta de barras de aço de pequeno diâmetro

Os fios e barras de aço são os mesmos tradicionalmente utilizados em estruturas de concreto armado. Devem garantir a

segurança à ruína dos elementos estruturais, juntamente com as telas, normalmente insuficientes neste aspecto. Também auxiliam na limitação da deformação (consequentemente no controle da fissuração) e são elementos de enrijecimento do conjunto que compõe a armadura, facilitando o processo de montagem. A contribuição da armadura discreta se dá de forma concentrada.

A armadura difusa composta pelas telas de aço é a principal responsável por uma configuração de fissuras finas e pouco espaçadas. Também cumpre a função de resistir aos esforços de tração (e compressão), juntamente com a armadura discreta. As telas mais usadas são as de aço soldadas. Há entretanto alternativas de telas de aço de chapa expandida e telas de aço tecidas (com malhas quadradas, retangulares ou losangulares).

A tela de aço soldada é constituída de fios retilíneos que formam malhas retangulares, soldados entre si nos pontos de cruzamento. A sua utilização mais intensa é justificada por vários fatores:

- produção industrial controlada;
- produto devidamente normalizado;
- apoio no fornecimento do material para a realização de pesquisas, através do IBTS- Instituto Brasileiro de Telas Soldadas, fundado em 1984 pelas fábricas produtoras;

As telas disponíveis no mercado têm características diversas das utilizadas internacionalmente em peças de argamassa armada. Os fios são mais grossos e as malhas maiores. A tela mais subdividida produzida regularmente no Brasil é composta de fios com diâmetro de 2,0mm e malha retangular de 25mm x 50mm. A impossibilidade da produção de malhas menores e com fios mais finos decorre da ausência de equipamentos mais modernos e adequados. Segundo Hanai<sup>2</sup>, as fábricas alegam que o ônus do investimento só se justifica com uma demanda compatível.

A tela de aço de chapa expandida, tradicionalmente empregada em estuques, é obtida através do corte de chapas finas de aço com posterior abertura das malhas, resultando formas aproximadamente losangulares ou hexagonais. O processo de fabricação lhe confere uma grande versatilidade, ao possibilitar

a obtenção de malhas com qualquer abertura, com a área de seção de aço desejada, já que também a espessura da chapa pode ser controlada. A possibilidade de produção em larga escala, num processo mais rápido e barato que o das telas soldadas, indica potencialidades e perspectivas animadoras no uso desta tela em peças de argamassa armada.

Em relação ao comportamento mecânico da tela de aço de chapa expandida constata-se, de imediato, um rendimento inferior, comparado à tela soldada. Quando elas são solicitadas na direção da expansão, há uma tendência de rasgamento dos nós das malhas. Na outra direção a tendência é de fechamento da malha ; no caso da tela estar envolvida totalmente na argamassa, esta funciona como obstáculo ao movimento da tela e pode impedir o fechamento da malha. Porém, podem surgir fissuras decorrentes do fendilhamento da argamassa devido ao esforço transmitido pela tela. Estas informações encontram-se em Barboza<sup>5</sup>.

Ainda que haja a possibilidade de fendilhamento, a resistência e o desempenho nesta segunda direção são superiores. Para compensar a menor eficiência na direção da expansão, associa-se outro material para complementar a resistência requerida, que pode ser armadura discreta ou difusa (tela soldada). Também a protensão pode ser este elemento de reforço, alternativa que é avaliada neste trabalho.

As telas tecidas são formadas por fios entrelaçados em malhas retangulares ou hexagonais. Elas já foram muito usadas em peças de argamassa armada quando ainda eram poucas as opções de telas. Hoje ela está em desuso, especialmente para as situações de maior responsabilidade, devido principalmente à sua qualidade duvidosa, sem controle de fabricação. Sua aplicação fica relegada a pequenas obras artesanais ou rurais e não há perspectivas imediatas de desenvolvê-la.

#### 2.2.1.6. OUTROS MATERIAIS

Há outros itens a serem abordados referentes a detalhes frequentemente presentes em projetos e obras de argamassa armada. São procedimentos relacionados à durabilidade,

que quase sempre implicam em acessórios especiais: espaçadores de cobrimento, proteção especial de armadura, revestimentos, etc. Para estas informações, recomenda-se a consulta de bibliografia mais especializada; neste trabalho, são apenas mencionadas algumas delas, quando se analisam técnicas normalmente empregadas na execução de peças de argamassa armada.

## 2.2.2. TÉCNICAS DE EXECUÇÃO

Sem a preocupação de analisar a questão da adequação tecnológica do material, os procedimentos e requisitos técnicos para a produção de peças de argamassa armada de boa qualidade são tratados aqui de maneira a englobar os vários parâmetros e procedimentos que determinam as condições finais da peça, ou seja, a argamassa, a armadura, as fôrmas, os equipamentos, a mão-de-obra e a produção como um todo. As indicações referem-se principalmente a técnicas atuais, direcionadas para fabricação em série, ainda que se utilizem equipamentos mais simples. Em cada uma das etapas do processo produtivo discorre-se sobre as suas peculiaridades e conseqüências na qualidade do produto, além dos equipamentos necessários. As etapas são divididas em:

- Fôrmas;
- Montagem da armadura;
- Lançamento da argamassa;
- Adensamento;
- Cura;
- Outros (reparos, estocagem, transporte).

### 2.2.2.1. FÔRMAS

As fôrmas podem ser simples ou duplas, fixas ou móveis; ou mesmo podem não existir, quando a argamassa é lançada diretamente sobre a armadura, neste caso um conjunto mais rígido. Esta última opção pode ser conveniente em casos de superfícies complexas com produção não seriada e nas construções artesanais; não se constitui em tópico de interesse neste trabalho.

As fôrmas simples ficam em contato com a argamassa apenas em parte da superfície dos elementos; portanto necessitam de um acabamento complementar nas faces livres, que pode ser manual ou com equipamentos apropriados (régua, gabarito, carro adensador-acabador). As fôrmas podem ser de aço, alvenaria, madeira ou argamassa. As de alvenaria devem receber uma capa de argamassa sarrafeada com gabarito de aço e alisada com pasta de cimento.

As fôrmas simples são utilizadas com frequência, devido ao menor custo e qualidade satisfatória. Ainda que não sejam propriamente para argamassa armada, as fôrmas empregadas nas fábricas de pré-moldados são bastante ilustrativas. São normalmente metálicas, apoiadas e solidarizadas em berços de concreto muito rígidos. A precisão dimensional e a superfície acabada são excelentes.

As fôrmas duplas (ou envoltentes) envolvem praticamente toda a superfície do elemento, exceto uma pequena abertura por onde se introduz a argamassa, que muitas vezes percorre caminhos extensos. A possibilidade de ocorrer a segregação da argamassa deve ser considerada, especialmente em peças maiores. Nestas condições indica-se o uso de argamassa mais plástica, inclusive com o uso de aditivo. As experiências com este tipo de fôrma atestam a ocorrência de poucos problemas com a segregação.

Em relação à mobilidade das fôrmas, isto é, das faces constituintes da seção transversal, ela depende principalmente do tipo de seção e da operação de desforma. As fôrmas móveis possibilitam desforma mais simples e para seções complexas ela é praticamente imprescindível.

Qualquer que seja o tipo, a fôrma deve ser rígida para obedecer à tolerância dimensional; deve ter uma conformação tal que permita a desforma com facilidade, sem introduzir esforços nas peças; e deve ser estanque, principalmente nas juntas, para evitar vazamento de nata.

## 2.2.2.2. MONTAGEM DA ARMADURA

A montagem da armadura normalmente é executada em bancadas, onde as telas e fios (barras) devem ser cuidadosamente amarrados. Os espaçadores de cobertura (geralmente plásticos) e os eventuais conectores metálicos também são previamente fixados na armadura antes de levá-la às fôrmas. O corte das telas pode ser feito com tesouras, alicates ou guilhotinas. Para o dobramento, um método que reúne simplicidade e eficiência é o que utiliza mesas de dobramento manual. É um dispositivo composto de perfis de aço soldados, basculantes na aresta da dobra. Uma vez montado, o conjunto é levado até a fôrma para o ajuste final, inclusive com a colocação de mais espaçadores de cobertura nos locais onde houver necessidade.

Especial atenção deve ser dispensada ao controle do cobertura especificado no projeto, pois ele se constitui num item essencial em peças de argamassa armada. É imprescindível que seja obedecido o cobertura mínimo estabelecido, para se garantir a durabilidade da peça. Nos casos em que o conjunto da armadura não é muito rígido, é difícil mantê-lo na posição correta sem o uso de espaçadores. Em situações extremas, mesmo com eles pode haver dificuldades no alinhamento, agravadas com o adensamento, que induz a um afastamento da armadura em relação à superfície da fôrma. Uma solução alternativa é a disposição de barras complementares construtivas para o enrijecimento do conjunto. A pré-tração da armadura ativa e posterior amarração dos fios das telas a ela, também pode resolver o problema a contento.

### 2.2.2.3. LANÇAMENTO E ADENSAMENTO

As operações de lançamento e adensamento são peculiares ao processo produtivo. A recomendação geral é de evitar a segregação da argamassa no lançamento, adotando para isso os procedimentos constantes na NBR-6118 - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado [1980]<sup>11</sup>. Já o adensamento deve ser tal que proporcione uma mistura homogênea, sem segregação, ninhos ou falhas nos cantos da fôrma.

Para o adensamento, podem ser utilizados motovibradores sobre fôrmas, mesas vibratórias, extrusoras ou outro equipamento adequado a peças de pequena espessura e grande superfície.

### 2.2.2.4. CURA

A cura consiste num conjunto de procedimentos para manter adequadas as condições de temperatura e umidade, de modo a propiciar condições físicas para a argamassa adquirir suas propriedades desejadas. Também deve retardar o desenvolvimento da retração.

A umidade deve tender sempre à saturação, para minimizar a evaporação da água, que dá origem aos vazios. Sabe-se que a relação água/cimento deve ser baixa para resultar argamassas de boa qualidade. Em qualquer caso, Neville<sup>9</sup> afirma que só metade da água da pasta pode ser mobilizada para a reação química, mesmo que a quantidade total seja menor que a mínima. Assim, deve-se evitar qualquer perda de água, que seria prejudicial ao endurecimento. A umidade elevada contribui então no acréscimo da água de combinação química.

A temperatura influencia o processo em dois aspectos, que infelizmente são antagônicos e dificultam a escolha de uma temperatura ideal. Sendo elevada, ela contribui para a hidratação do cimento, porém favorece a evaporação. Como esta é particularmente prejudicial no início da cura (causa diminuição da resistência a partir do sétimo dia), recomenda-se que altas temperaturas só devam ocorrer após um período sob temperatura

ambiente, em caso de adotar-se cura térmica. Estas conclusões são resultados de experimentos relatados por Neville<sup>6</sup>.

Após o adensamento deve-se iniciar rapidamente o processo de cura das peças, que é especialmente importante em argamassa armada devido à pequena magnitude da relação volume/superfície e do usual elevado consumo de cimento. A cura influencia tanto as propriedades do material, principalmente resistência e retração, quanto aspectos relativos ao custo, dependentes do processo produtivo. Os principais tipos de cura são:

- cura por aspersão ou irrigação;
- cura por cobertura;
- cura por imersão;
- cura térmica.

Praticamente todas estas alternativas estão contempladas nas aplicações correntes e estão intimamente relacionadas com o tipo de produção. A cura por aspersão requer um acompanhamento constante, e portanto está sujeita a imprevistos com maior frequência.

A cura por cobertura consiste em colocar sacos de areia ou serragem, ou lonas, permanentemente úmidos, sobre as peças para preservar as condições favoráveis (temperatura e umidade) para as reações de endurecimento.

A cura por imersão é bastante eficiente e tem sido muito empregada nas aplicações de argamassa armada. Porém traz o inconveniente de exigir tanques de cura que eventualmente ocupam áreas extensas, às vezes inviáveis. Recomenda-se neste processo que a cura se dê em duas etapas: a primeira com a imersão do conjunto peça/fôrma no tanque, para evitar as fissuras decorrentes da deformação diferencial do material da fôrma e da peça. Assim que a peça adquira condições de resistência que permita a desforma, a fôrma é liberada.

Numa segunda etapa, a peça (agora livre da fôrma) é novamente imersa em tanque, ali permanecendo por pelo menos mais 7 dias. É muito comum o uso de pórticos rolantes manuais para o transporte das peças e fôrmas, inclusive no auxílio da desforma.

É possível também a utilização de tanques com água aquecida para acelerar o processo; não há porém registros de maiores aplicações desta alternativa, que já representa um tipo de cura acelerada.

A cura térmica é quase um privilégio das fábricas de pré-moldados, sendo que a cura a vapor é a principal alternativa, com utilização crescente inclusive em instalações mais modestas.

A cura a vapor é principalmente importante para acelerar a produção, pois possibilita a liberação da protensão (se existir) e das fôrmas rapidamente. Consegue-se utilização diária das fôrmas, otimizando o processo produtivo.

Num sistema de cura a vapor, o equipamento deve controlar a temperatura de modo a evitar variações bruscas, e deve manter a umidade em valores próximos à saturação. Além disso, não pode prejudicar a superfície da peça, seja pelo contato direto, seja pelo gotejamento.

A aplicação do vapor distingue-se em 4 fases na cura a vapor à pressão atmosférica, conforme a figura 2.1 :

- $T_0$ : tempo após a concretagem até o início do aquecimento;
- $T_1$ : tempo de elevação gradual da temperatura;
- $T_2$ : tempo de manutenção da temperatura máxima constante;
- $T_3$ : tempo de resfriamento gradual da temperatura.

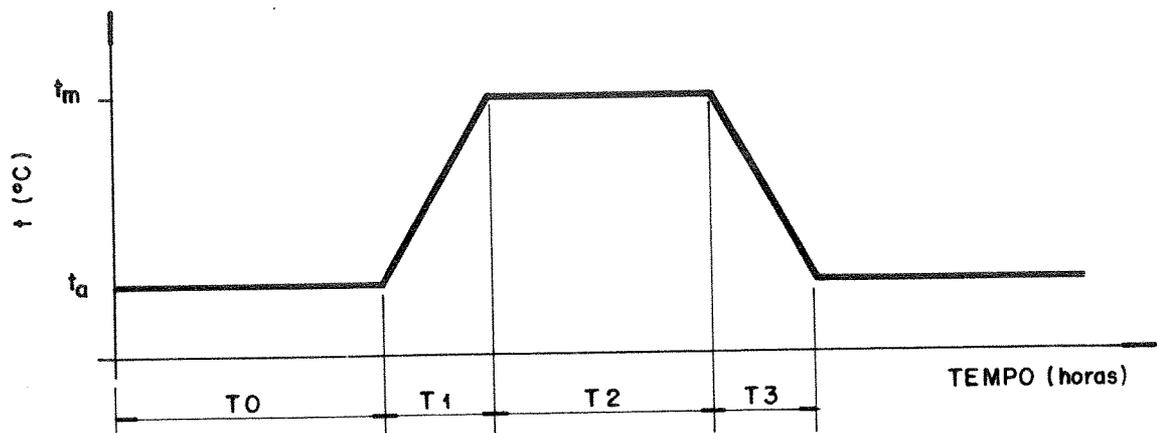


Fig.2.1 - Cura a vapor: variação da temperatura

Para resguardar o material contra choques térmicos recomenda-se que o aquecimento e o resfriamento sejam graduais. A NBR-9062 - Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-moldado [1985]<sup>12</sup> recomenda variações máximas de 20°C/hora e 30°C/hora respectivamente, que resultam em  $T_1 \cong 2,5$  horas e  $T_3 \cong 2$  horas. Os valores de tempo e temperatura de cada fase dependem basicamente de:

- tempo e temperatura da fase anterior;
- tipo de peça: fôrma, espessura, volume, relação espessura/volume;
- dosagem, tipo de cimento, fator água/cimento.

Como referência, os valores médios empregados nas indústrias, segundo Vilagut [1975]<sup>13</sup> são:

- $T_0$ : 5 a 7 horas;
- $T_1$ : 2 a 8 horas;
- $T_2$ : 4 a 7 horas;
- $T_3$ : 4 a 8 horas.

Isto resulta num ciclo de 15 a 30 horas, sendo portanto possível a utilização diária (24 horas) de um conjunto de fôrmas.

#### 2.2.2.5. OUTROS ASPECTOS

O ciclo de produção das peças de argamassa armada termina com uma inspeção visual cuidadosa para detectar possíveis falhas, maiores e mais frequentes quanto mais rudimentar for o processo produtivo. Os retoques podem ser feitos com argamassa de cimento, areia e aditivo à base de PVA. Só então as peças são liberadas para estoque e/ou transporte.

Finalmente, é importante salientar que o controle de qualidade nos elementos de argamassa armada deve ser bastante rigoroso em obras estruturais ou de responsabilidade, em virtude da pequena espessura, do cobrimento reduzido e de requisitos de desempenho normalmente mais elevados.

### 2.2.3. PROCEDIMENTOS DE PROJETO

Os tópicos relativos ao projeto de peças de argamassa armada que são agora analisados envolvem aspectos gerais de composição estrutural, disposições construtivas (tolerância dimensional, detalhes de arranjo, emendas e ancoragem de armadura) e principalmente critérios para o dimensionamento dos elementos.

#### 2.2.3.1. COMPOSIÇÃO ESTRUTURAL

O sistema estrutural ideal é aquele que aproveita a potencialidade das formas na sua contribuição à resistência e rigidez do conjunto. Segundo a idéia de Nervi, registrada em Hanai<sup>2</sup>, "a concepção da estrutura deve resultar da adequação de sua forma à tipologia das ações que produzem solicitações mecânicas".

Em argamassa armada há formas e combinações estruturais que lhe são mais afins, enquanto análise das propriedades do material e das respostas dele às solicitações a que está submetido. As principais alternativas estruturais são analisadas a seguir.

As cascas são estruturas fundamentadas em conceitos e técnicas característicos de espessura reduzida, cuja resistência é resultado de formas favoráveis, que absorvem as solicitações de modo a lhes submeter a tensões que o material pode suportar. Em outras palavras, as cascas devem ter uma forma tal que, quando solicitadas, fiquem sujeitas predominantemente a tensões contidas num intervalo em que o material é mais eficiente; no caso de concreto ou argamassa, tensões de compressão.

As cascas têm um vasto campo de aplicação em coberturas. Algumas obras de Nervi já se utilizaram de cascas nervuradas onde os elementos pré-moldados de argamassa armada servem como fôrma, e são posteriormente incorporados à estrutura. A associação de partes planas constituindo estruturas de folhas poliédricas, que podem ter perfil simples, com dobras e nervuras de rigidez, ou com concepção mais arrojada, são

também uma referência para projetos em argamassa armada: ambos, cascas e argamassa armada, têm em comum conceitos de pequena espessura e grande superfície.

Além das opções em estruturas laminares, os perfis combinados formando estruturas lineares (especialmente as pré-moldadas) compõem a maioria das aplicações em argamassa armada, seja como elemento suporte de outros componentes ou associado a eles. Neste mesmo modelo linear, a treliça, que é uma estrutura tipicamente de barras, pode ser mais estudada, visto que a redução do peso num sistema em argamassa armada pode viabilizar tentativas anteriores em concreto armado. Apesar do inconveniente das barras tracionadas, sempre existentes, aliando-se o alto desempenho da argamassa com a alternativa de protensão nas peças mais solicitadas, por exemplo, do banzo inferior, a experiência pode dar bons resultados.

Finalmente, o emprego da argamassa armada como elemento de fôrma, principalmente quando incorporado à estrutura através de ligações adequadas de concreto moldado no local às peças pré-moldadas, colaborando na resistência global. Mesmo que não haja a fusão entre as partes, não se deve minimizar esta função "secundária" da atuação como fôrma, constantemente uma parcela significativa no custo da estrutura, justificando o estudo de outras alternativas que não as tradicionais.

#### 2.2.3.2. DIMENSÕES

As dimensões das peças de argamassa armada devem estar adequadas às condições de solicitação, ao tipo de peça e ao ambiente em que está exposta. Especialmente para o cobrimento e a espessura, existem alguns indicativos auxiliares para a sua determinação.

A espessura de um elemento fica determinada tendo fixados os seguintes parâmetros:

- espessura do cobrimento da armadura;
- tolerância dimensional;
- tipo e número de telas e fios complementares;
- arranjo das armaduras.

Para o cobrimento, a norma brasileira de argamassa armada recomenda valores que dependem do tipo de ambiente. Para ambiente não agressivo, o cobrimento mínimo é de 4,0mm ; para local pouco agressivo, o valor mínimo é 6,0mm ; e para ambiente muito agressivo, a utilização de peças de argamassa armada fica condicionada a cuidados especiais com a proteção da armadura, como pinturas superficiais ou revestimento. A caracterização dos tipos de ambiente mencionados é a seguinte, conforme a NBR-7197:

- Ambiente não agressivo: como no interior dos edifícios em que uma alta umidade relativa somente pode ocorrer durante poucos dias por ano, e em estruturas devidamente protegidas.

- Ambiente pouco agressivo: como no interior de edifícios em que uma alta umidade relativa pode ocorrer durante longos períodos, e nos casos de contacto da face de concreto próxima à armadura protendida com líquidos, exposição prolongada a intempéries ou a alto teor de umidade.

- Ambiente muito agressivo: como nos casos de contato com gases ou líquidos agressivos ou com o solo e em ambiente marinho.

Além do limite inferior do cobrimento da armadura, que deve garantir a proteção e a durabilidade das peças, é necessário estabelecer um valor limite máximo de referência, de modo a garantir a eficiência da armadura difusa no controle da fissuração. Não há um valor especificado na NBR-11173<sup>1</sup>, e enquanto não se tem informações experimentais mais concludentes, pode-se adotar um limite de 10mm como referência inicial.

Em relação à tolerância dimensional para as peças pré-moldadas, as indicações da NBR-11173 são similares às constantes na NBR-9062, exceto para a tolerância máxima na espessura,  $\pm 3\text{mm}$  (sempre menor que 10% da espessura da peça) e no cobrimento,  $\pm 2\text{mm}$ , para as peças de argamassa armada.

Para observar a tolerância dimensional exigida deve-se priorizar os procedimentos e técnicas de execução, que aliados à mão-de-obra e equipamentos adequados, determinam o controle da qualidade das obras.

No arranjo das telas há várias combinações possíveis, conforme o número e o tipo das telas. As soldadas são comumente utilizadas em arranjos de 1, 2 ou mais telas, conforme mostra a foto 2.1.

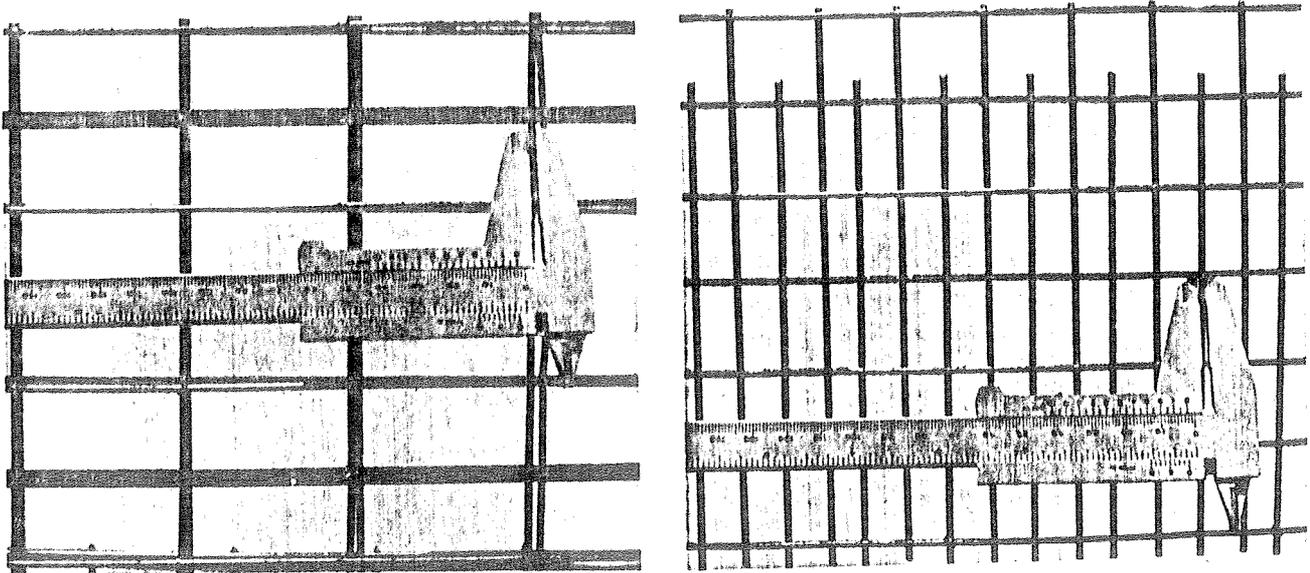


Foto 2.1 - Arranjos típicos com tela soldada

Para os outros tipos de telas de aço, os arranjos possíveis são muitos e similares aos da tela soldada. A tela de aço de chapa expandida, por exemplo, pode ser usada isolada, superposta ou intercalada por fios ou telas de aço soldados, conforme mostra a foto 2.2.

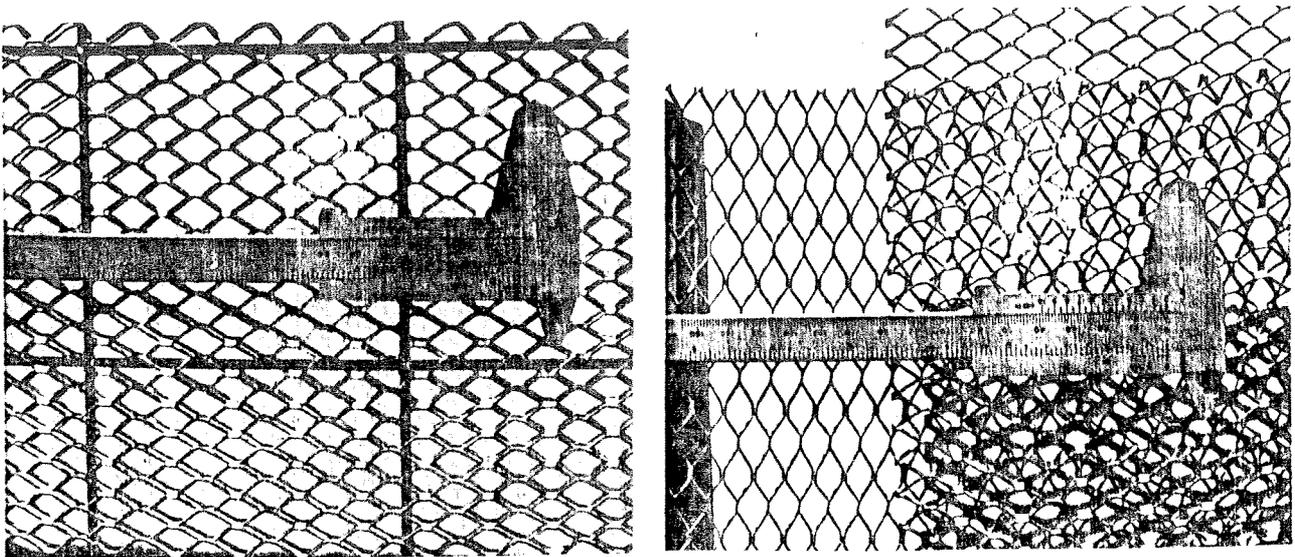


Foto 2.2 - Arranjos típicos com tela de aço de chapa expandida

Sendo definidos o cobrimento, a tolerância, o número e o tipo das telas, além do arranjo da armadura, a espessura da peça fica determinada. Logicamente estes valores são escolhidos a partir da solicitação, do ambiente e do tipo de peça, caso a caso. Com estes dados porém, é possível estabelecer alguns intervalos característicos ou mesmo um valor mínimo para a espessura. Este valor virtual é obtido com a soma do cobrimento, da tolerância dimensional e do diâmetro dos fios das telas e barras complementares, conforme o arranjo adotado. A espessura mínima portanto, para uma única tela com fios de 2,0 mm, é de 15 a 18mm, e não se indica tela única para espessuras maiores que 20mm a 25mm, pois o cobrimento seria excessivo. Para os arranjos com duas telas distanciadas por fios complementares a espessura varia de 20mm a 30mm.

#### 2.2.3.3. ARMADURA - DISPOSIÇÕES COMPLEMENTARES

Além dos aspectos relacionados ao arranjo, é necessário estabelecer indicações complementares referentes à taxa mínima, à emenda e à ancoragem da armadura, como subsídios para projetar peças de argamassa armada. Estas indicações são claramente definidas na NBR-11173.

A imposição de uma taxa de armadura mínima não tem um objetivo de caráter restritivo ou de configurar, através de valores rígidos, como deve ser uma peça de argamassa armada. A intenção deste procedimento é minimizar utilizações indevidas, com o espírito de que a observância de um mínimo de regras possa colaborar no sucesso das aplicações.

A taxa mínima aceitável é de 0,30% em cada direção da peça, e é adotada tendo em vista a existência de vários exemplos executados com este valor. A exigência é bastante amena se comparada às recomendações anteriores do ACI e da Norma Soviética da versão 1967, com valores respectivos de 1% e 0,4%, posteriormente abolidos. A redução nestes valores foi possível através de experiências próprias, e reforça a idéia da adaptação tecnológica às condições brasileiras e do desenvolvimento de um material genuíno, diferenciado.

Em relação à ancoragem, há algumas indicações específicas para as telas, além do que prescreve a NBR-6118 :

- no mínimo uma tela na região de ancoragem;
- comprimento mínimo do trecho de apoio igual a 3 vezes a espessura da peça ou 40mm (maior deles);
- comprimento mínimo das telas no apoio igual a 20 vezes o diâmetro dos fios (no caso de tela soldada).

No caso de emendas de barras e fios aplica-se o disposto na NBR-6118; já as emendas por traspasse de telas devem obedecer as seguintes recomendações:

- no mínimo três malhas por tela emendada, desde que maior que 60mm, para tela soldada;
- os valores podem ser reduzidos à metade caso a função seja somente construtiva;
- defasar as emendas, que não podem representar mais de 50% da seção transversal da armadura de telas numa mesma seção transversal da peça.

E finalmente, a ligação de elementos pré-moldados deve seguir as prescrições da NBR-9062, que contém um capítulo amplo e detalhado sobre o assunto, com as adaptações pertinentes para as peças de argamassa armada.

#### 2.2.3.4. DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento em peças de argamassa armada é similar ao utilizado para os concretos estruturais. Assim, em linhas gerais, seguem-se as hipóteses adotadas para o cálculo de concreto armado, e quando couber, as adotadas para peças protendidas e peças pré-moldadas, em conformidade com as normas correspondentes, NBR-6118, NBR-7197 e NBR-9062 respectivamente.

Para a consideração das ações e da segurança das estruturas, repetem-se os critérios usuais destas Normas Técnicas citadas, ou seja, adota-se o prescrito na NBR-8681 - Ações e Segurança nas Estruturas [1984]<sup>14</sup>.

Calcular uma peça de argamassa armada é muito semelhante a calcular uma de concreto armado. As diferenças básicas estão no estado limite de fissuração inaceitável, que tem caracterização e tipologia de fissuração diferenciados, e nos aspectos construtivos, dimensões e arranjos de armadura. Para os detalhes específicos da argamassa armada, quer sejam referentes a conceitos gerais que diferem do concreto armado (a fissuração por exemplo), ou apenas aos valores adotados nas hipóteses de cálculo (o módulo de deformação longitudinal por exemplo), os procedimentos estão indicados na NBR-11173. Se esta fonte de referência for insuficiente, as normas internacionais podem servir de apoio, desde que se façam as adaptações necessárias aos materiais e condições brasileiras.

Verificam-se os estados limites últimos e de utilização, conforme explicitado na NBR-8681 [1984] - Ações e Segurança nas Estruturas. Uma verificação completa do Estado Limite Último considera:

- perda do equilíbrio (global e local);
- deformação plástica excessiva;
- instabilidade (por deformação ou dinâmica);
- transformação da estrutura em mecanismo;

Para o Estado Limite de Utilização verifica-se:

- comprometimento da estrutura, estético ou de durabilidade;
- deformação excessiva;
- vibrações de amplitude excessiva;

Num dimensionamento completo, todas estas possibilidades devem ser analisadas, uma a uma. Porém, para fins práticos e de projeto, o cálculo de algumas destas verificações em geral é representativo da situação real. Dessa forma, as principais verificações referem-se ao Estado Limite Último (para solicitações normais e tangenciais), para garantir a segurança à ruptura, e aos Estados Limites de Utilização (de fissuração e deslocamento), para garantir o desempenho da estrutura em serviço; complementarmente faz-se uma análise da estabilidade.

Neste último caso, em virtude da complexidade dos cálculos, prefere-se obedecer alguns valores empíricos que pretendem garantir a segurança neste item e dispensam o cálculo exato, salvo situações de extrema relevância, como em peças delgadas predominantemente comprimidas.

a) estado limite último - solicitação normal

As hipóteses adotadas na flexão (simples ou composta, normal ou oblíqua) e tração ou compressão uniformes, são idênticas ao disposto na NBR-6118:

- seções transversais planas permanecem planas;
- deformação máxima da armadura igual a 1% , representando a deformação plástica limite;
- distribuição de tensões representada por diagrama parábola-retângulo, com permissão para se adotar diagrama simplificado retangular, com posição da linha neutra equivalente, conforme figura 2.2.

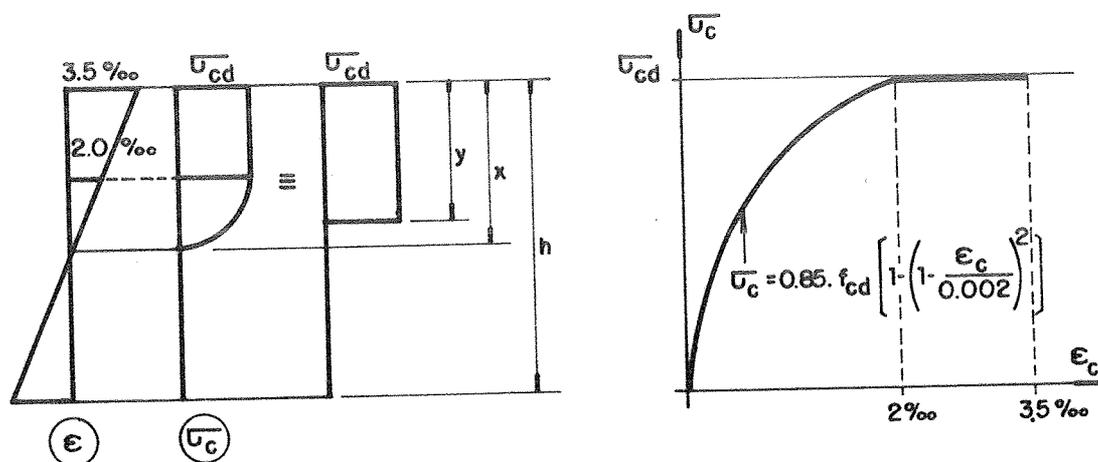


Fig.2.2 - Diagrama de tensões no concreto

- desprezada a resistência à tração da argamassa;
- encurtamento de ruptura da argamassa igual a 0,35% na flexão e 0,20% na compressão.

Há divergências quanto ao valor do encurtamento da argamassa na ruptura por flexão em seções não totalmente

comprimidas. Existem relatos na literatura internacional que sugerem valores entre 0,30% e 0,60%. O ACI [1988]<sup>15</sup> adota 0,30%. Substanciada em resultados experimentais, a norma brasileira adota o mesmo valor do concreto armado (0,35%).

Há outros dois aspectos peculiares à argamassa armada, módulo de deformação longitudinal das telas e efeito da armadura de telas na zona comprimida, que são temas de algumas controvérsias e devem ser melhor analisados.

#### - módulo de deformação longitudinal das telas

O valor deste parâmetro para as telas nem sempre tem o mesmo valor que o de seus fios constituintes, quando considerados isolados. Principalmente para telas tecidas, cujas ondulações, trançamentos e empenamentos localizados provocam sua diminuição.

Neste trabalho considera-se para a tela soldada o valor correspondente ao dos fios isolados que a compõe, conforme recomendação de Ballarin [1989]<sup>16</sup>, baseado em inúmeros ensaios de caracterização da argamassa armada com tela soldada. Para a tela de aço de chapa expandida, propõe-se o valor recomendado em Barboza<sup>5</sup>, de 205 GPa, adotado em função das dificuldades na obtenção de um valor experimental.

#### - efeito das telas na região comprimida

Em virtude da ondulação dos fios, inerente a qualquer tipo de tela, a perda da estabilidade da armadura na região comprimida é potencialmente mais perigosa. Considerar nos cálculos a contribuição destes fios é permitido com algumas restrições, principalmente em telas entrelaçadas, onde pode inclusive ser minorada a resistência à compressão da argamassa.

Na ausência de uma indicação mais precisa da norma brasileira, que deve considerar as diferentes tipologias das telas em relação aos materiais usados em outros países, pode-se consultar as normas internacionais como referência. Prioritariamente porém, recorre-se aos trabalhos experimentais

desenvolvidos ou em desenvolvimento no Brasil. Por isso, para a tela soldada prevalece a recomendação dos ensaios de Ballarín<sup>16</sup>, que considera a eficiência integral desta tela.

Para tela de chapa expandida a eficiência pode ser menor. O ACI recomenda adotar eficiência de 65% na direção longitudinal, 20% na direção transversal e 30% na direção a 45°.

É importante ressaltar que este fenômeno é muito particular a cada tipo de tela. Por isso é que são valorizados os resultados experimentais desenvolvidos no Brasil, e que posteriormente devem ser incorporados à Norma. A própria minoração na resistência da argamassa depende do tipo de tela, do arranjo da armadura e da forma da seção (que pode favorecer ou prejudicar a estabilidade dos fios).

Num cálculo exato, todos os fios longitudinais constituintes das telas devem ser considerados, inclusive os fios situados na alma da peça. Como a armadura da tela é difusa, a contribuição de cada fio é proporcional à deformação a que ele está submetido, que por sua vez é proporcional à sua distância da linha neutra. Num processo mais grosseiro, pode-se desprezar os fios da alma, cujas deformações (e portanto as tensões) são menores. Os erros cometidos podem ser significativos, principalmente quando a altura útil, a distribuição das telas, a taxa relativa de armadura de tela e discreta, e a abertura das malhas não forem favoráveis.

A distribuição de tensões na argamassa e as forças resultantes em uma seção transversal podem ser esquematizadas conforme a figura 2.3.

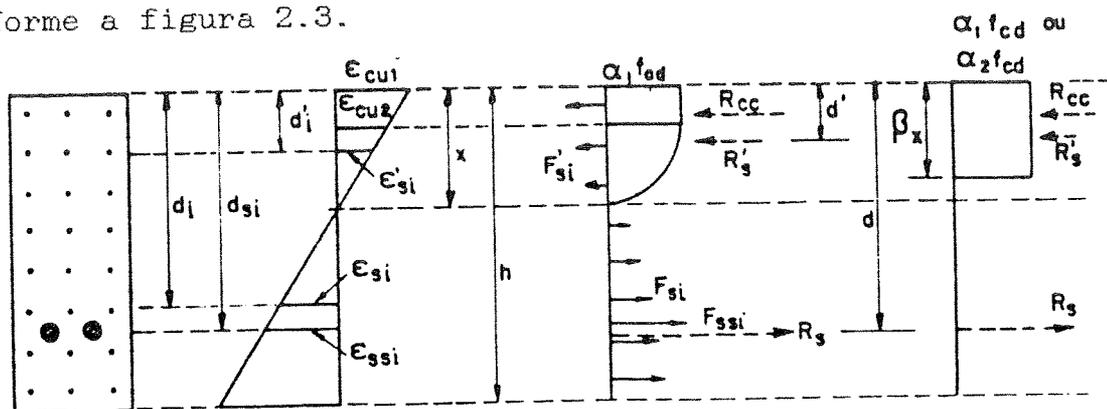


Fig.2.3 - Distribuição de tensões e forças resultantes no Estado Limite Último

A posição da Linha Neutra é obtida, por iteração, do equilíbrio de forças:

$$R_{cc} + R'_s = R_s \quad \text{com} \quad R_{cc} = \int \sigma_c \cdot dA_c$$

$$R'_s = \sum_{i=1}^n F'_{si}$$

$$R_s = \sum_{i=1}^m F_{si} + F_{ssi}$$

Sendo,

$$F'_{si} = E_s \cdot A'_{si} \cdot \epsilon'_{si} \cdot \text{eficiência} \quad (\text{tela comprimida})$$

$$F_{si} = E_s \cdot A_{si} \cdot \epsilon_{si} \quad (\text{tela tracionada})$$

$$F_{ssi} = E_s \cdot A_{ssi} \cdot \epsilon_{ssi} \quad (\text{barra tracionada})$$

Definida a posição da linha neutra, o momento resistente fica determinado:

$$M_u = \sum_{i=1}^n (F_{si} \cdot d_i) + F_{ssi} \cdot d_{si} + \sum_{i=1}^m F'_{si} \cdot d'_i + R'_{cc} \cdot d'$$

$$M_u \cong R_s \cdot d$$

b) estado limite último - solicitação tangencial

O cálculo de peças de argamassa armada solicitadas a esforços tangenciais é similar ao de concreto armado. Os fios das telas que contribuem efetivamente na absorção destes esforços são, para a tela de aço soldada, os fios transversais; para tela de aço de chapa expandida, os fios inclinados (e perpendiculares se existirem)

Como indicação de consulta para os cálculos, recomenda-se Giongo<sup>4</sup>, que tem esquematizados os procedimentos adotados pela NBR-11173.

### c) estado limite de utilização - fissuração

Em virtude das características decorrentes de uma tipologia peculiar de armadura, em geral ocorre um aumento do número e uma diminuição na abertura das fissuras.

Em relação à fissuração há duas fases a considerar. A primeira corresponde à etapa anterior à formação da primeira fissura, que define a solicitação de fissuração do elemento. E a segunda, referente ao estágio subsequente, de propagação e aumento na abertura das fissuras.

Na determinação da solicitação de fissuração (ou do estado de formação de fissuras), a norma de argamassa armada indica a observância das disposições da NBR-6118 relativas a este assunto. Para calcular a solicitação a que corresponde a maior probabilidade de se iniciar a formação de fissuras são assumidas as seguintes hipóteses:

- deformação de ruptura à tração da argamassa igual a  $2,7 \cdot f_{tk} / E_c$ , com:

$f_{tk}$  = resistência característica à tração da argamassa;  
 $E_c$  = módulo secante de deformação da argamassa, adotado igual a 80% do respectivo módulo do concreto de resistência equivalente.

- diagrama triangular de tensões de compressão na flexão (regime elástico); na região tracionada a tensão é uniforme igual a  $f_{tk}$ , sendo a deformação de ruptura multiplicada por 1,5.

- seções transversais planas permanecem planas.

- considera-se sempre o efeito da retração.

Neste ítem da retração a norma permite uma consideração simplificada: reduz a tensão de tração a  $0,75 \cdot f_{tk}$  e despreza a armadura. Uma formulação mais precisa é obtida com o correto equacionamento do fenômeno, já desenvolvido por Amaral

[1971]<sup>17</sup> para os casos de armadura simétrica e assimétrica, que atuam como obstáculo ao encurtamento da argamassa devido à retração. A ideia baseia-se na pré-tração imposta à argamassa pela retração, que pode ser representada por uma força normal externa. Para maiores informações consultar também Ballarin<sup>16</sup>.

Baseado nestas hipóteses adotadas, os diagramas de tensão e deformação numa seção transversal e as respectivas resultantes de tração e compressão na argamassa podem ser representados conforme a figura 2.4.

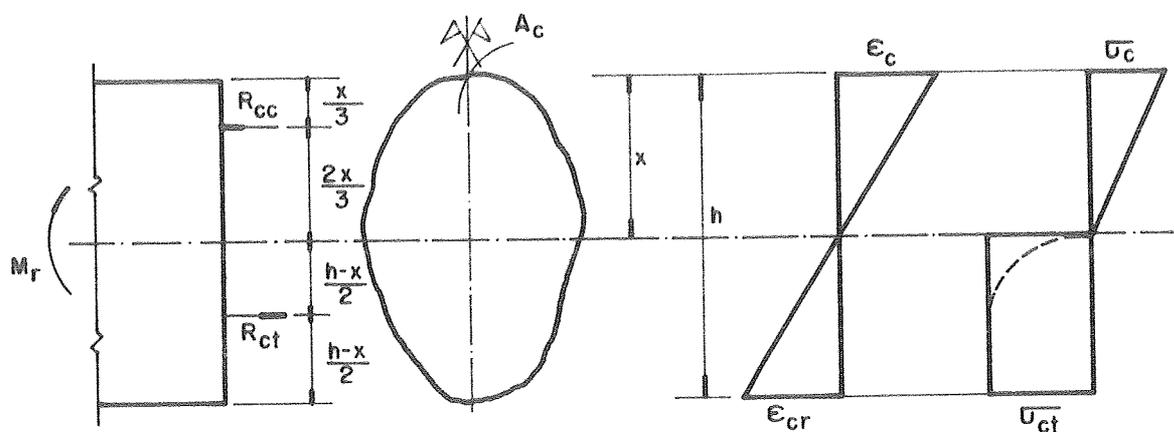


Fig.2.4 - Hipóteses adotadas no estado de formação de Fissuras (estádio Ib).

O cálculo é feito a partir das equações de equilíbrio e de compatibilidade de deformações:

$$(I) \quad \Sigma N = 0 \Rightarrow \sigma_c \cdot A_{cc} \cdot x/2 = \sigma_t \cdot A_{ct} \quad \text{com}$$

$$A_{cc} = \text{área de argamassa comprimida} = f_1(x)$$

$$A_{ct} = \text{área de argamassa tracionada} = f_2(x)$$

$$(II) \quad \Sigma M = M_r \Rightarrow \sigma_c \cdot A_{cc} \cdot x/2 \cdot \left[ 2 \cdot x/3 + (h-x)/2 \right] = M_r$$

$$(III) \quad (\varepsilon_c / x) = (\varepsilon_{ct} / (h-x)) \quad - \text{compatibilidade de deformações}$$

Substituindo  $\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c$  (regime elástico) e  $\sigma_t = f_{tk}$  em (I):

$$E_c \cdot \varepsilon_c \cdot A_{cc} \cdot x/2 = f_{tk} \cdot A_{ct}$$

$$\varepsilon_c = \frac{2 \cdot f_{tk}}{E_c} \cdot \frac{A_{ct}}{x} = f_3(x)$$

$$\text{Em III: } f_3(x) = \varepsilon_{ct} \cdot \frac{x}{h-x} = f_4(x) \quad \text{com } \varepsilon_{ct} = \frac{f_{tk}}{E_c}$$

$$f_3(x) = f_4(x) \Rightarrow \text{determina-se o valor de } x.$$

$$\text{Em II: } M_r = \sigma_c \cdot A_{cc} \cdot x/2 \cdot [2/3 \cdot x + (h-x)/2] \quad \text{com}$$

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot A_{ct}}{A_{cc}} \cdot \frac{\sigma_t}{x} \quad \text{e } \sigma_t = f_{tk}$$

Com o valor de  $x$  determinado anteriormente calcula-se o valor do momento de fissuração:

$$M_r = f_5(x)$$

No caso de flexão simples o cálculo sempre leva a valores do tipo:

$$M_r = W_p \cdot f_{tk}$$

Daqui conclui-se que a resistência à fissuração depende diretamente da qualidade da argamassa ( $f_{tk}$ ) e das características geométricas da seção transversal ( $W_p$ ).

Este processo de cálculo (que utiliza as mesmas hipóteses adotadas em concreto armado) tem levado a resultados satisfatórios, comprovados por estudos experimentais, como era esperado, dada a crescente afinidade no comportamento dos materiais, onde a redução das taxas de armadura na argamassa armada aproxima os seus alongamentos correspondentes à fissuração aos do concreto armado. Também a simplificação dos efeitos da retração mostra-se válida e é utilizada nos cálculos deste trabalho.

Na segunda etapa, posterior à formação da primeira fissura (correspondente a um nível de solicitação maior que o momento fletor de fissuração), ocorre a propagação e o aumento na abertura das fissuras até um limite considerado inaceitável. É nesta fase que sobressai a participação do arranjo das armaduras no controle e configuração da fissuração. Esta fase tem uma caracterização teórica menos clara ou menos confiável, dada a variedade de parâmetros intervenientes no fenômeno.

De início surge a dúvida: o que é fissuração inaceitável para peças de argamassa armada? A Norma brasileira estabelece que a fissuração é nociva quando a abertura característica das fissuras na superfície da argamassa é maior que 0,15mm e 0,10mm para ambientes protegidos e expostos respectivamente.

A limitação da abertura das fissuras está diretamente relacionada com a durabilidade da peça. Dada a exiguidade de estudos na correlação destes fatores, onde se destaca o trabalho recente desenvolvido por Libório<sup>B</sup>, parece prudente seguir suas recomendações: obedecer rigidamente os limites impostos pela Norma (ou mesmo ampliar estes valores), sob pena de comprometer a durabilidade destas estruturas que apresentam cobrimento reduzido.

A etapa em que a determinação do valor da abertura das fissuras é importante, corresponde à fase em que o número de fissuras já está estabilizado, e a abertura progride constantemente até valores próximos (mas abaixo), dos correspondentes ao escoamento da armadura, quando elas já serão inaceitáveis. Esta etapa é representada por fissuras com aberturas de 0,05mm a 0,25mm.

A NBR-11173 propõe uma expressão diferente para cada tipo de tela. No caso de tela soldada, a expressão é razoavelmente confiável e é apresentada a seguir. Para outros casos deve-se desenvolver estudos experimentais específicos para cada tipo de tela.

-Tela de aço soldada - valor da abertura de fissuras

$$w = 1,658.s.\varepsilon_s$$

$$\begin{aligned} * s &= s_1 && \text{se } s_1 \geq e \\ &= 1,8.s && \text{se } 1,8.s_1 \leq e \\ &= e && \text{se } 1,8.s_1 > e \text{ e } s_1 < e \end{aligned}$$

$$\text{com } s_1 = 1,5.(c + \phi/2) + 0,16.\phi/\rho_r$$

$$* \varepsilon_s = \frac{\sigma_{sm}}{E_s} \quad \text{com}$$

$$\sigma_{sm} = \sigma_s - 0,5. \frac{f_{tk}}{\rho_r}$$

Nestas expressões, as variáveis são:

$e$  = espaçamento entre fios transversais da tela;

$c$  = cobrimento da armadura;

$\phi$  = diâmetro do fio da tela na direção do eixo da peça;

$\rho_r$  = taxa geométrica da armadura, segundo NBR-6118  $\left[ \rho_r = \frac{A_s}{A_{cr}} \right]$ ;

$s_1$  = espaçamento de referência entre fissuras;

$s$  = espaçamento entre fissuras;

$\varepsilon_s$  = deformação média da armadura mais tracionada da seção;

$\sigma_s$  = tensão em serviço da armadura, estágio II;

$E_s$  = módulo de deformação longitudinal do aço correspondente.

d) estado limite de utilização - deslocamentos

A avaliação correta de deformações e deslocamentos nas peças de argamassa armada objetiva garantir a integridade global da estrutura, que em condições de deformações excessivas prejudica as outras partes da estrutura. Além é claro do aspecto estético, que por si só já justifica um controle rigoroso no comportamento dos elementos. Dada a pequena espessura e a maior

deformabilidade das peças de argamassa armada, este acompanhamento é de importância relevante e os limites que devem ser observados são os mesmos adotados pela NBR-6118 e pela NBR-9062.

O cálculo de deslocamentos é similar ao tradicionalmente utilizado em concreto armado. A rigidez adotada deve ser tal que represente o estágio de comportamento da peça em resposta a um certo nível de solicitação. Para os casos de flexão, adota-se rigidez correspondente a estágio I enquanto a peça não está fissurada; após a fissuração (estágio II) a rigidez deve ser proporcionalmente menor. Os parâmetros que definem a rigidez da peça são o módulo de deformação longitudinal e o momento de inércia da seção, que são a seguir analisados de modo e estarem adequados ao estágio de fissuração da peça.

Para o módulo de deformação longitudinal, a Norma brasileira de argamassa armada adota o mesmo critério da norma soviética: considera o módulo secante igual a 0,85 do módulo tangente, que por sua vez é igual a 0,8 do valor do módulo de deformação longitudinal tangente do concreto correspondente, ou seja, de mesma resistência, que é calculado empiricamente com a seguinte expressão quando não se dispõe de resultados experimentais.

$$E_c = 6600 \cdot \sqrt{f_{cj}} \quad (\text{MPa}) \quad \text{com} \quad f_{cj} = f_{ck} + 3,5 .$$

A escolha entre o módulo secante e o tangente depende da tensão na argamassa, conseqüentemente do estágio de fissuração na região tracionada. Apesar disso, a NBR-11173 adota sempre o módulo secante no cálculo de deslocamentos.

Para mensurar os efeitos de fluência no deslocamento devido a ações de longa duração, a norma recomenda a utilização de coeficientes de fluência, dependentes da umidade e do tipo de cura, conforme tabela 2.1.

UR	CURA NORMAL	CURA VAPOR
≥40%	2,6	3,0
<40%	3,9	4,5

Tab.2.1 - Coeficientes de fluência

Em relação ao momento de inércia, enquanto o momento fletor solicitante é inferior ao momento fletor de fissuração, a inércia é calculada no estágio I, de maneira aproximada se considerada apenas a seção da argamassa, que é o procedimento usual. A partir do início da fissuração, não parece correto adotar Estádio II puro, já que entre as fissuras a argamassa ainda contribui na resistência, especialmente para valores pouco superiores ao momento de fissuração. Calcula-se então uma inércia equivalente, variável ao longo da peça, cuja expressão foi apresentada por Branson e consta do código ACI-318 [1985]<sup>18</sup>.

$$I_{eq} = \left(\frac{M_r}{M_s}\right)^3 \cdot I_I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_s}\right)\right]^3 \cdot I_{II} \text{ com}$$

- $M_r$  = momento fletor de fissuração;
- $M_s$  = momento fletor solicitante;
- $I_I$  = momento de inércia no estágio I ;
- $I_{II}$  = momento de inércia no estágio II ;

Ballarin<sup>16</sup> recomenda a partir da análise de resultados experimentais com uso de tela de aço soldada, os seguintes valores para a rigidez:

$$\text{Estádio I : } E_c = 0,8 \cdot (6600) \cdot \sqrt{f_{c_j}} \quad \text{ou } E_{\text{experimental tangente}}$$

$$I = I_I$$

$$\text{Estádio II: } E_c = 0,85 \cdot 0,8 \cdot (6600 \sqrt{f_{c_j}}) \quad \text{ou } E_{\text{experimental secante}}$$

$$I = I_{II} \quad (\text{ou } I = I_{eq} \text{ para } M_r \leq M_s \leq 1,8 \cdot M_r)$$

Definida a rigidez que se adequa melhor à solicitação, o cálculo segue a formulação tradicional da Mecânica das Estruturas.

## CAPÍTULO 3

### CONCRETO PROTENDIDO - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Os conceitos abordados neste capítulo visam a completar o conjunto de informações que fundamentam o estudo da argamassa armada protendida. Como já se comentou anteriormente, o enfoque aqui é dirigido para os casos de pré-tração com fios retos, em bancada, para estruturas isostáticas pré-fabricadas. Assim, conceitos que envolvam estruturas hiperestáticas, cabos de protensão curvos, pós-tração e outros não pertinentes à especificidade que se quer neste momento, não são desenvolvidos.

#### 3.1. CONCEITOS GERAIS

Neste item apresenta-se o conceito da protensão e suas implicações; os tipos de protensão definidos pela NBR-7197; a definição de grau de protensão; os materiais constituintes, especialmente a armadura ativa; a caracterização do fenômeno da aderência e algumas noções sobre perdas de protensão.

##### 3.1.1. PROTENSÃO

"A protensão é um artifício que consiste em introduzir numa estrutura um estado prévio de tensões capaz de melhorar sua resistência ou seu comportamento sob diversas situações de carga". Esta definição de Pfeil [1984]<sup>1º</sup> caracteriza bem o conjunto de operações que viabiliza a utilização de uma peça com a pré-compressão do material.

Em se tratando de peças de concreto, a protensão deve pré-comprimir as zonas que são tracionadas em decorrência das ações externas, pois o material tem resistência à tração deficiente, muito inferior à resistência à compressão. Com isso os esforços de tração devidos à solicitação posterior devem inicialmente vencer esta compressão prévia, e só então provocar tensões de tração no concreto.

Não havendo a protensão, isto é, em peças de concreto armado, a fissuração no concreto limita a resistência do aço utilizado, pois para grandes alongamentos na armadura (decorrentes de tensões elevadas), correspondem fissuras com abertura excessiva. E como consequência da limitação da resistência do aço, também restringe-se a resistência do concreto, cuja tensão deve ser compatível com a deformação no aço para que haja o aproveitamento integral dos materiais.

Estas características do concreto protendido lhe conferem algumas vantagens se comparado ao concreto armado:

- com o uso de materiais de melhor qualidade (concreto e aço) diminui-se o peso próprio das peças, agora mais esbeltas e em condições de vencer maiores vãos;

- melhor comportamento em serviço, com eventuais fissuras de aberturas reduzidas. Com esse controle efetivo da fissuração, aumenta-se a durabilidade e diminuem-se as deformações da peça, pois ela permanece predominantemente em estágio I.

O valor da força de protensão é determinado de modo que, para uma determinada combinação das ações, respeitem-se determinados estados limites de utilização, conforme o tipo de protensão adotado.

### 3.1.2. TIPOS DE PROTENSÃO

Segundo a NBR-7197 - Projeto de Estruturas de Concreto Protendido, os tipos de protensão relacionam-se com os estados limites de utilização referentes à fissuração. Os tipos e as condições para que eles ocorram são:

- Protensão completa:

Existe protensão completa quando:

- \* para combinações frequentes de ações respeita-se o estado limite de descompressão;

- \* para combinações raras de ações respeita-se o estado limite de formação de fissuras.

- Protensão limitada:

Existe protensão limitada quando:

\* para combinações quase permanentes de ações respeita-se o estado limite de descompressão;

\* para combinações frequentes de ações respeita-se o estado limite de formação de fissuras.

- Protensão parcial:

Ocorre protensão parcial quando:

\* para combinações quase permanentes de ações respeita-se o estado limite de descompressão;

\* para combinações frequentes de ações respeita-se o estado limite de abertura de fissuras, com o valor característico de abertura das fissuras ( $w_k$ )  $\leq 0,2\text{mm}$ .

A existência de tensões de tração junto às extremidades das peças tracionadas não caracteriza o tipo de protensão. Elas devem ser resistidas por armadura passiva de modo a respeitar as exigências de fissuração previstas na NBR-6118 - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado.

Para efetuar as combinações deve-se consultar os itens 5.1.5 e 5.1.6 da NBR-8681 - Ações e Segurança nas Estruturas - que apresentam os coeficientes para as ações em cada tipo de combinação. As combinações refletem a probabilidade de ocorrência das ações e são assim definidas segundo a NBR-8681:

- COMBINAÇÃO QUASE PERMANENTE: pode atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, da ordem de metade deste período.

- COMBINAÇÃO FREQUENTE: repete-se muitas vezes durante o período de vida da estrutura, da ordem de  $10^5$  vezes em 50 anos, ou que tenha duração total igual a uma parte não desprezível deste período, da ordem de 5%.

- COMBINAÇÃO RARA: pode atuar no máximo algumas horas durante o período de vida da estrutura.

Leonhardt [1983]<sup>20</sup> apresenta um quadro um pouco diferente na caracterização dos tipos de protensão. Não examina

combinações de ações, apenas controla a tensão admissível na direção resistente principal para a carga de utilização total. Segundo ele tem-se para esta situação:

- PROTENSÃO TOTAL: evitam-se tensões normais de tração na flexão. Também admite as tensões de tração devido à introdução da protensão na ancoragem, ao cisalhamento e/ou torção, à aderência e à variação de temperatura.

- PROTENSÃO LIMITADA: impõe-se um limite para as tensões normais de tração.

- PROTENSÃO PARCIAL: limita-se a fissuração através de armadura passiva.

- PROTENSÃO MODERADA: a protensão serve apenas para minorar as fissuras e deformações; não é considerada na capacidade resistente.

### 3.1.3. GRAU DE PROTENSÃO

O grau de protensão também é um indicador da intensidade de protensão. Ele é definido de tal forma que para vigas fletidas seja maior ou igual a 1,0 em caso de protensão total, conforme Leonhardt<sup>20</sup>. Apesar de não ser um conceito tratado na NBR-7197, ele pode ser útil no dimensionamento de peças protendidas. É calculado com:

$$K = \frac{M_o}{M_{g+q,max}} \quad \text{sendo}$$

$$\begin{aligned} M_o &= \text{momento de descompressão} \\ M_{g+q,max} &= \text{momento máximo solicitante} \end{aligned}$$

O momento de descompressão é o momento fletor devido às ações de utilização que, conjuntamente com a força de

protensão, causam tensão nula na borda pré-comprimida do concreto.

Há uma outra definição de grau de protensão que indica a relação entre as áreas da seção transversal da armadura de protensão e da armadura total tracionada, ponderadas por suas respectivas resistências.

A partir do estabelecimento do grau de protensão (ou do tipo) é que se define a força de protensão. A sua escolha é feita com base em alguns critérios, conforme se comenta no item 3.3.1, quando se analisam as condições favoráveis ao uso de um ou outro tipo de protensão.

#### 3.1.4. MATERIAIS PARA CONCRETO PROTENDIDO

Os materiais empregados em peças de concreto protendido são os mesmos usados em concreto armado, a menos do aço de protensão. Quanto ao concreto, ele deve ser de excelente qualidade e alto desempenho, imprescindíveis, pois:

- a protensão geralmente provoca tensões prévias elevadas, eventualmente maiores que as de serviço, que só podem ser absorvidas por concretos de alta resistência;

- a viabilidade da protensão só existe com o uso de aços de alta resistência, utilizados desde que acompanhados por concreto de alto desempenho;

- um concreto de alta resistência, em geral tem maior módulo de deformação longitudinal, o que implica menores deformações. Desta maneira ficam também minoradas as perdas devido à fluência do concreto;

- a compacidade e a baixa permeabilidade do concreto são necessárias para garantir adequada proteção para a armadura de protensão.

Em relação ao aço de protensão, caracterizado por sua elevada resistência e ausência de patamar de escoamento, há algumas propriedades desejáveis, quais sejam:

- limites de alongamento elástico e resistência de escoamento (convencional) elevados para que as perdas de

protensão sejam relativamente pequenas e para proporcionar um comportamento elástico num eventual excesso de carga, respectivamente;

- comprimentos de fabricação grandes para evitar emendas e perdas de material;
- conformação superficial que favoreça melhores condições de aderência na ancoragem;
- ductilidade para evitar ruptura frágil;
- pequena sensibilidade à corrosão.

Essa indicação de se priorizar aços menos sensíveis à corrosão se justifica principalmente pela possibilidade de ocorrência de corrosão sob tensão (que corresponde a uma ruptura frágil devido à corrosão intercrystalina dependente de sua composição metalúrgica).

Também a corrosão decorrente de processos eletroquímicos pode ser mais crítica quando os elementos da armadura têm diâmetro reduzido, uma vez que qualquer redução da área é muito perigosa. Daí a necessidade de se ter como requisito neste trabalho, uma argamassa de alta qualidade e com fissuração controlada. Isto é viável mesmo com protensão parcial, desde que as fissuras se fechem após a atuação das ações de curta duração e que haja uma configuração de fissuras adequada, decorrente de armadura difusa convenientemente disposta.

Quanto à armadura de protensão, ela apresenta-se sob três formas:

- fios trefilados de aço carbono, com diâmetro de 4 a 8 mm;
- cordoalhas: fios enrolados em forma de hélice. As cordoalhas podem ser de 2, 3 ou 7 fios. Devido à sua composição, elas tem um alongamento inicial inelástico, correspondente a uma acomodação dos fios. Decorre disso o fato de ter um módulo de deformação longitudinal menor, que já considera este efeito. A carga de ruptura é menor que a de seus fios constituintes considerados isoladamente;

- barras de aço de alta resistência, laminadas a quente, com  $\phi > 12\text{mm}$  e de comprimento limitado.

A armadura pode ser retificada por tratamento térmico (que alivia as tensões internas de trefilação) ou por tratamento termo-mecânico (que melhora suas características elásticas e reduz as perdas devido à relaxação do aço). São os aços RN (aliviado de tensões) e RB (estabilizados) respectivamente.

Para a caracterização da armadura de protensão, os três principais parâmetros de identificação são:

- $f_{ptk}$  = resistência característica à ruptura por tração;
- $f_{pyk}$  = limite de escoamento convencional correspondente à deformação residual de 0,2%. Para fios e cordoalhas, este limite é muito próximo da tensão correspondente à deformação limite convencional de 1%.
- $E_p$  = valor médio do módulo de deformação longitudinal.

### 3.1.5. ADERÊNCIA

A resistência de aderência depende muito da conformação superficial da armadura, de sua posição na concretagem e da resistência do concreto. Ela é a soma de três parcelas cujos mecanismos de mobilização da aderência são distintos:

-ADERÊNCIA MECÂNICA: surge devido às saliências e/ou ondulações da armadura.

-ADERÊNCIA POR ATRITO: surge devido ao atrito entre a armadura e o concreto, desde que haja compressão transversal.

-ADERÊNCIA POR ADESÃO: surge devido ao efeito de adesão entre concreto e armadura.

A parcela que diferencia o comportamento, em relação à aderência, da armadura ativa e da passiva, é a aderência mecânica, que depende da conformação superficial. As barras da armadura passiva têm nervuras (mossas) que aumentam a aderência mecânica. Na armadura ativa, o mesmo se dá com os fios entalhados. Para as cordoalhas, a aderência mecânica é conseguida graças às ondulações das hélices (efeito

sacarrolha), porém com menor eficiência. Aos fios lisos resta apenas a aderência por adesão e eventualmente por atrito.

Além disso, a exigência de resistência de aderência é muito maior para a armadura ativa do que para a armadura passiva, devido às tensões muito superiores a que está submetida. Por isso a possibilidade de considerar menos eficiente a aderência desta armadura deve estar sempre presente. Neste trabalho, onde se utilizam cordoalhas (portanto há aderência mecânica) de pequeno diâmetro (favorável à maior distribuição das tensões de aderência), ela é considerada integralmente nos cálculos, fato que deve ser submetido à confirmação experimental. A aderência pode ser menor no caso de argamassa armada, tendo em vista a predominância da parcela fina dos agregados, o que prejudicaria a resistência ao corte, diminuindo o efeito de "endenteamento".

### 3.1.6. NOÇÕES SOBRE PERDAS DE PROTENSÃO

A força de protensão, embora tenha atuação permanente, não o faz com valores constantes ao longo do tempo. Ela está sujeita a variações decorrentes das perdas de protensão, que ocorrem devido a diferentes causas, descritas a seguir.

#### 3.1.6.1. ACOMODAÇÃO NA ANCORAGEM

Após o esticamento dos fios pelo macaco, a armadura deve ser ancorada provisoriamente nas cabeceiras, liberando o equipamento enquanto se aguarda a concretagem da peça. Nesta operação de ancoragem provisória, normalmente efetuada com cunhas, os elementos de ancoragem se acomodam, quer seja pela penetração das cunhas nos porta-cunhas, quer pela deformação da placa de ancoragem. O deslizamento relativo da armadura depende do tipo de ancoragem e do sistema de protensão, provocando queda de tensão. A caracterização desta queda de tensão em uma perda de protensão não é muito clara, pois ocorre antes da transferência aos fios; pode inclusive ser compensada com uma sobre-tensão nos fios, desde que não traga perigo de ruptura.

### 3.1.6.2. DEFORMAÇÃO IMEDIATA DO CONCRETO

Com a liberação da armadura de protensão da ancoragem provisória, a força é transferida à peça por aderência. O concreto encurta imediatamente e há uma variação de tensão no aço correspondente a esta deformação.

### 3.1.6.3. RETRAÇÃO E FLUÊNCIA DO CONCRETO

**RETRAÇÃO:** A retração no concreto manifesta-se desde as primeiras idades e continua ao longo do tempo. Inicialmente ocorre a retração plástica, que é uma redução no volume cimento+água, acentuada com a evaporação de água. É maior portanto para alto consumo de cimento e altas temperaturas.

Após a pega pode ocorrer retração autógena, que se manifesta quando não se permite a troca de umidade com o ambiente. É portanto mais comum em grandes massas de concreto.

Ao longo do tempo ocorre a retração hidráulica (por secagem), relacionada com o equilíbrio higrotérmico da peça com o ambiente, sendo em parte irreversível. É maior portanto quanto menor a umidade do ambiente e maior o volume de água no concreto; constitui a principal parcela da retração.

A retração provoca encurtamento no concreto e conseqüentemente na armadura aderente, decorrendo portanto uma diminuição na tensão de protensão.

É interessante observar que a retração no concreto protendido tem algumas características distintas do fenômeno no concreto armado, onde a armadura atua como obstáculo à deformação por retração, causando tração e possíveis fissuras no concreto. No caso da armadura ativa essa obstaculização não ocorre, ou seja, a deformação por retração não causa compressão na armadura, apenas alivia sua pré-tensão. O encurtamento portanto é favorecido, não havendo mobilização de aderência. Daí vem a recomendação de considerar integralmente o efeito da retração em peças de concreto protendido, conforme relata Leonhardt<sup>20</sup>.

FLUÊNCIA: A fluência é definida como um aumento de deformação com tensão constante, composta de parcelas reversíveis e irreversíveis. São deformações elásticas imediatas, elásticas ao longo do tempo (visco-elásticas), plásticas imediatas e plásticas ao longo do tempo (visco-plásticas). As deformações elásticas são reversíveis e as plásticas irreversíveis. Em condições gerais a fluência é maior para alto consumo de cimento, elevado consumo de água, umidade do ar reduzida.

No comportamento de uma peça submetida a um carregamento, as deformações que ocorrem ao longo do tempo podem ser representadas no diagrama da figura 3.1.

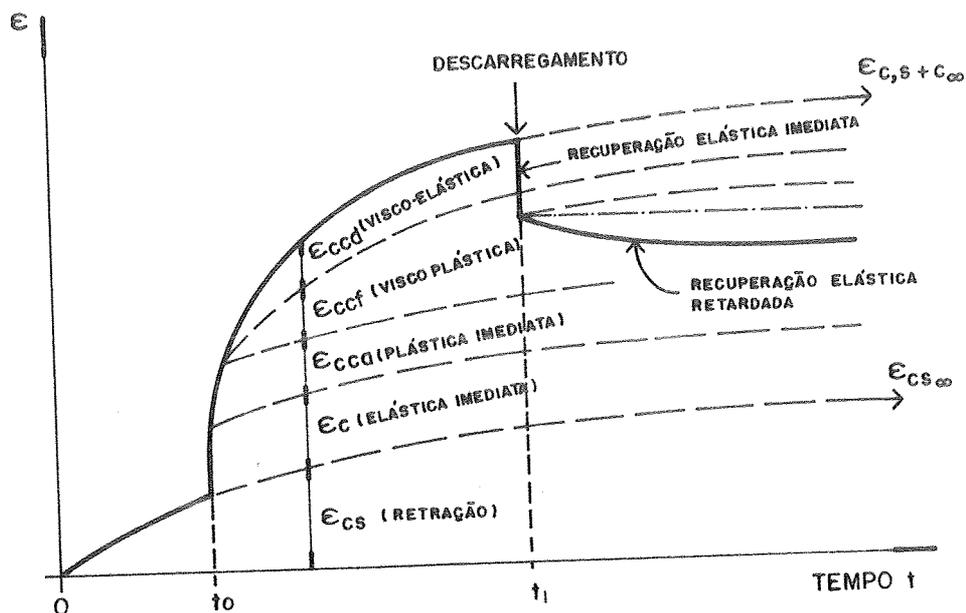


Fig. 3.1 - Desenvolvimento das deformações por retração e fluência com o tempo.

Conforme explica Hanai<sup>21</sup>, "  $t = 0$  corresponde à mistura...; em  $t_0$  o elemento é carregado produzindo-se uma deformação imediata suposta invariável com o tempo. Em curto espaço de tempo ocorre uma deformação plástica (fluência rápida irreversível) também constante ao longo do tempo. A fluência manifesta-se no decorrer do tempo, alcançando um valor final no tempo infinito. Havendo descarregamento em  $t_1$  há recuperação

elástica imediata e início da recuperação retardada (fluência reversível)".

#### 3.1.6.4. RELAXAÇÃO E FLUÊNCIA DO AÇO

A fluência já foi definida como um acréscimo de deformação sob tensão constante. Já a relaxação é o fenômeno em que o material apresenta um alívio de tensão sob comprimento constante, desde que haja uma deformação inicial geradora desta tensão.

Na armadura de protensão estes fenômenos dependem do tipo de aço, da intensidade de solicitação e da temperatura; as deformações por fluência são pouco significativas comparadas com a diminuição de tensão devida à relaxação, cuja causa reside em transformações na estrutura cristalina.

Para completar a noção das perdas em peças pré-tracionadas, apresenta-se na figura 3.2 a evolução das perdas e as forças correspondentes às diversas etapas da vida da estrutura com cabo reto e pré-tração, conforme a NBR-7197.

#### 3.2. EXECUÇÃO DA PROTENSÃO

A protensão com aderência inicial, também denominada pré-tração, é obtida com o esticamento da armadura antes da concretagem da peça. A armadura deve estar devidamente posicionada nas fôrmas e é esticada através de macacos hidráulicos ou equipamento similar, que se apoiam em blocos de ancoragem nas cabeceiras. O tensionamento pode ocorrer a partir de uma ou das duas extremidades, situação onde se denomina que a cabeceira é de protensão. No caso da pré-tração, como não há perdas por atrito nos cabos, normalmente a protensão se dá apenas em uma extremidade, sendo a outra apenas ancorada; neste caso a cabeceira respectiva é chamada de passiva ou de desprotensão.

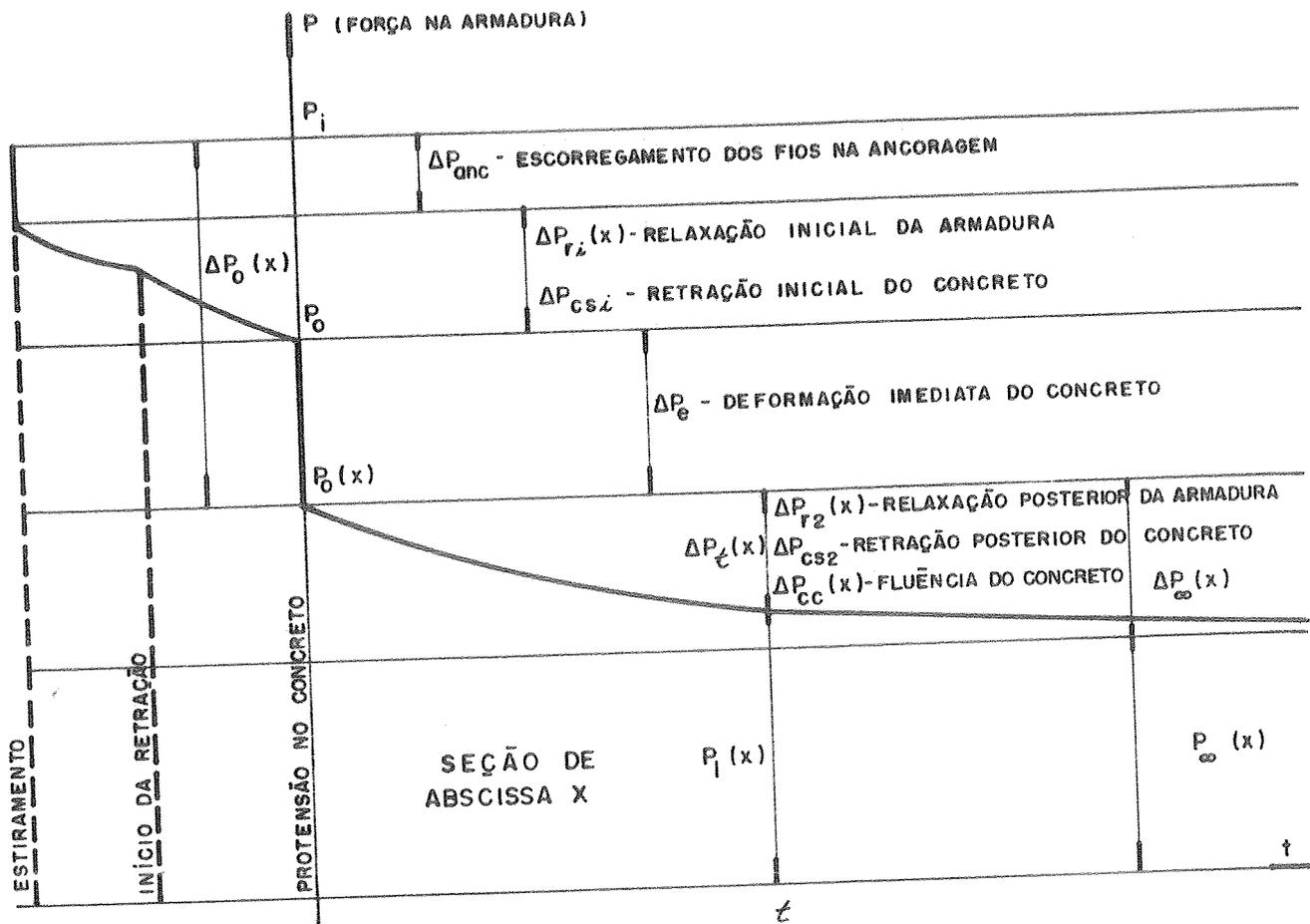


Fig.3.2 - Variação das forças de protensão devido às perdas progressivas - pré-tração e cabo reto

A armadura é então ancorada provisoriamente em placas de ancoragem posicionadas nas cabeceiras. Após a concretagem da peça, quando o concreto atinge resistência compatível com a absorção dos efeitos da força de protensão, a armadura é liberada da ancoragem e transferida ao concreto por aderência.

A figura 3.3. ilustra uma situação de pré-tração em bancada, típica na produção de peças pré-moldadas em pistas de protensão.

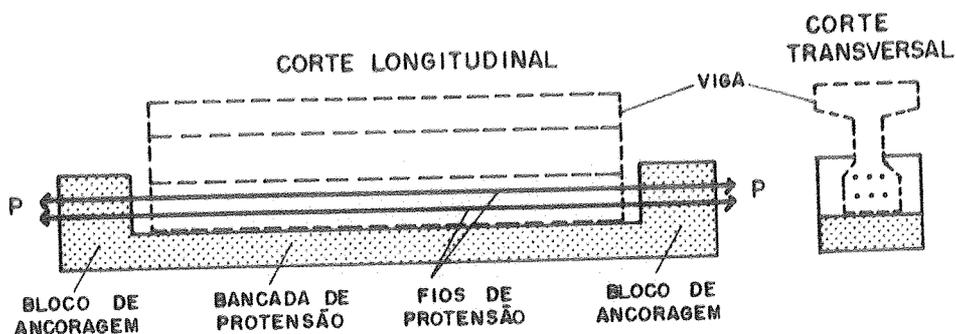


Fig.3.3 - Esquema de pré-tração em bancada

### 3.2.1. ANCORAGEM

A força a ser ancorada é normalmente elevada. Como a ancoragem é feita por aderência, a escolha do aço utilizado deve priorizar a qualidade deste parâmetro. A opção é entre fio entalhado e cordoalha, modalidades que mobilizam a aderência mecânica e ajudam a evitar o deslizamento da armadura. Na zona da ancoragem pode ser necessário dispor armadura suplementar para evitar o fendilhamento decorrente da tração transversal. A força na zona da ancoragem é absorvida pelo concreto de modo que na extremidade do fio ela seja nula. Os esquemas da figura 3.4 representam as tensões nesta zona de ancoragem, onde os esforços não são uniformes e não se aplica a teoria clássica da Resistência de Materiais.

Nas ancoragens provisórias utilizam-se normalmente cunhas e porta-cunhas apoiados nas placas. As cunhas podem ser deslizantes ou cravadas. A deslizante é introduzida manualmente no porta-cunha antes do afrouxamento, de modo a provocar uma pequena compressão transversal e mobilizar o atrito. Com o recuo da cordoalha na liberação dos macacos as cunhas acompanham este movimento e prendem-se à placa. Já a cunha cravada é automaticamente empurrada pelo macaco após a cordoalha atingir o alongamento previsto; mesmo assim ocorre um recuo do dispositivo na liberação, variável segundo a intensidade da força de cravação. Em ambos os casos ocorrem perdas, menores quanto melhores os equipamentos.

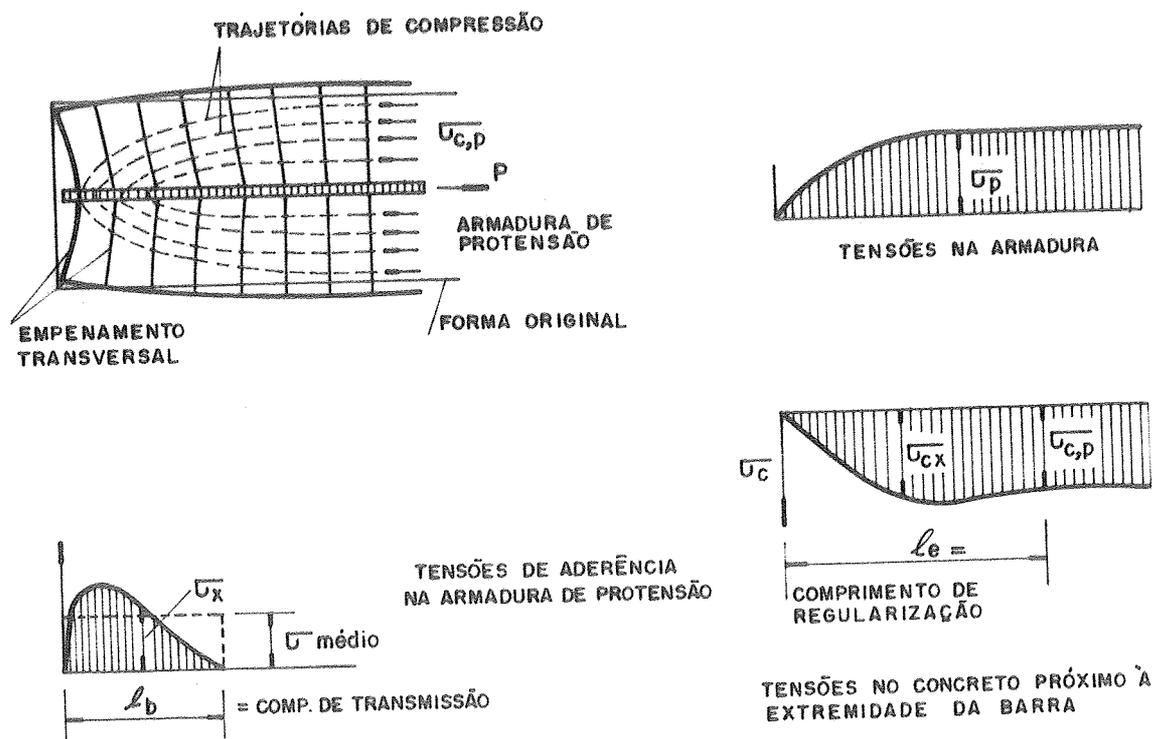


Fig.3.4<sup>2o</sup> - Desenvolvimento das tensões na zona de ancoragem

### 3.2.2. CONTRÔLE DA PROTENSÃO

A força de protensão deve ser acompanhada de duas maneiras: através de um dinamômetro colocado entre a placa e o macaco e com o manômetro da bomba hidráulica. Uma vez atingido o valor nominal no manômetro (e no dinamômetro) as ancoragens são fixadas. Se o alongamento medido pelo movimento do pistão relativo ao cilindro não corresponder ao alongamento previsto, permite-se um acréscimo de 5% na força. As diferenças nos alongamentos podem decorrer de:

- alongamento maior que o previsto: escorregamento da ancoragem passiva, ruptura de algum fio; valores da área de aço ou do módulo de deformação longitudinal menores que os supostos;

- alongamento menor que o previsto: área de aço ou do módulo maior que o suposto.

Na medição dos alongamentos deve-se prever as acomodações, especialmente dos fios das cordoalhas. Assim, a primeira medição deve começar com uma parcela de força de protensão já atuando, da ordem de 10%. O alongamento total é calculado considerando este artifício:

$$\Delta l = \Delta_{\text{final}} - \Delta_{\text{inicial}} / 0,9$$

A execução da protensão é melhor explicada no capítulo 6, quando se descreve o experimento dos modelos ensaiados no laboratório; a pista, os equipamentos e o ensaio são ilustrados com maiores detalhes.

### 3.3. PROJETO

O projeto de uma peça de concreto protendido depende principalmente da escolha do grau de protensão ou do tipo de protensão a adotar. Com esta definição, determina-se a força de protensão necessária para satisfazer aos requisitos dos estados limites de utilização e posteriormente verifica-se a segurança no estado limite último, cujos procedimentos são análogos ao do concreto armado.

Portanto, parece oportuno comentar agora os critérios para a escolha do grau de protensão, que vai caracterizar o comportamento da estrutura.

#### 3.3.1. ESCOLHA DO GRAU DE PROTENSÃO

A escolha do grau de protensão deve decorrer do tipo de utilização a que a peça fica submetida. Um bom critério é adotar uma força de protensão tal que, para combinações de ações frequentes ou quase-permanentes, as tensões de tração que eventualmente surjam sejam pequenas. Não há porém uma regra geral - a menos que se relacione diretamente a agressividade do ambiente com o desempenho relativo à fissuração, como recomenda a NBR-7197. Cada situação deve ser tratada como um caso particular. Por exemplo, pode ser primordial que se tenha uma

peça predominantemente plana, isto é, sem deformações. Assim, a protensão deve ter intensidade tal que a flecha devida às solicitações permanentes (g+P) se anule, e portanto, os efeitos da fluência sejam menores neste aspecto. Este exemplo leva normalmente a valores do grau de protensão entre 0,4 e 0,6, segundo Leonhardt<sup>20</sup>.

Uma outra situação peculiar pode advir da necessidade de limitação das deformações mesmo sob a ação de carga de utilização total. Neste caso, a flecha inicial deve ser negativa. Outras vezes, esta contra-flecha é necessária para o bom funcionamento da peça, como ocorre nas telhas, vigas-calhas e outros. Assim, estas exigências é que determinam o nível da protensão.

Leonhardt indica a utilização preferencial da protensão parcial ou limitada, amparado em pesquisas que mostram um melhor comportamento em serviço, especialmente devido à armadura suplementar mais abundante nestes casos. Além disso, o custo é menor para graus de protensão que correspondem a estes tipos de protensão. Antes porém de prosseguir a análise das situações relacionadas com os tipos de protensão mais indicados, transcreve-se a seguir o disposto na NBR-7197 para a escolha do tipo de protensão.

Segundo esta norma, "a escolha do tipo de protensão deve ser feita em função do tipo de construção e da agressividade do meio ambiente". Não havendo exigências mais rigorosas pelas normas referentes à construção em questão, a escolha do tipo de protensão deve atender ao exposto na tabela 3.1.

A classificação de ambientes agressivos, pouco agressivos e não agressivos, ilustrada no capítulo anterior conforme a classificação da NBR-7197, é utilizada quando não há um conhecimento preciso das condições reais.

A NBR-7197 é portanto categórica: a escolha do tipo de protensão está diretamente relacionada com a agressividade do ambiente. Apesar da justificável relação entre o estado de fissuração e a agressividade do ambiente, a imposição da norma parece discutível. O próprio concreto armado, se entendido como

Nível de agressividade do meio ambiente	Exigência mínima quanto ao tipo de protensão
muito agressivo	protensão completa
pouco agressivo	protensão limitada
não agressivo	protensão parcial

Tab.3.1 - tipo de protensão x tipo de ambiente

uma peça com grau de protensão nulo, não poderia ser utilizado a não ser em ambientes protegidos. É claro que pode se contra-argumentar que a nocividade da corrosão é mais acentuada nas armaduras ativas e seus efeitos podem ser mais graves, pela própria responsabilidade que esta armadura assume nas peças protendidas. Porém, a atitude de preservar a todo custo a segurança da armadura de protensão parece não justificar o conservadorismo embutido nesta opção. Ela restringe a liberdade do projetista e ignora os fatos decorrentes do comportamento em serviço, que mostram ser viáveis as condições de segurança para protensão parcial mesmo em ambientes mais agressivos.

A aceitação das tensões de tração na região de ancoragem, que segundo a norma não caracterizam o tipo de protensão, parece também um pouco contraditória. Desde que as tensões de tração, quaisquer que sejam suas origens, sejam absorvidas por armadura passiva convenientemente disposta e dimensionada para resistir a elas, e portanto controlar a fissuração, qual a razão desta distinção? A maior nocividade das fissuras ao longo do vão? A possibilidade de sobrecargas excepcionais agravá-las?

Na retaguarda da posição defendida por Leonhardt, que considera viável a protensão parcial mesmo para ambiente agressivo, estão resultados abonando o comportamento destas peças, quando bem dimensionadas. Na protensão parcial ou limitada, as fissuras são normalmente capilares e fecham-se após a solicitação. Segundo Leonhardt, para grau de protensão  $k = 0,6$  a abertura das fissuras fica menor que 0,05mm em serviço. Até para  $k = 0,3$  consegue-se ter fissuras com abertura menor que 0,2 mm, mesmo no caso de predominância de solicitações variáveis

( $q \gg g$ ). A disposição de uma malha de armadura passiva envolvendo a armadura de protensão garante que as eventuais fissuras que a atinjam já estejam controladas.

Há situações em que a relação entre a carga acidental e a permanente é elevada e a exigência de protensão completa pode tornar crítica a etapa "em vazio", onde as tensões de compressão podem ser muito elevadas na borda que é tracionada em serviço. Pode inclusive haver tração na outra borda, agravando o problema da deformação. As fissuras eventuais aumentam com o decorrer do tempo e podem não se fechar mais. É oportuno frisar ainda que a protensão completa normalmente acarreta valores de armadura passiva muito modestos e nos casos de solicitação excepcional ou no estado "em vazio" anteriormente descrito, a configuração de fissuras (se existirem) fica prejudicada. Daí vem a recomendação de se adotar um boa armadura passiva também para protensão completa, dimensionada para limitar a fissuração, tal como ocorre para protensão parcial e limitada.

Para completar esta discussão sobre o tema, onde os procedimentos indicados pela NBR-7197 e por Leonhardt são distintos, apresenta-se a seguir uma descrição sucinta do comportamento resistente na flexão das peças pretendidas.

### 3.3.2. COMPORTAMENTO RESISTENTE

A qualidade da aderência influi bastante no comportamento da peça, seja na utilização ou na ruptura. Como neste trabalho se estuda a protensão com aderência inicial, com o uso de cordoalhas, a aderência pode ser considerada eficiente. Desta forma, algumas destas breves observações não se aplicam totalmente neste caso; mas devem estar sempre presentes, pois esta suposição de eficiência integral na aderência das cordoalhas pode não corresponder à realidade.

A configuração das fissuras é mais adequada quando se tem armadura aderente; elas são múltiplas e menos espaçadas, com pequena abertura. As deformações também diminuem em consequência da maior superficialidade das fissuras, sendo maior a seção colaborante na rigidez. Completa o quadro de vantagens de uso de

armadura aderente a possibilidade do seu aproveitamento integral na ruptura. Por estes motivos, sempre que se duvidar da qualidade da aderência deve-se compensá-la com uma quantidade generosa de armadura passiva.

Para representar o desenvolvimento das tensões nas armaduras sob solicitação crescente, reproduz-se na figura 3.5. o diagrama tensão x carga apresentado em Leonhardt<sup>20</sup> e adaptado por Hanai<sup>21</sup>.

Surge inicialmente uma tensão  $\sigma_{po}$  devido ao estiramento das cordoalhas; esta diminui com a retração e a fluência de um valor  $\sigma_{p,s+c}$ , aqui representada desconsiderando o tempo necessário para sua ocorrência.

As tensões na armadura tracionada na peça protendida aumentam muito pouco enquanto o concreto está íntegro (de um valor  $\Delta\sigma_p = \alpha_p \cdot \sigma_c$ .) A tensão no concreto varia entre 2 a 15MPa, o que corresponde a acréscimos de até 90MPa na armadura, bem abaixo dos 240MPa nas armaduras de concreto armado sob carga de utilização. Caso a protensão seja completa (ou mesmo limitada) este acréscimo permanece pequeno até a carga total de utilização.

Quando ocorre a primeira fissura, a parcela da força de tração até então resistida pelo concreto é transferida às armaduras (que não podem escoar nesta etapa), cuja variação é maior quanto mais resistente for o concreto. A partir daí, o aumento de tensão na armadura é mais rápido com o aumento de solicitação. A armadura ativa absorve menos esta tensão devido à aderência ser menos eficiente, daí a menor inclinação da curva no diagrama em relação à armadura passiva.

Havendo armadura passiva suficiente, as armaduras podem ser aproveitadas integralmente, até o escoamento. Para isso, o concreto deve ter resistência tal que não rompa por compressão antes do escoamento das armaduras. É importante observar que nem as tensões na armadura e nem no concreto desenvolvem-se proporcionalmente às cargas.

Tendo esclarecido o comportamento da peça como um todo e já pensando na protensão em peças de argamassa armada, evidencia-se a viabilidade da protensão parcial: de um lado a força de protensão, para controlar as tensões normais de tração

e retardar a fissuração, além de minorar a deformação (muitas vezes excessivas em peças delgadas); de outro, uma armadura suplementar generosa, representada por uma malha de fios que contribui na obtenção de uma configuração de fissuras mais adequada e garante uma ruptura próxima da esperada, já que a aderência das telas é mais eficiente. A indicação da NBR - 7197, que impõe o tipo de protensão a partir do ambiente considerado, não é portanto seguida à risca, mas sim como referência na definição de um grau de protensão que corresponda a um comportamento e fissuração compatíveis com este ambiente. Como a solicitação máxima ocorre poucas vezes, parece ser bastante evitar as tensões de tração para uma parcela das cargas totais, controlando a fissuração quando ela atuar na totalidade. Além disso, a segurança no estado limite último independe do grau de protensão.

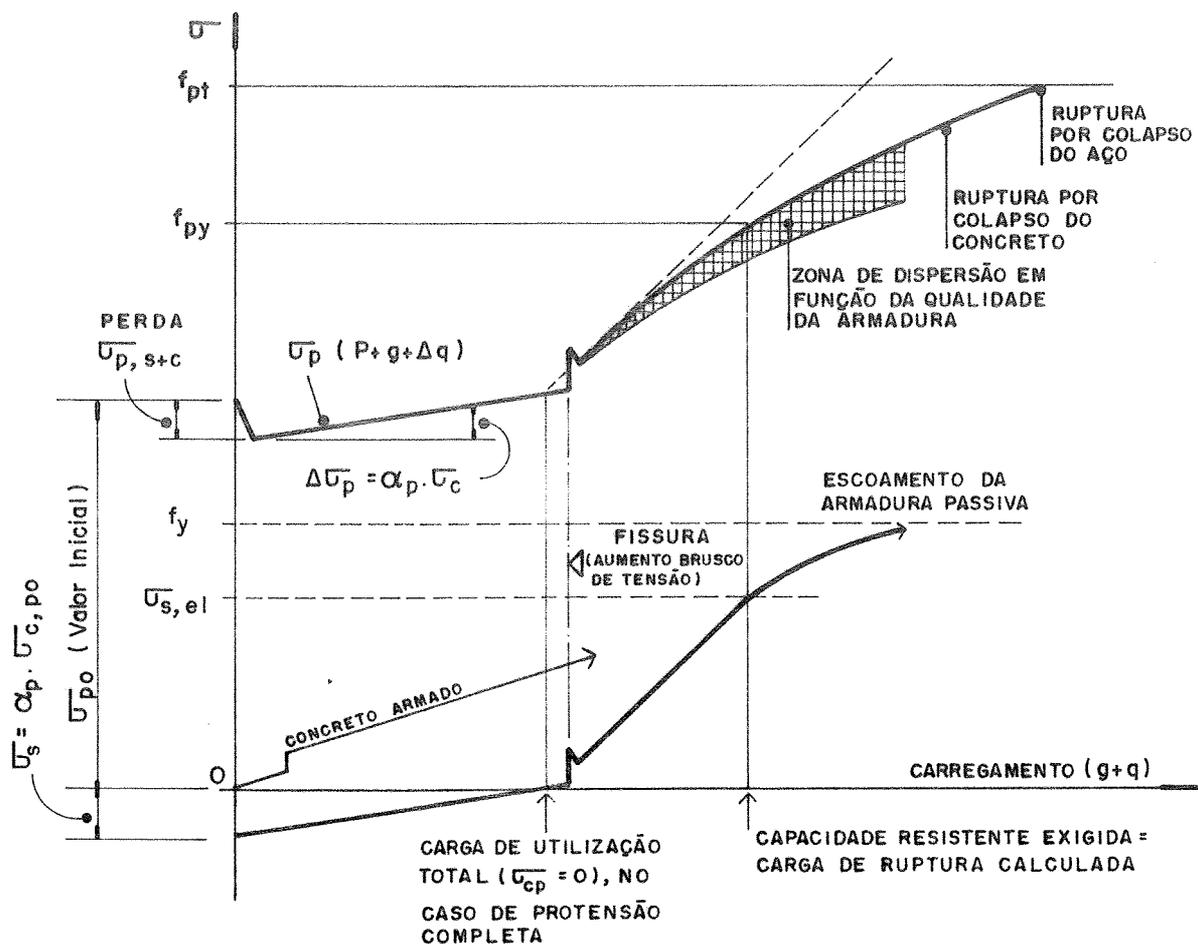


Fig.3.5 - Desenvolvimento das tensões nas armaduras com solicitação crescente

### 3.3.3. DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE PROTENSÃO

A seção transversal do elemento é definida a partir de um pré-dimensionamento com as cargas atuantes, considerando o estado limite último. A força de protensão é então estimada em função de vários parâmetros, a saber:

- excentricidade da força de protensão;
- características dos materiais, aço e concreto, a serem utilizados;

- estimativa das perdas de protensão, já que os efeitos da protensão devem garantir a segurança da peça até o tempo infinito. Portanto, a força necessária calculada para o tempo infinito deve ser transportada para a etapa inicial, através de majoração correspondente a estas perdas estimadas;

- grau de protensão definido. No caso de se trabalhar em termos de tipo de protensão, a força é calculada limitando-se a tensão de tração em serviço.

A análise inicial é usualmente feita no tempo infinito, quando a força de protensão é menor e a situação é normalmente crítica. Porém, isto não exime as verificações complementares nas diversas etapas de vida útil da peça.

Com a força de protensão necessária para satisfazer às exigências de tensões de tração e compressão dos estados limites de utilização e com o percentual de perdas estimada, chega-se a um valor para a força inicial. Esta força é utilizada para calcular a seção transversal de armadura ativa necessária. Como a peça é verificada nas suas várias fases de utilização, é importante definir os valores da força de protensão correspondentes a cada uma:

$P_i$  = força aplicada à armadura pelo equipamento de protensão (antes da ancoragem dos fios);

$P_a$  = força transferida à armadura no instante imediatamente anterior à liberação da ancoragem. Corresponde a  $P_i$  subtraído da perda devido ao escorregamento da ancoragem, à relaxação inicial do aço e à desprezível retração do concreto;

$P_o$  = força efetivamente transferida ao concreto no tempo convencionalizado  $t=0$ , após a liberação dos fios da ancoragem. É obtida a partir de  $P_a$  subtraído das perdas devido ao encurtamento imediato do concreto. Na pré-tração com cabo reto,  $P_o$  é praticamente constante ao longo da peça;

$P_t$  = força no tempo  $t$ , corresponde a  $P_o$  subtraído das perdas progressivas até o instante considerado.

A figura 3.2. do item 3.2. ilustra o desenvolvimento da força de protensão ao longo do tempo numa viga pré-tracionada com cabo reto.

Na etapa de execução da protensão deve-se limitar a tensão no esticamento, para prevenir a ruptura, minimizar perdas por relaxação e controlar a sensibilidade à corrosão da armadura de protensão. Na pré-tração estes limites são:

$$\sigma_{po} \leq \begin{cases} 0,81 \cdot f_{ptk} \\ 0,95 \cdot f_{pyk} \\ \text{Aço RN} \end{cases} \quad \sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,81 \cdot f_{ptk} \\ 0,90 \cdot f_{pyk} \\ \text{Aço RB} \end{cases}$$

Ao término das operações, etapa correspondente ao tempo  $t=0$ , também se limita a tensão máxima, cujos objetivos são os mesmos anteriores, exceto o perigo de ruptura.

$$\sigma_{po} \leq \begin{cases} 0,77 \cdot f_{ptk} \\ 0,90 \cdot f_{pyk} \end{cases}$$

Conclui-se portanto, que a armadura só não será tensionada com o máximo valor de  $\sigma_{pi}$  permitido se as perdas ocorridas de  $P_i$  a  $P_o$  forem pequenas tais que se tenha  $\sigma_{pi} > \sigma_{po}$  admissível.

A área de armadura necessária fica então determinada

$$A_{p,nec} = \frac{P_{o,estimado}}{\sigma_{po,máx}}$$

Nesta fase do dimensionamento é prudente verificar também a etapa inicial da vida da peça, com o valor ainda provisório de  $P_o$ . Nas primeiras idades deve-se observar principalmente a possibilidade de haver compressão excessiva na borda pré-comprimida, sob atuação apenas do peso próprio e da protensão; ou de ocorrência de tração na outra borda. Corresponde a verificação da etapa de fabricação do elemento.

O cálculo segue com a determinação exata das perdas e as respectivas forças de protensão efetiva nas diversas idades, para as quais o comportamento da peça deve ser verificado.

Por fim verifica-se a segurança da peça no estado limite último, conforme se mostra no item 3.3.5.2.

### 3.3.4. CÁLCULO DAS PERDAS

Nos itens seguintes apresentam-se expressões para o cálculo das perdas de protensão, imediatas e progressivas. Os processos seguem as indicações da NBR-7197 e não se pretende discutir formulações alternativas; objetiva-se apenas mensurar as perdas e apresentar sucintamente os modelos teóricos propostos.

#### 3.3.4.1. ANCORAGEM

Depende do deslizamento e/ou acomodação das ancoragens relativamente à armadura de protensão. Chamando este deslocamento de  $\Delta$  tem-se:

$$\sigma_{pa} = \sigma_{pi} - \frac{E \cdot \Delta}{l_{fio}}$$

#### 3.3.4.2. ENCURTAMENTO ELÁSTICO DO CONCRETO

A variação da tensão no aço equivale à variação de tensão correspondente à deformação de encurtamento da fibra de concreto junto à armadura, devido à transferência da força de

protensão. Esta variação de tensão é calculada em regime elástico e considera seção homogeneizada (pois a aderência já está mobilizada), ponderada segundo a razão entre os módulos de deformação longitudinal da armadura e do concreto.

$$\sigma_{po} = \sigma_{pa} + \alpha_p \cdot \sigma_{cp} \quad \text{com}$$

$$\alpha_p = E_p / E_c$$

$$\sigma_{cp} = \frac{P_a}{A_h} + \frac{P_a \cdot e_p}{I_h} \cdot y_h$$

### 3.3.4.3. PERDAS PROGRESSIVAS

Um modelo teórico que avalie fielmente os fenômenos envolvidos nas perdas ocorridas ao longo do tempo devido à fluência e retração do concreto e relaxação do aço pode ser muito complexo. O que se apresenta a seguir são os modelos adotados pela NBR-7197 para o cálculo isolado de cada uma dessas parcelas, e posteriormente, uma expressão que estime as perdas totais, originada a partir de cálculos necessariamente iterativos, devido à interdependência que as parcelas guardam entre si.

#### a) retração no concreto

O modelo adotado pela NBR-7197 considera que a retração depende de três parâmetros principais:

- umidade relativa do meio ambiente;
- consistência do concreto no lançamento;
- espessura fictícia da peça.

Estes parâmetros procuram refletir todas as parcelas constituintes da retração. Segundo a NBR 7197:

$$\epsilon_{cs}(t, t_0) = \epsilon_{cs, \infty} [\beta_{s(t)} - \beta_{s(t_0)}] \text{ com:}$$

$$\epsilon_{cs, \infty} = \epsilon_{1s} \cdot \epsilon_{2s} \quad \text{valor final da retração}$$

$$\epsilon_{1s} = \left[ -6,16 - \frac{U}{484} + \frac{U^2}{1590} \right] \cdot 10^{-4} \quad \text{para slump [5-9cm]}$$

$$\epsilon_{2s} = \frac{33 + 2 \cdot h_{fict}}{20,8 + 3 \cdot h_{fict}}$$

$$h_{fict} = \frac{2 \cdot A_c}{u} \cdot \delta$$

$\delta$  = coeficiente dependente da umidade do ambiente;

$A_c$  = área de seção transversal de peça;

$u$  = parte do perímetro externo da seção transversal da peça em contato com o ar;

$\beta_{s(t)}$  = coeficiente relativo à retração, que depende da espessura fictícia e da idade fictícia.

## b) fluência do concreto

O modelo adotado pela NBR-7197 considera a deformação por fluência formada pelas parcelas de fluência rápida e de fluência lenta, sendo que esta é composta de parte reversível e irreversível. Assume ainda variação linear de deformação com a tensão aplicada e superposição dos efeitos de fluência para acréscimos de tensão aplicados em instantes distintos.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{cca} + \epsilon_{ccf} + \epsilon_{ccd} \quad \text{com:}$$

$\epsilon_{cca}$  = fluência rápida irreversível;

$\epsilon_{ccf}$  = deformação lenta irreversível;

$\epsilon_{ccd}$  = deformação lenta reversível.

Assim, a deformação total, incluindo a elástica imediata, é dada por:

$$\varepsilon_{c,tot} = \varepsilon_c + \varepsilon_{cc} = \varepsilon_c (1 + \phi) .$$

que expressa a proporcionalidade entre a fluência e a deformação elástica imediata, através do coeficiente de fluência  $\phi$ , estimado por:

$$\phi = \phi_a + \phi_f + \phi_d .$$

Para um instante  $t$  qualquer, a deformação por fluência vale:

$$\varepsilon_{cc(t)} = \varepsilon_{cca} + \varepsilon_{ccf} + \varepsilon_{ccd} = \varepsilon_c [1 + \phi_{(t,t_0)}] = \frac{\sigma_c}{E_{c28}} [1 + \phi_{(t,t_0)}]$$

-  $E_{c28}$  = módulo de deformação longitudinal secante;

-  $\phi_{(t,t_0)} = \phi_a + \phi_{f\omega} \cdot [\beta_{f(t)} - \beta_{f(t_0)}] + \phi_{d\omega} \cdot \beta_d$  onde:

-  $t$  = idade fictícia do concreto em dias no instante considerado;

-  $t_0$  = idade fictícia do concreto em dias no instante do carregamento;

-  $\phi_a = 0,8 \cdot [1 - f_{c(t_0)} / f_{c(t\omega)}]$  = coeficiente de fluência rápida: independe do tempo;

-  $\phi_{f\omega} = \phi_{1c} \cdot \phi_{2c}$  = valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível;

$$\phi_{1c} = 4,45 - 0,035 \cdot U \quad \text{para slump} \quad [5-9\text{cm}];$$

$$\phi_{2c} = \frac{42 + h_{fict}}{20 + h_{fict}} ;$$

-  $\beta_{f(t)}$  = coeficiente relativo à deformação lenta irreversível;

-  $\phi_{doo} = 0,4$  valor final do coeficiente de deformação lenta reversível;

-  $\beta_d$  = coeficiente relativo à deformação lenta reversível que considera tempo após o carregamento.

$$\beta = \frac{t-t_o+20}{t-t_o+70}$$

c) relaxação do aço

Segundo a NBR-7197, o valor da relaxação do aço é determinado pelo coeficiente  $\psi(\Delta t)$  definido por:

$$\psi_{(\Delta t)} = \frac{\Delta\sigma_{r(\Delta t)}}{\sigma_{pi}} \quad \text{com:}$$

$\Delta\sigma_{r(\Delta t)}$  = perda de tensão por relaxação pura (comprimento constante) até o instante considerado;

As especificações dos aços de protensão definem valores de relaxação correspondentes a 1000 horas sob temperatura de 20°C, referidas a valores de tensão de 60%, 70% e 80% da resistência característica  $f_{ptk}$ . Os valores correspondentes a tempos diferentes de 1000 horas, sempre a 20°C, são determinados com a seguinte expressão:

$$\psi_t = \psi_{1000} \cdot (t/1000)^{0,15} \quad \text{para } t \text{ em horas.}$$

Para valores intermediários de tensões permite-se a interpolação linear dos valores fixados pela norma ou pelos certificados dos aços. Para tensões superiores a  $0,80 \cdot f_{ptk}$  permite-se a extrapolação dos mesmos dados. E para tensões inferiores a  $0,50 \cdot f_{ptk}$  considera-se nula a perda por relaxação.

Para levar em conta o efeito da temperatura são necessários dados experimentais, já que a norma se omite neste aspecto.

d) perdas progressivas - formulação geral

A partir dos valores das deformações por retração e fluência do concreto e de relaxação do aço definidos anteriormente, deve-se determinar a perda de protensão total levando-se em conta a interação destas parcelas. A NBR-7197 apresenta um processo onde se supõe que haja aderência entre o concreto e a armadura e que a peça permaneça em estágio I, além da consideração de fase única na concretagem. Esta situação ocorre quando são satisfeitas as seguintes condições:

- concretagem e protensão executados em fases próximas, onde se podem desprezar os efeitos recíprocos;
- cabos próximos em relação à altura, de modo que seus efeitos sejam equivalentes ao de um único cabo equivalente.

Nestas condições, o valor da variação de tensão devido às perdas progressivas de protensão pode ser calculado com:

$$\Delta\sigma_{p,i} = \frac{\varepsilon_{cs(t,t_0)} \cdot E_p - \alpha_p \cdot \sigma_{co} \cdot \phi_{(t,t_0)} + \sigma_{po} \cdot X_{(t,t_0)}}{X_p + \alpha_p \cdot n \cdot \rho \cdot X_c} \quad \text{onde:}$$

- $\varepsilon_{cs(t,t_0)}$  = retração ocorrida de  $t_0$  a  $t$ ;
- $\sigma_{co}$  = tensão no concreto devido à protensão e à carga permanente;
- $\phi_{(t,t_0)}$  = coeficiente de fluência do concreto;
- $\sigma_{po}$  = tensão na armadura ativa devido à protensão em  $t_0$ ;

-  $X_{(u,t_0)}$  = coeficiente de fluência do aço:

$$X = - \ln[1 - \psi_{(u,t_0)}] \quad ;$$

-  $x_p = 1 + X_{(u,t_0)}$  ;

-  $x_c = 1 + 0,5 \cdot \phi_{(u,t_0)}$  ;

$$- \eta = 1 + \frac{e_p^2 \cdot A_c}{I_c} \quad ;$$

$e_p$  = excentricidade do cabo resultante em relação ao cg da seção de concreto;

-  $\rho$  = taxa geométrica da armadura de protensão =  $A_p/A_c$  .

Caso alguma das condições exigidas não seja satisfeita, a norma apresenta um processo de cálculo geral, que não é aqui apresentado.

### 3.3.5. DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento das peças de concreto protendido prevê a verificação dos estados limites de utilização e dos estados limites últimos:

- estados limites últimos por solicitação normal e tangencial;

- estados limites de utilização de descompressão, de formação de fissuras, de fissuração inaceitável, de compressão excessiva e de deformação excessiva.

#### 3.3.5.1. ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

As verificações dos estados limites de utilização são feitas em estágio I ou II, conforme a solicitação e consequente nível de fissuração. Em função da etapa analisada, é considerada a força de protensão correspondente, ou seja, desconta-se a

perda ocorrida até o instante respectivo.

a) estado limite de descompressão

Ocorre quando um ou mais pontos da seção transversal da peça tem tensão nula, inexistindo tensão de tração em qualquer outro ponto. O cálculo é feito considerando estágio I.

b) estado limite de formação de fissuras

É quando se inicia a fissuração da peça, correspondente ao aparecimento da primeira fissura. O cálculo considera estágio  $I_b$ , definido na NBR-6118, onde se adota diagrama retangular de tensão na tração e triangular na compressão, desprezando a contribuição da armadura.

A NBR-7197 permite um cálculo simplificado em estágio  $I_a$ : considera o concreto não fissurado e comportamento elástico-linear do material. O diagrama de tensões adotado é triangular na compressão e na tração, com tensões máximas  $f_{ck}$  e  $1,5.f_{ctk}$  respectivamente. Caso a forma da seção seja Tê ou Duplo-Tê o limite de tração adotado é  $1,2.f_{ctk}$ . A razão entre os módulos de deformação longitudinal da armadura de protensão e do concreto é adotada com valores de 15 para carregamentos frequentes e/ou quase permanentes e 10 para carregamentos raros, tentando com isso considerar a influência da retração e da fluência do concreto nas ações de longa duração. A partir dessas hipóteses, determina-se um valor referente ao momento fletor de fissuração da seção, acima do qual inicia-se a fissuração.

c) estado limite de abertura de fissuras

É o estado em que as fissuras têm o valor de abertura característica maior que o valor admissível. A verificação é feita em estágio II, de acordo com o anexo da NBR-7197, considerando o concreto fissurado e comportamento elástico linear do material. Como o concreto já está fissurado, nesta etapa o módulo de deformação longitudinal que melhor o

representa é o módulo secante.

Na estimativa do valor característico da abertura das fissuras, segue-se o disposto na NBR-6118; a tensão  $\alpha_s$  representa agora o acréscimo de tensão no centro de gravidade da armadura tracionada, calculada em estágio II. Este acréscimo ocorre entre o estado de neutralização e o instante do carregamento, tomando-se o valor de  $\rho_r$  (taxa de armadura) conforme a NBR-7197 indica em seu anexo.

d) estado limite de compressão excessiva

Ocorre quando as tensões de compressão na seção transversal das peças fletidas atingem o valor limite convencional de  $0,7.f_{ck}$ . Essa limitação procura evitar o esmagamento do concreto, a microfissuração interna e as deformações exageradas devido à fluência.

O cálculo é feito em estágio I, com os valores característicos referentes à idade  $j$  dias.

e) estado limite de deformação excessiva

É o estado em que as deformações atingem valores que inviabilizam a utilização da peça. Os limites estão definidos na NBR-6118. A verificação é feita em estágio I ou II, conforme o estado de fissuração.

Definidos os estados limites de utilização, as verificações são feitas conforme o tipo de protensão, que se caracteriza pela observância a alguns destes estados limites de utilização, para determinadas combinações de ações.

Os cálculos efetuados em estágio I ou estágio II são similares aos feitos para peças de concreto armado, para os quais se recomenda a consulta da NBR-6118, acrescentadas apenas as particularidades aqui mencionadas devido à protensão. Abdica-se neste instante da apresentação de formulação teórica destes cálculos, simples mas trabalhosos, por serem tradicionais e de conhecimento geral.

### 3.3.5.2. ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

A verificação da segurança nas estruturas de concreto protendido é normalmente feita para os estados limites últimos devido a solicitações normais e tangenciais. Também devem estar satisfeitos os estados limites últimos de perda de equilíbrio, de instabilidade por deformação e de transformação da estrutura em sistema hipostático.

#### a) estado limite último - solicitação normal

Conforme já se comentou, as diferenças entre o concreto armado e o concreto protendido são basicamente tecnológicas e nos materiais constituintes. O comportamento na ruptura é muito semelhante. A menos do pré-alongamento da armadura de protensão, que introduz um estado prévio de tensões no concreto e que pode ser considerado uma solicitação externa, a análise teórica é a mesma. Na determinação da tensão da armadura ativa na ruptura, a deformação devida ao pré-alongamento é somada à deformação subsequente devida ao carregamento.

O estado limite último de ruptura por solicitação normal também deve ser verificado na etapa da fabricação da peça. A NBR-7197 admite uma verificação simplificada conforme trata o item 9.2.2.2 da referida norma.

Em relação ao pré-alongamento, imagina-se o instante em que uma parte do esforço solicitante anula a compressão prévia do concreto provocada pela protensão na borda pré-comprimida. É a situação correspondente ao estado de neutralização; corresponde a uma situação em que o concreto está livre de tensões, ao menos em sua borda pré-comprimida, e portanto isento de deformações. Nesta etapa, a armadura de protensão tem uma deformação que corresponde à parcela decorrente do esticamento, acrescida da desprezível deformação causada pela fração das solicitações atuantes até este momento. Esta deformação é a que se denomina de pré-alongamento. Também nesta etapa a armadura passiva está isenta de tensões, conforme

se mostra na figura 3.5 no item 3.3.2.

A partir deste instante, tudo se dá como no concreto armado. O alongamento plástico excessivo da armadura que caracteriza o estado limite último convencional também é adotado 1%, contado porém a partir do estado de neutralização. Quando se caracteriza o escoamento da armadura de protensão, também a armadura passiva deve escoar, ou seja, ambas são aproveitadas integralmente.

Para calcular a deformação correspondente ao pré-alongamento, admite-se que a armadura ativa tem uma deformação adicional igual à deformação no concreto devido à protensão, de modo que a tensão no concreto seja nula.

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_c = \frac{|\sigma_{cp}|}{E_c} = \frac{1}{E_p} \cdot \alpha_p \cdot |\sigma_{cp}| = \frac{-\alpha_p \cdot \sigma_{cp}}{E_p}$$

Chamando  $P_n$  a força de neutralização, que representa uma força externa que se soma à força de protensão para anular a tensão no concreto, tem-se:

$$P_n = P + \alpha_p \cdot A_p \cdot |\sigma_{cp}| = P - \alpha_p \cdot A_p \cdot \sigma_{cp}$$

Assim, chamando  $\varepsilon_{pn}$  a deformação de pré-alongamento:

$$\varepsilon_{pn} = \frac{P_n}{A_p \cdot E_p}$$

A segurança na ruptura pode exigir a disposição de armadura suplementar além da armadura de protensão tracionada. De qualquer forma, independente desta verificação, uma armadura suplementar mínima sempre deve existir para o controle da fissuração, mesmo que esta fissuração não esteja prevista no projeto.

Tal qual no concreto armado, o cálculo é iterativo, devido à indeterminação do sistema de equações. Num procedimento simples e fácil para programação, adota-se uma posição de linha neutra, a partir da qual verifica-se o equilíbrio, tomando-se as

tensões correspondentes às deformações, definidas em função da linha neutra.

b) estado limite último - solicitação tangencial

A protensão introduz no concreto tensões normais de compressão que reduzem as tensões principais de tração, cuja direção é menos inclinada nas peças protendidas em decorrência deste fato. Assim, as fissuras eventuais de cisalhamento também têm menor inclinação em relação ao eixo longitudinal da peça. As bielas comprimidas, supostas a 45 graus na teoria clássica de treliça para peças de concreto armado, situam-se agora em 25° a 35°. Todos estes efeitos são mais acentuados conforme aumenta o grau de protensão.

O anexo da NBR-7197 complementa os dispositivos da NBR-6118 na verificação do estado limite último por solicitação tangencial. A componente normal da força de protensão é considerada uma força normal externa de compressão, de igual intensidade.

A modificação introduzida no anexo, que diferencia as peças protendidas (considerando suas peculiaridades), é o valor da tensão absorvida pelo concreto,  $\tau_c$  :

$$\tau_c = \psi_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad \text{com}$$

$$\psi_1 = 0,15 \quad \text{na flexão simples e flexo-tração com linha neutra na seção;}$$

$$\psi_1 = 0,15 \cdot \left(1 + \frac{M_o}{M_{d,max}}\right) \quad \text{na flexo-compressão ou com protensão;}$$

$$\psi_1 = 0 \quad \text{na flexo-tração com linha neutra fora da seção.}$$

Nestas expressões, tem-se:

- $M_o$  = momento fletor que anula a tensão normal na borda menos comprimida;
- $M_{d,max}$  = momento fletor da seção que está mais solicitada à flexão.

O momento  $M_o$  (momento de descompressão) refere-se a uma solicitação em que atuam:

- a) a força normal e o momento fletor provocados pela protensão, com coeficiente de ponderação  $\gamma_p = 0,9$ ;
- b) a força normal devida aos carregamentos, com  $\gamma_f = 0,9$ .

$$M_o = (\gamma_p \cdot P_\omega + \gamma_f \cdot N_{g+q}) \cdot \frac{W_1}{A_c} \cdot \gamma_p \cdot P_\omega \cdot e_p$$

A relação  $\frac{M_o}{M_{d,max}}$  fornece uma indicação da fissuração por flexão no estado limite último. As fissuras devidas a solicitações normais influem no valor das tensões de tração da alma. O valor deste parâmetro é limitado em 1,0 para evitar que o valor da resistência de cisalhamento calculada seja maior que a tensão correspondente à fissuração da alma.

Também neste anexo altera-se o valor da tensão de cisalhamento última. Para peças lineares com  $b_v < 5 \cdot h$  e armadura transversal vertical,  $\tau_{vu} = 0,30 \cdot f_{cd} \leq 4,5$  MPa. Todos os outros procedimentos são idênticos ao prescrito na NBR-6118.

## CAPÍTULO 4

### ARGAMASSA ARMADA PROTENDIDA

Este capítulo reúne os conceitos tratados nos capítulos anteriores. As definições, características, materiais constituintes, procedimentos de projeto e técnicas de execução referentes à argamassa armada e ao concreto protendido, juntam-se nesta análise de caracterização do material híbrido (argamassa armada protendida), com as adaptações pertinentes.

Quanto à aplicação do material, suas potencialidades confundem-se com as da argamassa armada, com um pouco mais de liberdade no aumento das espessuras, redução do número de telas, utilização de telas de malhas maiores, acrescentando ainda novas possibilidades de utilização, devido à introdução da protensão.

#### 4.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A bibliografia disponível que trata especificamente da protensão em peças de seção delgada é escassa. Na literatura nacional não há praticamente nenhuma publicação que aborde o projeto destes elementos. Apesar da intensa produção de peças pré-fabricadas protendidas, inclusive de componentes delgados como as vigas-telha, as informações técnicas de projeto e produção ficam restritas aos centros produtivos.

Na bibliografia internacional, não se encontrou registros específicos sobre peças de concreto protendido de seção delgada nas principais publicações. A consulta aos volumes dos últimos 15 anos do PCI (Prestressed Concrete Institute) foi inócua neste aspecto; seus artigos dirigem-se principalmente às grandes estruturas.

Entretanto, sob a denominação de argamassa armada, existem alguns trabalhos sobre o uso da protensão em conjunto com este material, basicamente na Índia, China, Nova Zelândia e Austrália. Além disso, a Norma Soviética<sup>22</sup> de argamassa armada traz algumas recomendações sobre o emprego da protensão.

Ressalvando-se as diferenças da argamassa armada produzida no Brasil com o "ferrocement" de outros países, tanto as recomendações da Norma Soviética, como os resultados dos trabalhos experimentais estrangeiros, são referências iniciais, sendo que algumas das suas recomendações e conclusões podem ser transportadas ao material aqui desenvolvido.

#### 4.1.1. NORMA SOVIÉTICA - ALGUMAS INDICAÇÕES

As recomendações que se apresentam aqui referem-se principalmente a aspectos construtivos.

- Tela na região comprimida: recomenda-se utilizar poucas telas na região comprimida, que devem ser simétricas em relação à armadura de protensão. No Brasil, ainda que se utilizem telas com fios de maior diâmetro e mais rígidas, enquanto não houver dados mais confiáveis, esta indicação deve servir como referência;

- tela na região de ancoragem: recomenda-se dispor ao menos duas telas envolvendo a armadura de protensão, num comprimento não inferior a 50 vezes o diâmetro desta armadura. Elas funcionam como uma fretagem, que deve absorver os esforços de introdução da protensão. Nos ensaios efetuados neste trabalho seguiu-se esta indicação;

- cobrimento: recomenda-se um cobrimento mínimo para a armadura de protensão igual a duas vezes o seu diâmetro, porém com valor contido no intervalo entre 8mm e 15mm. São números muito razoáveis, conforme se discute no item 4.7.

- telas protendidas: não se recomenda a protensão através das telas, mas de armadura discreta especial de alta resistência.

#### 4.1.2. TRABALHOS EXPERIMENTAIS

Há publicações mais atuais que apresentam os principais trabalhos com a argamassa armada protendida. Alguns deles são sucintamente apresentados. Os principais dados dos ensaios são mostrados para se conhecer o material que se

pesquisa no exterior (traço da argamassa, dimensões dos elementos, armaduras, telas, etc.). Destaca-se nestes dados a tipologia distinta das telas, compostas de fios finos e malhas pequenas.

a) R.P. Pama e H.V. Thang [1986]<sup>23</sup>

Apresentam um estudo sobre o comportamento da argamassa armada protendida na flexão e tração, onde mostram expressões para o cálculo da fissuração, considerando o material homogêneo e analisam resultados de ensaios com placas, variando o número de telas e o nível de protensão.

Alguns dados dos ensaios:

- espessura das placas: 30mm;
- traço da mistura: 1:1,75:0,38;
- diâmetro da armadura de protensão: 5,0mm;
- telas com malhas de 12,7mm x 12,7mm, uniformemente distribuídas;

As principais conclusões decorrentes da introdução da protensão foram:

- aumento do momento fletor de fissuração;
- diminuição de flechas;
- aumento da rigidez (inclinação carga x flecha) só após a fissuração;

- variação insignificante no momento fletor resistente último (mantida a taxa de armadura) e no número e espaçamento de fissuras;

A variação na quantidade de telas indicou que quanto mais telas, maior a rigidez, maior o número de fissuras e menor o valor da abertura das fissuras.

b) P. Desahy e V. Reddy [1988]<sup>24</sup>

Experimentação com perfis de argamassa armada protendida, realizando-se ensaios de 8 modelos de elementos de piso/cobertura em seção U, observando-se o momento fletor de fissuração, momento fletor último e deformabilidade das peças.

Alguns dados dos ensaios:

- espessura das paredes: 20mm;
- traço da mistura: 1:1,5:0,4;
- diâmetro da armadura de protensão: 5,0mm;
- diâmetro da armadura complementar: 7,0mm;
- comprimento das peças: 3 a 6 metros;
- pista de protensão: 1,5m x 10,0m;

$$P_{\text{máx}} = 60tf;$$

$$e_{p,\text{máx}} = 60\text{cm};$$

- seção transversal: ver figura 4.1.

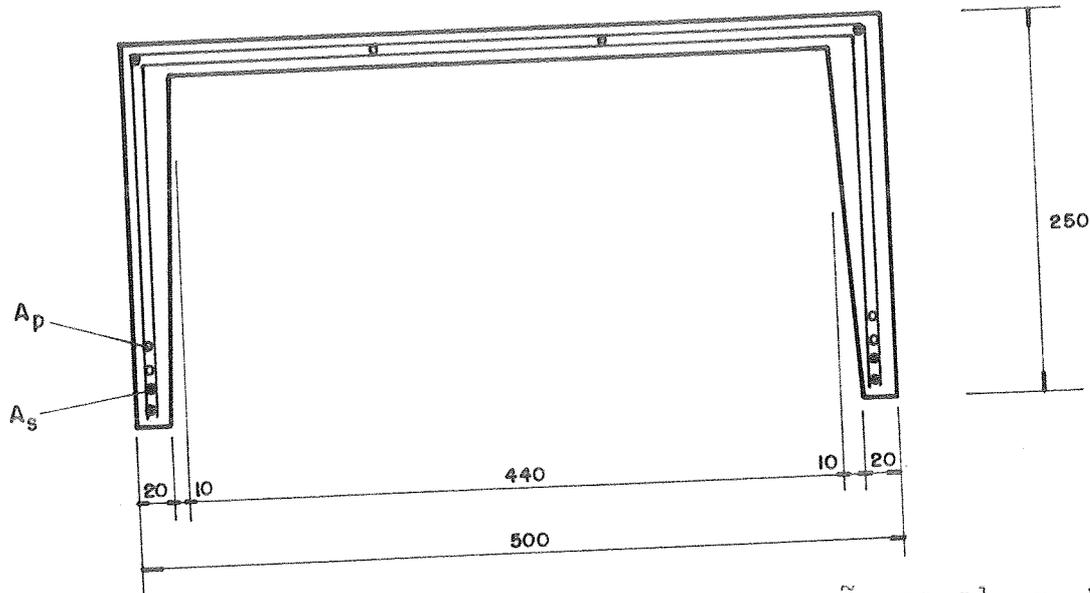


Fig.4.1 - Seção transversal da seção canal - medidas em milímetros.

As conclusões para o momento fletor de fissuração, momento fletor último e deformações são iguais às anteriores.

c) P. Desahy, K.S.N. Rao e V. Reddy<sup>25</sup>

Projeto, produção, ensaio e análise de custos de vigas para cobertura, de seção trapezoidal para vãos de 5,5 metros.

Alguns dados dos ensaios:

- espessura: 20mm;
- diâmetro da armadura de protensão: 5,0mm;
- diâmetro da armadura complementar: 7,0mm;

- força de protensão efetiva: 12tf;
- seção transversal: ver figura 4.2.

As conclusões são análogas às anteriores.

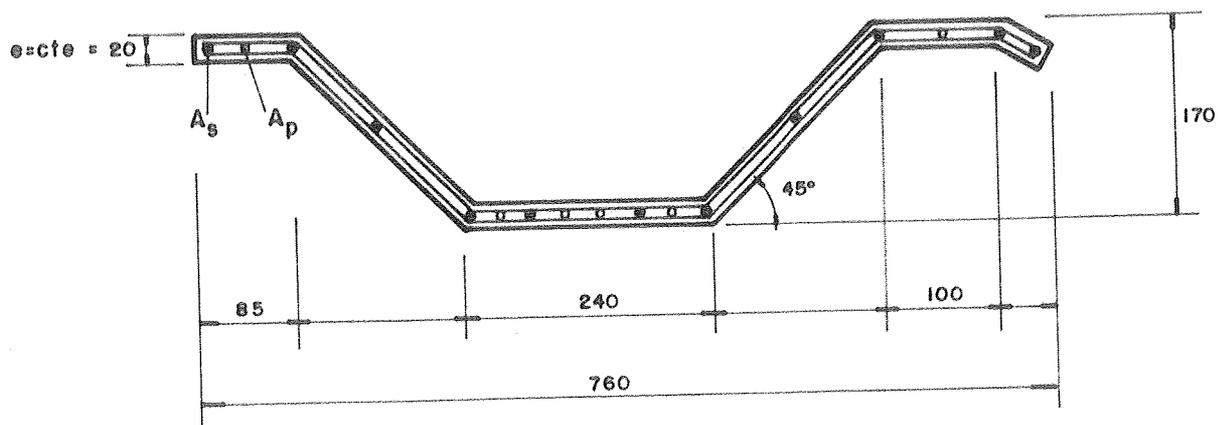


Fig. 4.2 - Seção Transversal da viga-telha - medidas em milímetros.

Há ainda um trabalho de Wang Kai-Ming [1986]<sup>26</sup>, sobre o comportamento de placas de argamassa armada protendida de espessura variável. Neste trabalho propõe-se o cálculo das perdas de protensão de modo similar ao de concreto protendido, a menos das perdas por fluência e retração da argamassa, adotadas igual a 1,5 vezes a do concreto correspondente.

#### 4.2. POTENCIAL DE APLICAÇÃO

A aplicação de um material em qualquer obra de Engenharia deve obedecer critérios que nem sempre envolvem apenas as características técnicas relativas a ele. Além de suas propriedades e do seu comportamento, a solução a se adotar deve contemplar as necessidades e disponibilidades do local onde se dá a intervenção. Ou seja, muitas vezes uma proposta que apresenta tecnologia avançada não se mostra adequada como a resposta a um problema que não comporta este tipo de solução. A inviabilidade pode ser devida a aspectos de custos, de dificuldades de implantação, de ausência de mão-de-obra qualificada, ou mesmo pela possibilidade de se alcançar os objetivos com procedimentos mais simples.

As peças de argamassa armada parecem se acomodar bem a esta situação. Elas podem ser obtidas a partir de técnicas elaboradas ou simplificadas, definidas em função de sua utilização e do desempenho que se espera delas, conforme já relatado por Hanai[1981]<sup>27</sup>. A introdução da protensão não altera muito este quadro, já que os seus efeitos também podem ser conseguidos de modo mais ou menos requintados.

No caso de produção mecanizada e intensiva, há que se dispor de equipamentos e instalações mais requintados e de custo mais elevado, de modo a ser obter o controle, a qualidade e o volume de produção requeridos:

- uma pista de protensão extensa, para garantir o nível de produção e para não haver grandes perdas no esticamento da armadura ativa;
- fôrmas metálicas, para possibilitar a execução nas dimensões exatas, inclusive no cobrimento, aspectos estes mais relevantes em peças de pequena espessura;
- moto-vibradores, compactadores, e até mesmo extrusoras, para lançamento, conformação e adensamento do concreto ou argamassa;
- equipamentos de protensão modernos, preferencialmente automáticos, para estiramento e perfeito controle da tensão nos cabos;
- usinas de concreto (argamassa), para garantir a produção em quantidade e qualidade;
- laboratório de materiais (aço e cimento).

As fábricas de pré-moldados existentes são exemplos típicos. Nestas unidades a possibilidade da produção de peças de argamassa armada protendida depende basicamente de mudar a concepção de alguns elementos atualmente produzidos, já que as diferenças residem apenas nas formas e nas quantidades dos materiais constituintes. As próprias vigas-telhas representam esta tendência de concreto protendido leve, incorporando aspectos inerentes à argamassa armada, que são as formas mais delgadas e a armadura em telas, mais difusa.

Talvez não seja este o campo mais fértil para a argamassa protendida, conforme é argumentado mais adiante; não se pretende substituir os atuais pré-moldados protendidos, com produção mais voltada a grandes obras, cujos componentes do sistema estrutural são usualmente pesados. A incompatibilidade da esbeltez das peças de argamassa com a utilização em galpões industriais por exemplo, é evidente para os elementos mais solicitados.

Numa outra situação, de peças com níveis mais baixos de exigência estrutural, como no caso de pré-moldados leves, compatíveis com sua utilização, as instalações e os equipamentos que formam a infra-estrutura básica necessária para a produção destes elementos, variam em função dos requisitos exigidos. Hanai<sup>2</sup> já antevia esta alternativa, de produção mais simplificada: "...é possível utilizar o mesmo princípio em instalações de média produção construindo-se - não carros vibratórios mais complexos - mas gabaritos vibratórios, associados a fôrmas parciais fixas. Estes gabaritos vibratórios poderiam ser movidos manualmente, com o auxílio de cabos e engrenagens, adensando e conformando a argamassa lançada manualmente...". Conforme o nível de produção, as instalações e os equipamentos podem ser mais simples. Os equipamentos de protensão podem ficar restritos a um macaco monofio com encunhamento manual, e um manômetro para controlar a tensão nos cabos. Os efeitos da protensão podem também ser conseguidos sem macacos especiais: o esticamento se daria por processos mecânicos, utilizando esticadores de rosca. Naturalmente isto se aplica aos casos em que a protensão necessária é de pequena magnitude, como por exemplo aquela necessária apenas para garantir as solicitações decorrentes do transporte e montagem das peças. Esta alternativa, apesar de parecer simplista ou de carecer de maior precisão tecnológica, merece um estudo cuidadoso, pois pode ser economicamente vantajosa em muitos casos.

Pequenas fábricas podem representar um centro produtivo nesta situação, o que proporciona o desenvolvimento e a utilização do material para além dos grandes centros. No

decorrer deste trabalho apresenta-se sucintamente o esquema da pista de protensão e os equipamentos utilizados para a execução dos modelos aqui ensaiados, materializando e exemplificando esta possibilidade.

Ou seja, as características, e portanto a tecnologia, não são rigidamente definidas. Ao contrário, elas se impõem a partir das diferentes aplicações. É a adequação tecnológica do produto ao espaço, às necessidades, ao próprio tempo. Há que se registrar ainda que a viabilidade deste novo material se estabelece principalmente dentro deste contexto de interpretação abrangente da argamassa armada. Contraria-se a idéia inicial de "infissurabilidade", consequência de um consumo de cimento e uma subdivisão de armadura muito intensos - o ferrocimento de Nervi. Com o espírito então que norteia as pesquisas desenvolvidas pelo Grupo São Carlos, ou seja, de redução de consumo dos materiais nobres da argamassa armada, mantendo porém as propriedades mecânicas em níveis satisfatórios. Procura-se assim adequar o material à realidade econômica, de maneira a torná-lo uma alternativa competitiva.

A partir de suas características peculiares, especialmente relativas à leveza das peças e ao potencial de pré-moldagem, a argamassa armada, protendida ou não (conforme a necessidade de desempenho dos componentes), apresenta-se como solução inovadora em diversas situações, quais sejam:

- na execução de pontilhões, galerias e passarelas para pedestres. A pré-fabricação e sistematização dos elementos constituintes, racional e planejada, pode reduzir custos e principalmente interferências, minimizando impactos e transtornos, tão comuns nas zonas urbanas quando se tem intervenções deste tipo. O transporte e a montagem destas peças são muito facilitados, ao dispensarem os equipamentos mais pesados;

- em diversos outros problemas de infra-estrutura urbana (como por exemplo, canais de drenagem, muros de arrimo, reservatórios de água, etc), especialmente nas periferias e locais de acesso mais difícil, em que a leveza das peças e as técnicas simples de execução "in loco" podem constituir-se num

aspecto dominante no desenvolvimento de soluções inovadoras;

- nos diversos sistemas estruturais para edificações e especialmente para os componentes acessórios que completam o sistema principal, onde já há vários exemplos de utilização da argamassa armada, e que podem ter seu desempenho melhorado com a introdução da protensão, sobretudo nos elementos que trabalham predominantemente fletidos;

- nas cascas, cuja concepção favorece o uso da argamassa armada: pequena espessura e resistência pela forma. É uma alternativa ainda muito pouco explorada, possivelmente em razão da dificuldade de industrialização.

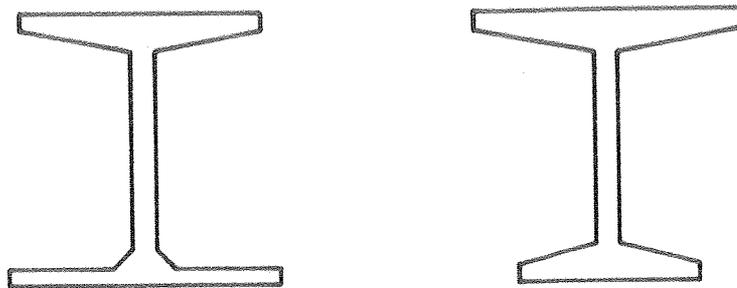
Uma vez listadas as principais possibilidades para a utilização das peças de concreto protendido de pequena espessura em situações gerais, cabe agora uma tentativa de materialização, ainda de modo sucinto, mas objetivo, de exemplos representativos de aplicação.

Um galpão de dimensões médias, urbano ou rural, pode resultar de um sistema estrutural em que as peças de argamassa armada protendida sejam adequadas, especialmente para os componentes com solicitação não muito intensa.

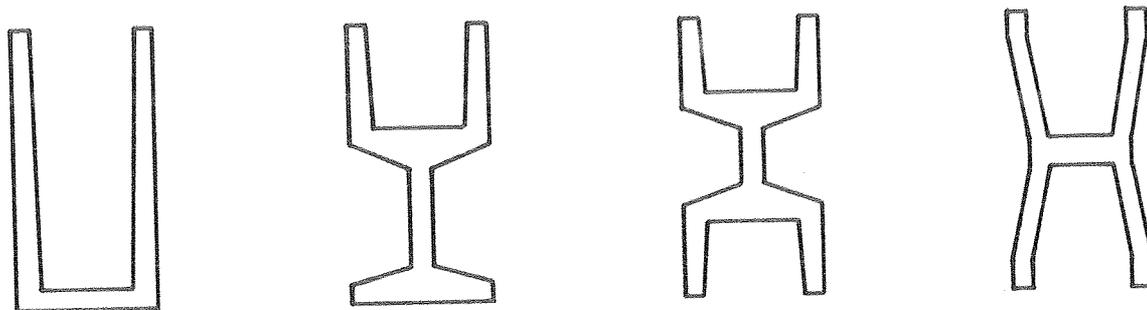
Particularmente para vãos livres contidos num intervalo de 6 a 12 metros, a execução de vigas, calhas, telhas, lajes e painéis pode ser otimizada com esta proposta, de modo a aproveitar integralmente a capacidade dos materiais, aço e concreto, conjuntamente. Esta faixa de utilização é praticamente inexplorada no mercado de pré-fabricados atual, essencialmente voltado à produção de sistemas construtivos pesados, sendo que grande parte das necessidades desse mercado é atendida tradicionalmente com estruturas de concreto, madeira, ou de aço, em conjunto com telhas de cimento amianto, aço galvanizado ou alumínio.

Assim, para este grande grupo de aplicações (destinadas à construção de galpões comerciais, industriais ou agrícolas, creches, escolas e outras edificações de porte médio), propõem-se algumas seções típicas para os componentes dos sistemas construtivos, conforme mostra a figura 4.3:

a) vigas : vigas de suporte, travamento e baldrame;



b) vigas-calha;



c) painéis, lajes e vigas-telha.

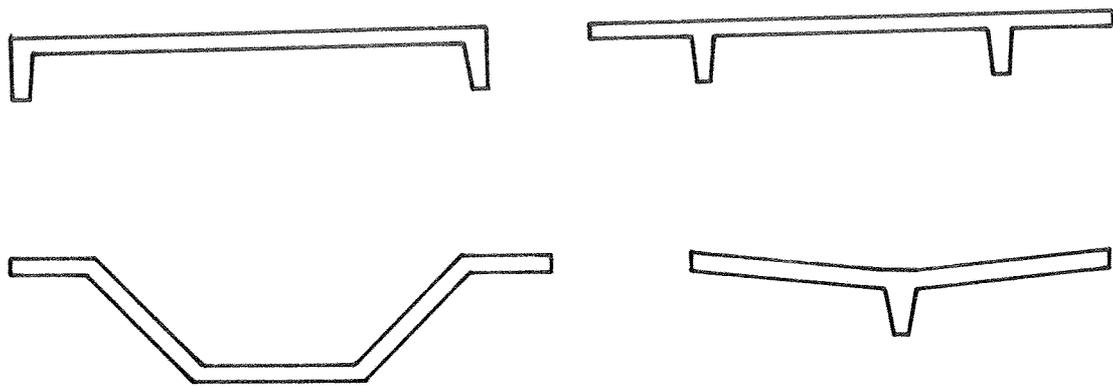


Fig.4.3 - Seções típicas dos elementos de argamassa armada protendida

Nota-se que as seções propostas não apresentam praticamente nenhum ineditismo, o que não deve causar estranheza. A produção das peças nas atuais fábricas de pré-moldados é substanciada por anos de pesquisas e experiências, sucessos e fracassos. O que se propõe é imprimir a elas um caráter de leveza, diminuindo a espessura ou eventualmente otimizando as formas. A idéia é de se fazer uma peça de concreto protendido tendo em mente os conceitos desenvolvidos na tecnologia da argamassa armada, isto é, conjugando as propriedades e características destes materiais que à primeira vista parecem alternativos.

Para pontilhões e passarelas, as vigas e lajes representam muito bem a potencialidade do material nestas situações, já que suas solicitações situam-se em níveis intermediários, permitindo adotar-se peças mais leves do que num sistema em concreto armado. A canalização de córregos com elementos pré-fabricados de argamassa armada, já empregados em Salvador e Rio de Janeiro, ganha corpo com a perspectiva atual [1990]<sup>28</sup> de execução de 5.000m<sup>2</sup> na cidade de São Paulo. Na retaguarda deste projeto está em operação uma fábrica municipal de elementos pré-moldados, operada pela Empresa Municipal de Urbanização de São Paulo; a fábrica também deve fornecer os componentes para a construção de muros para contenção de taludes, escadas drenantes, creches, escolas, velórios, abrigos para ônibus e outras obras. Deve ser enfatizado que a participação das prefeituras em geral cria as condições para a viabilização destes empreendimentos; há a garantia da padronização e sistematização das obras, que são de responsabilidade do município. Desta forma, a execução de várias escolas, creches, velórios, canais etc, estabelece um mercado amplo e garantido, representado por apenas um grande cliente que é a Prefeitura Municipal.

#### 4.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Os conceitos aqui tratados substanciam procedimentos de projeto de peças de argamassa armada pretendida tendo em vista tanto aspectos de execução como de dimensionamento. A normalização inexistente para utilização do material impõe algumas dificuldades, inclusive pelo caráter de ineditismo da proposta e dada a ausência de tradição de longa data no campo; a lógica encaminha as soluções em observância às normas correlatas, quais sejam, Projeto e Execução de Argamassa Armada (NBR-11173), Projeto de Estruturas de Concreto Protendido (NBR-7197), Projeto e Execução de Estruturas Pré-moldadas (NBR-9062), e Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado (NBR-6118), especialmente as duas primeiras, pois o objeto deste estudo situa-se na interface dos materiais por elas tratados. A impossibilidade de satisfazer concomitantemente às exigências destas Normas é um fato, já que elas tratam de produtos diferentes entre si e do próprio material aqui abordado. Conforme se detalha neste texto, surgem muitos pontos conflitantes. Nestas situações, a solução se dá caso a caso, em função dos conceitos que envolvem o fenômeno analisado, adequando-os aos objetivos estabelecidos para o material híbrido, quais sejam: conjugar as propriedades das peças de argamassa armada com as de concreto protendido, de maneira a se obter peças leves, com deformação e fissuração controladas, e resistentes a esforços de flexão e de cisalhamento. Os conceitos que, coexistindo, possibilitam ao material argamassa armada pretendida apresentar as características citadas são fundamentalmente:

##### - ARGAMASSA ARMADA:

- formas peculiares → peso reduzido (resistência pela forma);
- pequena espessura → peso reduzido, pequeno cobrimento, agregado miúdo;
- armadura difusa → controle, sistematização e limitação da abertura de fissuras.

- CONCRETO PROTENDIDO:

- protensão → peso reduzido (otimizando a utilização de concreto e aço de alta resistência);
- controle da fissuração (limitando os esforços de tração);
- melhoria do desempenho na flexão e no cisalhamento.

A partir desta idéia de fusão de técnicas e procedimentos de projeto, são analisados neste item alguns aspectos característicos da interface do concreto protendido e da argamassa armada onde ocorrem as situações de confrontação das normas correspondentes. Neste trabalho, de caráter exploratório, adotam-se em algumas situações procedimentos específicos que parecem mais indicados neste momento, mas que, muitas vezes, carecem de comprovação experimental que subsidie estas opções. Melhor definição só se conseguiria com ensaios específicos e representativos.

Ao contrário da idéia de se dividir esta abordagem de conceitos e procedimentos em etapas de execução e de dimensionamento como nos capítulos anteriores, opta-se aqui por indicá-los agrupados. A dissociação em técnicas de dimensionamento e execução é quase que formal; ambas visam a um bom desempenho de um produto final, consequência de um bom projeto. Os procedimentos de execução interagem sobremaneira com o dimensionamento das peças, e vice-versa. Assim, apresenta-se nos itens seguintes as características de desempenho, requisitos e potencialidades referidas aos seguintes tópicos:

- materiais: cimento, agregado, água e armaduras;
- argamassa;
- arranjo de armaduras: barras, telas e fios ou cordoalhas;
- espessura;
- cobrimento;
- aderência;
- introdução da protensão;
- instabilidade;

- fissuração;
- deformação;
- ruptura.

#### 4.4. MATERIAIS

##### 4.4.1. CIMENTO

Para sua correta utilização seguem-se as disposições gerais conforme a NBR-6118, em concordância também com a norma de argamassa armada. Tratando-se de peças pré-moldadas, o uso de cimentos de alta resistência inicial (ARI) otimiza a produção, permitindo a transferência da protensão ao concreto com idades menores, liberando as fôrmas para a execução de novas peças. Em caso de cura a vapor, consegue-se produzir peças diariamente, pois o ciclo dura aproximadamente 15 horas, conforme mostrado no capítulo 2; neste caso, a protensão seria liberada após a cura e com folga para a montagem da próxima peça na fôrma.

A cura por imersão também pode ser muito eficiente, porém a protensão inviabiliza a produção em série, pois o conjunto peça-fôrma só pode ser imerso após a liberação da protensão, pois a armadura é pré-tracionada. Neste caso, a utilização de cimento ARI é praticamente obrigatória. A imersão no tanque de cura logo após o adensamento também torna-se impossível. A solução seria adotar cura por molhagem até atingir resistência compatível para a liberação dos fios/cordoalhas e então proceder a cura por imersão. Estima-se então um ciclo mais longo para cada fôrma, variável conforme a exigência de resistência para a transferência da protensão, e conforme o tipo de cimento utilizado. Outra possibilidade é adotar-se, ao invés de pistas de protensão, "fôrmas protendidas", ou seja, a fôrma constitui-se no apoio das ancoragens e desta forma o conjunto peça-fôrma pode ser levado ao tanque antes da transferência da protensão ao concreto.

#### 4.4.2. ÁGUA

Deve-se obedecer ao disposto na NBR-6118, reforçando a proibição de se usar água do mar com cloretos em quantidades nocivas à durabilidade (devido à corrosão das armaduras). A corrosão é potencialmente perigosa devido à pequena espessura e cobertura, além da maior susceptibilidade da armadura de protensão ao fenômeno, conforme explicado no capítulo 3.

A relação água/cimento deve ser tal que proporcione um concreto ou argamassa com a resistência desejada, com condições de trabalhabilidade satisfatórias, e compatível com a durabilidade que se espera para a peça. Às peças de concreto protendido permite-se um valor máximo de 0,55 para este parâmetro, com resistência característica mínima de 21MPa (eventualmente 0,65 e 18MPa); os limites para peças de argamassa armada são 0,45 e 25MPa, iguais ao adotado na NBR-9062 para peças pré-fabricadas. Recomenda-se neste trabalho a observância de limites rígidos, sempre que possível e conveniente, pois a quantidade de água necessária para a hidratação é sempre menor que a utilizada para conseguir a trabalhabilidade desejada. O excesso de água traz prejuízo na resistência e qualidade da argamassa, com possíveis danos à durabilidade da peça.

O uso de aditivos com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade, reduzir a relação a/c ou aumentar a compacidade e impermeabilidade da argamassa é permitido, desde que não potencialize a corrosão, em particular a corrosão sob tensão, conforme recomendações da NBR-7197 e NBR-9062.

#### 4.4.3. AGREGADOS

A norma de argamassa armada limita as dimensões dos agregados em 0,25 vezes a menor espessura da peça, ou metade da menor abertura da malha da tela; neste trabalho não se pretende impor limites rígidos, podendo-se empregar como agregado, somente a areia, ou uma mistura de areia e pedrisco, caracterizando um microconcreto. A utilização do pedrisco proporciona a redução da quantidade de água da mistura,

e portanto uma argamassa de melhor qualidade, conforme se explica no capítulo 2. Isto é, a presença de uma parcela mais graúda na composição dos agregados não invalida os conceitos e hipóteses envolvidos na caracterização de peças de argamassa armada, mesmo que isso altere algumas propriedades mecânicas. Já há inclusive uma recomendação para o uso de pedrisco ou areias bem graduadas nas peças de argamassa armada em várias situações, que vem sendo adotada em pesquisas mais recentes.

#### 4.4.4. ARMADURA ATIVA

Devem ser seguidas as recomendações constantes na NBR-7197 e nas normas específicas dos tipos de armadura adotados. A escolha do tipo de aço deve obedecer a alguns critérios que podem ser relevantes neste caso de peças pré-moldadas de pequena espessura.

Com relação à relaxação da armadura tensionada, em diversas situações as perdas podem ser importantes e indicar o uso de aços de relaxação baixa. As situações mais comuns são listadas a seguir:

- sendo a peça de pequena espessura, com o uso do aço RB, pode-se conseguir os efeitos finais da protensão com menor área de aço, adequando-a ao reduzido espaço para o alojamento dos fios/cordoalhas, principalmente quando o nível de protensão é elevado;

- em caso de predominância de cargas acidentais, a peça trabalha comprimida na zona da armadura ativa na maior parte do tempo, intensificando as perdas progressivas;

- neste mesmo contexto, a força de protensão, sendo elevada para garantir as exigências de utilização sob a ação das eventuais cargas acidentais intensas, pode provocar tensões normais de tração indesejadas na zona comprimida sob ação só do peso próprio (situação predominante); quanto maiores as perdas, maiores as exigências iniciais, o que torna a situação mais desfavorável.

Com relação à aderência, a escolha deve priorizar os tipos de armadura que efetivamente sejam capazes de transferir à

argamassa os esforços de protensão. Há no caso o agravante da pequena espessura e da tensão elevada a que são submetidas estas armaduras. Em função disso, são utilizadas armaduras constituídas por fios entalhados ou cordoalhas, mais eficientes neste aspecto, conforme explicado no capítulo 3 no conceito da aderência.

#### 4.4.5. ARMADURA PASSIVA

Deve-se seguir as disposições constantes na NBR-6118, e especificamente a NBR-7480<sup>2º</sup> e NBR-7481<sup>3º</sup> para as barras e fios de aço e para as telas de aço soldadas respectivamente. Também deve ser estudada a utilização de outros tipos de tela, conforme sugere a norma de argamassa armada, que nestes casos recomenda considerar as propriedades mecânicas conforme as especificações do fabricante.

Atualmente o Grupo de Pesquisas de São Carlos trabalha principalmente com armadura de telas de aço soldada, e mais recentemente, com tela de chapa de aço expandida, além das eventuais barras complementares. As telas de chapa de aço expandida são uma alternativa viável em virtude da possibilidade de barateamento dos custos das telas, e dos bons resultados obtidos em pesquisas realizadas. Elas atuariam principalmente na configuração e controle das fissuras, e as armaduras ativa e complementar contribuiriam no aumento da resistência mecânica.

#### 4.5. ARGAMASSA

A utilização de argamassas com alta resistência nas peças protendidas compatibiliza o seu uso em conjunção com o aço de alta resistência (armadura ativa), proporcionando o aproveitamento integral destes materiais. A argamassa deve absorver as tensões de compressão (na zona que será tracionada em serviço) devidas à protensão, muitas vezes elevadas; o aço de alta resistência deve ser capaz de, após o pré-alongamento, absorver ainda os esforços subsequentes, com deformação tal que possa atingir o escoamento próximo à ruptura.

A exigência de desempenho pode ser ainda mais relevante em peças leves, com solicitação predominante devido à carga accidental. Assim, além do aumento da tensão de compressão na região da armadura ativa, pode haver esforços de tração significativos na zona comprimida em serviço na etapa de fabricação, requerendo igualmente um melhor comportamento na resistência à tração.

#### 4.6. ARRANJO DAS ARMADURAS

Para o arranjo das armaduras, distinguem-se duas situações: armadura ativa e armadura passiva.

##### a) armadura de protensão

A armadura ativa é composta por fios ou cordoalhas de alta resistência. A operação de protensão em telas é muito difícil de ser realizada, e as experiências internacionais referentes ao assunto na bibliografia consultada, também indicam uma protensão independente das telas. O uso de fios e cordoalhas melhoram a rigidez do conjunto da armação e podem substituir as barras complementares ao longo das linhas de dobramento das telas, recomendadas pela norma de argamassa armada.

Em linhas gerais segue-se o disposto na NBR-7197, inclusive no aspecto da proteção (envolvimento total da armadura por concreto). Conforme o arranjo adotado, o cobrimento fica automaticamente determinado, uma vez fixados o tipo de armadura e a espessura do elemento. Este tópico merece um estudo mais apurado, por serem muito distantes os cobrimentos aceitáveis para peças de concreto protendido e para peças de argamassa armada. Ele é tratado posteriormente no item 4.7, específico sobre o assunto.

##### b) armadura passiva

A armadura passiva é constituída pelos fios longitudinais e transversais das telas e pelas eventuais barras

ou fios complementares. Ensaio mais específicos podem esclarecer o comportamento de elementos armados com telas de malhas maiores, principalmente quanto à configuração das fissuras. O espaçamento dos fios transversais das telas é determinante (conjuntamente com a deformação no aço) na abertura das fissuras. Com a introdução da protensão, pode-se estudar um aumento na abertura das malhas, desde que haja mais rigor nos limites permitidos às tensões de tração na armadura.

As condições prescritas na norma para a tipologia das telas são:

- tela de aço soldada: diâmetro dos fios constituintes contido no intervalo de 0,56mm a 3,0mm, com espaçamento máximo entre fios transversais e longitudinais igual a 50mm;

- tela de aço de chapa expandida: espessura da lâmina contida no intervalo de 0,3mm a 1,6mm, com a maior dimensão das malhas igual a 38mm.

#### 4.7. COBRIMENTO

Em relação a este parâmetro surge a primeira grande incompatibilidade entre as peças de concreto protendido e de argamassa armada, enquanto análise das normas. A NBR-7197 prescreve valores elevados para o cobrimento, quando comparados com os estabelecidos pela norma de argamassa armada. O cobrimento mínimo para a armadura de protensão, assim como para qualquer tipo de armadura, decorre da necessidade de se garantir a sua integridade, em qualquer condição. Desta forma, a NBR-7197 adota valores que variam entre 2,0cm e 5,0cm, conforme o tipo de peça e a agressividade do meio ambiente. A NBR-9062 indica para os elementos pré-fabricados, em função dos mesmos parâmetros e também do nível de solicitação, valores um pouco menores, variáveis a partir de 1,0cm, fundamentados num controle de execução mais rigoroso.

Por outro lado, no caso de peças de pequena espessura, o cobrimento máximo permitido visa a preservar a eficiência da

armadura difusa no controle da fissuração. Camadas muito espessas sem armadura ficariam sem controle perante efeitos indesejáveis, como os decorrentes de tensões de tração oriundas das solicitações, retração e variação da temperatura. Assim, o limite superior tem sido fixado em cerca de 10mm para as peças de argamassa armada.

Diante deste quadro de confrontação, parece mais lógico neste caso adotar cobertura da ordem de 10mm, preservando a idéia de se ter elementos que tenham características de fissuração peculiares advindas do arranjo das armaduras difusas.

#### 4.8. ADERÊNCIA

Em exposição anterior no item 4.4.4, quando se analisa a escolha do tipo de aço a empregar, enfatiza-se que além da qualidade do aço, interessa muito o tipo da armadura. Sugere-se como indicativo o uso de fios entalhados ou de cordoalhas, para melhorar as condições de aderência. Igualmente relevante é escolher o diâmetro mais conveniente. Para acompanhar a idéia de armadura subdividida, ele deve ser reduzido, já que também funciona como armadura suplementar às telas e contribui para a configuração adequada das fissuras. Para permitir o perfeito alojamento dos fios nas peças, de modo a ser totalmente envolvido pela argamassa e garantir a eficiência da aderência, também indica-se diâmetro reduzido. Uma vez fixado o nível de protensão desejado, quanto menor o diâmetro dos fios (e conseqüentemente maior o número de fios para se ter a mesma área de aço), maior a superfície específica de contato entre a argamassa e o aço; portanto, mais eficiente a interação aço-argamassa nos diâmetros menores.

Portanto, a armadura de protensão deve ser constituída de fios entalhados ou de cordoalhas (cujo efeito sacarroalha aumenta a aderência), de pequeno diâmetro. São encontrados no mercado fios RN com  $\phi$  desde 4mm e RB desde 7,0mm. Cordoalhas RN com  $\phi$  desde 2x2,0mm ou  $\phi$  de 6,4mm (cordoalhas de 7 fios) e RB com  $\phi$  de 9,5mm, conforme catálogo da Companhia Siderúrgica

Belgo-Mineira<sup>31</sup>.

Mesmo com o uso desses materiais, a preocupação de se garantir a aderência deve estar sempre presente, principalmente no caso de ações repetidas, uma vez que ela pode não ser tão eficiente para os aços de protensão quanto o é para a armadura passiva. A norma soviética admite que a eficiência da aderência é duas a duas e meia vezes menor para as armaduras lá utilizadas.

#### 4.9. INTRODUÇÃO DA PROTENSÃO

No caso de pré-tração, as perturbações decorrentes da distribuição dos efeitos da protensão na seção transversal da região da ancoragem ocorrem de maneira diferente da pós-tração. As cunhas normalmente apoiam-se em uma estrutura de reação independente das fôrmas; mesmo que as próprias fôrmas se constituam no anteparo para absorver o esforço dos macacos (desde que possuam rigidez compatível com esta solicitação), o esforço não se transfere para a peça como na pós-tração. Devido a essas perturbações na zona de mobilização da aderência, recomenda-se a disposição de uma armadura de fretagem para absorver os esforços da transferência da protensão (tensões de aderência). Em função da espessura reduzida, este procedimento pode não ser tão eficiente, já que a colocação da usual armadura helicoidal é inviável em algumas situações, prejudicando a eficiência da fretagem ao longo da espessura. Nestes casos, pode haver fendilhamento na argamassa, com tensões de tração na direção da menor dimensão.

A aderência é mobilizada completamente num trecho correspondente ao comprimento de ancoragem da armadura respectiva, a partir das extremidades. Para níveis de protensão elevados, pode ser necessário isolar a armadura nos trechos extremos da peça (com fita crepe ou "espaguete" de plástico por exemplo), onde as tensões devidas ao peso próprio são mínimas, para evitar tensões excessivas de compressão em serviço.

#### 4.10. ESTABILIDADE

A condição de estabilidade deve ser sempre verificada, conforme estabelecido na NBR-6118 e NBR-7197. A norma de argamassa armada prevê ainda a possibilidade de ocorrência de instabilidade localizada nas zonas comprimidas da seção transversal, em razão das pequenas espessuras empregadas. A etapa da fabricação é potencialmente perigosa por ser um estágio onde atua só o peso próprio do elemento - reduzido neste caso de peças delgadas.

No caso de estruturas pré-moldadas, as peculiaridades inerentes ao sistema construtivo implicam em algumas considerações especiais relativas à estabilidade do conjunto e dos elementos isolados. A NBR-9062 indica alguns valores de referência na consideração da instabilidade local. Considera-se que ela ocorre antes da ruptura na flexão se, conforme figura 4.4,  $\frac{L \cdot h}{b_f^2} \geq 500$ , em caso de vigas biapoiadas; com esta verificação fica dispensado o cálculo de carga crítica de flambagem do elemento. Recomenda-se ainda que  $\frac{h_m}{a} \geq 2$ .

Devido à complexidade do cálculo exato, o procedimento utilizado neste trabalho, para verificação da estabilidade global e localizada dos elementos, segue algumas indicações das normas aqui mencionadas: considera satisfeito o equilíbrio lateral (flambagem) se forem respeitados os valores de referência da NBR-9062, e dispensa o cálculo exato da carga de flambagem; em caso contrário, deve-se efetuar o cálculo correto. Para garantir a estabilidade localizada se estabelece um limite máximo para as tensões de compressão, adotado igual a 70% da resistência à compressão simples, o mesmo valor adotado para evitar a microfissuração do concreto. Deve-se registrar que estudos mais detalhados deverão ser feitos, para estabelecer métodos de verificação mais eficientes.

$h$  = altura total;  
 $b_f$  = largura da mesa comprimida;  
 $L$  = vão teórico ou espaçamento entre travamentos;  
 $h_m$  = menor dimensão entre  $h_e$  e  $h_t$ ;  
 $a$  = flecha da peça girada de 90 graus.

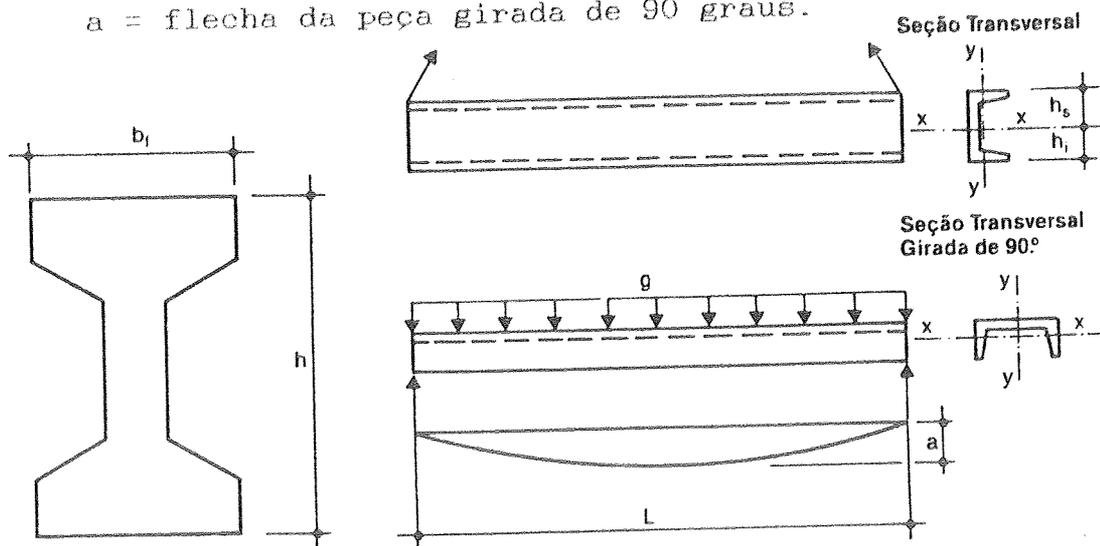


Fig.4.4 - Esquemas para verificação da estabilidade

#### 4.11. FISSURAÇÃO

Em relação à fissuração, a fusão de idéias e conceitos da protensão e das peças de argamassa armada indicam um comportamento próximo do ideal. É nítido que a força de protensão aumenta a resistência à fissuração (ou o momento fletor de fissuração no caso de flexão), retardando o aparecimento da primeira fissura. A partir daí, o controle deve advir de um arranjo conveniente da armadura, além da limitação de deformação no aço, isto é, da limitação da tensão de tração na armadura. Desta forma, o nível de protensão pode ser determinado em função deste limite de tensão de tração estabelecido. Com relação à argamassa armada (não protendida), relaxa-se a exigência de se usar taxas de armadura tão altas e tão intensamente sub-divididas para se obter uma configuração de fissuras satisfatória; há possibilidade de se utilizar telas com malhas mais abertas.

Quanto aos valores permitidos para a abertura das fissuras, as normas correlatas ao material híbrido estabelecem

valores distintos. A NBR-7197 permite para elementos de concreto protendido, no caso mais favorável, o limite máximo de 0,20mm, correspondente à situação de protensão parcial, com combinação frequente de ações (conforme definição da NBR-8681), aplicável a ambiente não agressivo. Para as peças de argamassa armada, são inaceitáveis valores acima de 0,15mm e 0,10mm, para ambientes protegidos e expostos respectivamente.

Neste trabalho são estabelecidos valores máximos em concordância com a norma de argamassa armada. A consideração dos limites mais tolerantes e das idéias preconizadas na NBR-7197 não parece razoável, conforme se tenta explicar a seguir. A NBR-7197 estabelece que o tipo de protensão é adotado em função do ambiente em que a peça está em serviço. A não ser em ambientes protegidos, não se tolera qualquer abertura de fissuras. Ora, as peças de argamassa armada têm características tais que a fissuração (controlada) é quase que inerente à sua conceituação. Trabalha-se com a idéia de que as fissuras existem, mas pretensamente não são nocivas. É verdade que há situações em que a ausência total das tensões de tração é imprescindível, ou mesmo em que elas se limitem ao valor correspondente ao início de fissuração. O maior potencial que se vislumbra para a argamassa armada protendida é para as peças com protensão parcial, onde se controla a tensão de tração a níveis compatíveis com uma configuração de fissuras que se imagina satisfatória. Os valores de 0,10mm e 0,15 mm são mais indicados, pois referem-se a peças de pequena espessura; lembra-se ainda que os cobrimentos são pequenos e portanto é necessário que a abertura das fissuras seja menor.

Na determinação do valor característico da abertura das fissuras surge talvez uma das maiores lacunas no domínio do conhecimento dos concretos estruturais, incluindo aí a argamassa armada, não obstante as inúmeras pesquisas experimentais. Esta incerteza decorre da multiplicidade de fatores intervenientes no fenômeno. A norma de argamassa armada estabelece uma expressão específica para o uso de telas de aço soldadas, com fios paralelos ao eixo da peça. Esta formulação estabelece como parâmetros básicos o espaçamento entre fissuras (que é função da

abertura da malha, da tela, do cobrimento, do diâmetro dos fios e da taxa geométrica da armadura) e a deformação média da armadura mais tracionada.

Também a literatura internacional apresenta várias expressões, resultados de ensaios específicos, frequentemente diferentes entre si. A própria Norma Soviética trabalha com uma expressão muito parecida com a brasileira, a menos dos coeficientes de ajustamento dependentes do tipo de tela, de ações e da argamassa.

Conforme argumentação de Hanai<sup>2</sup>, reforçada por experimentação de Balarin<sup>16</sup>, a previsão da fissuração envolve muitos parâmetros, susceptíveis a muitas variações. "Além da taxa de armadura, da tensão no aço e da qualidade da aderência dos fios, a abertura das fissuras é extremamente dependente do tipo de tela de aço, da forma das malhas, do espaçamento entre fios transversais. Por estas razões, entre outras, como o tipo e a variação dos esforços solicitantes, não é possível estabelecer expressões matemáticas únicas, representativas do nível de fissuração de peças de argamassa armada com diferentes taxas de armaduras, tipos de telas, de solicitações, etc".

Mesmo diante das dificuldades e da diversidade de alternativas, é necessário que se estabeleçam critérios mínimos para análise da fissuração. Neste trabalho, utiliza-se a expressão da norma de argamassa armada no caso de tela soldada. No caso de tela de aço expandida, os critérios de verificação baseiam-se nos resultados da pesquisa efetuada por Barboza(1990)<sup>5</sup>, pela qual se recomenda o controle da fissuração através da limitação das tensões na armadura externa.

Este procedimento já indica uma tendência de se controlar a abertura de fissuras através da limitação da deformação na armadura (uma vez fixada a tipologia e o arranjo da armadura difusa), sem preocupação excessiva com a determinação do valor característico da abertura das fissuras, que muitas vezes não representa a realidade, tendo em vista as dificuldades citadas.

#### 4.12. DEFORMAÇÃO

O comportamento que se espera para a deformação também deve melhorar, se comparado às peças de argamassa armada sem protensão, já que a argamassa íntegra ou pouco fissurada, consequência da introdução da protensão, confere uma maior rigidez à peça. Além disso, a protensão atua em sentido contrário ao das solicitações, minorando as flechas finais, podendo torná-las negativa até se for de interesse (vigas-calha, telhas, etc).

#### 4.13. RUPTURA

Para a etapa próxima à ruptura não se espera melhoria significativa no desempenho das peças de argamassa armada protendida, comparadas às similares sem protensão. Conforme apresentado no capítulo 3, a protensão não altera significativamente o comportamento na ruptura. A carga última depende basicamente da taxa de armadura e da qualidade dos materiais constituintes, aço e concreto.

A consideração da parcela relativa aos fios longitudinais das telas é mais importante para os fios que estão localizados nas mesas, onde a deformação correspondente é maior. Para os fios das almas, sempre que possível e relevante, os esforços devem ser quantificados, sempre proporcionais às respectivas deformações, variáveis com a sua posição em relação à linha neutra. Os fios comprimidos frequentemente são desprezados no cálculo, especialmente quando o tipo de tela usada é ondulada e a possibilidade de flambagem destes fios é maior.

## CAPÍTULO 5

### EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar alguns estudos em argamassa armada protendida para atender situações de projeto na prática. Dentre as várias potencialidades do material apontadas no capítulo anterior, selecionam-se para esta análise alguns componentes de um sistema estrutural de um galpão leve pré-moldado.

Para que as peças estudadas estejam realmente inseridas no contexto de um projeto concreto, seja na sua forma (compatível com a sua integração com os outros componentes do sistema), ou na estimativa dos esforços solicitantes, toma-se como referência o trabalho desenvolvido na disciplina de pós-graduação "Estruturas Pré-Moldadas de Concreto", intitulado "Estudo de um Galpão Leve" [1989]<sup>32</sup>. Neste trabalho, dentre as soluções analisadas, adotou-se para projeto e detalhamento a que contempla a utilização de telhas de fibro-cimento (calhetão 90) apoiadas em vigas-calha e vigas-cumeeira, com fechamento lateral, em painéis pré-moldados ou alvenaria.

É importante registrar que não há a pretensão de que as seções propostas a seguir, assim como o próprio sistema estrutural, representem etapas de um projeto otimizado, que seria resultado de um estudo bem mais aprofundado. Elas cumprem apenas a função de ilustrar algumas soluções em argamassa armada protendida para os componentes do sistema, e principalmente, apresentar alguns números do dimensionamento que envolve a utilização destas peças no projeto.

Cabe finalmente ressaltar que, na proposta das seções transversais, além da preocupação óbvia da adequação de sua forma com sua função, houve a pretensão maior de apropriá-las ao material (argamassa armada) e ao processo de produção, especialmente com as etapas de lançamento e adensamento, compatíveis com as fôrmas que seriam utilizadas na fabricação.

## 5.1. SISTEMA ESTRUTURAL

A estrutura do galpão é reticulada, com telhas apoiadas em vigas calha e cumeeira, formando uma cobertura em duas águas. Compõem o sistema também vigas de acabamento frontais, que assumem dimensões diferentes em casos de fechamento com painéis (quando servem de apoio a eles) ou com alvenaria (caso em que tem apenas função estética); painéis de fechamento, pilares e elementos de fundação.

As figuras 5.1 e 5.2 ilustram o galpão com maiores detalhes.

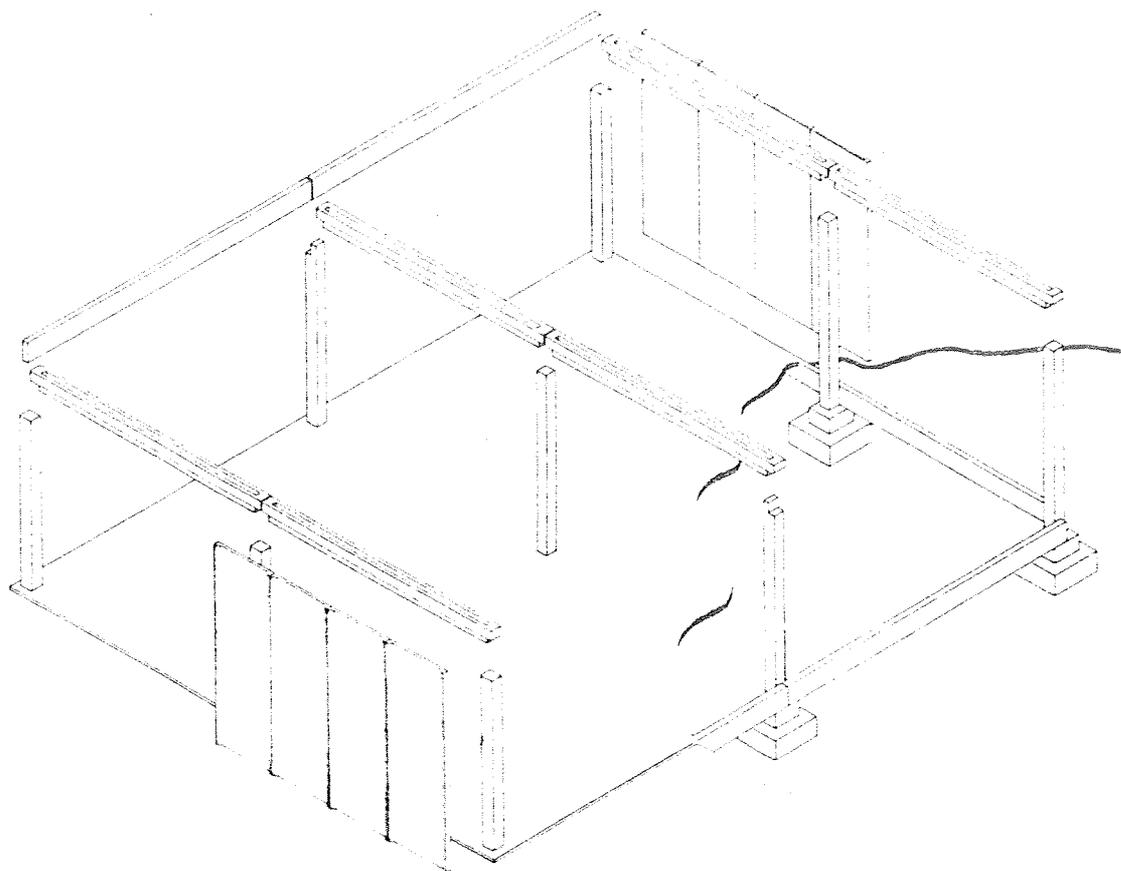


Fig. 5.1 - Perspectiva de parte do galpão

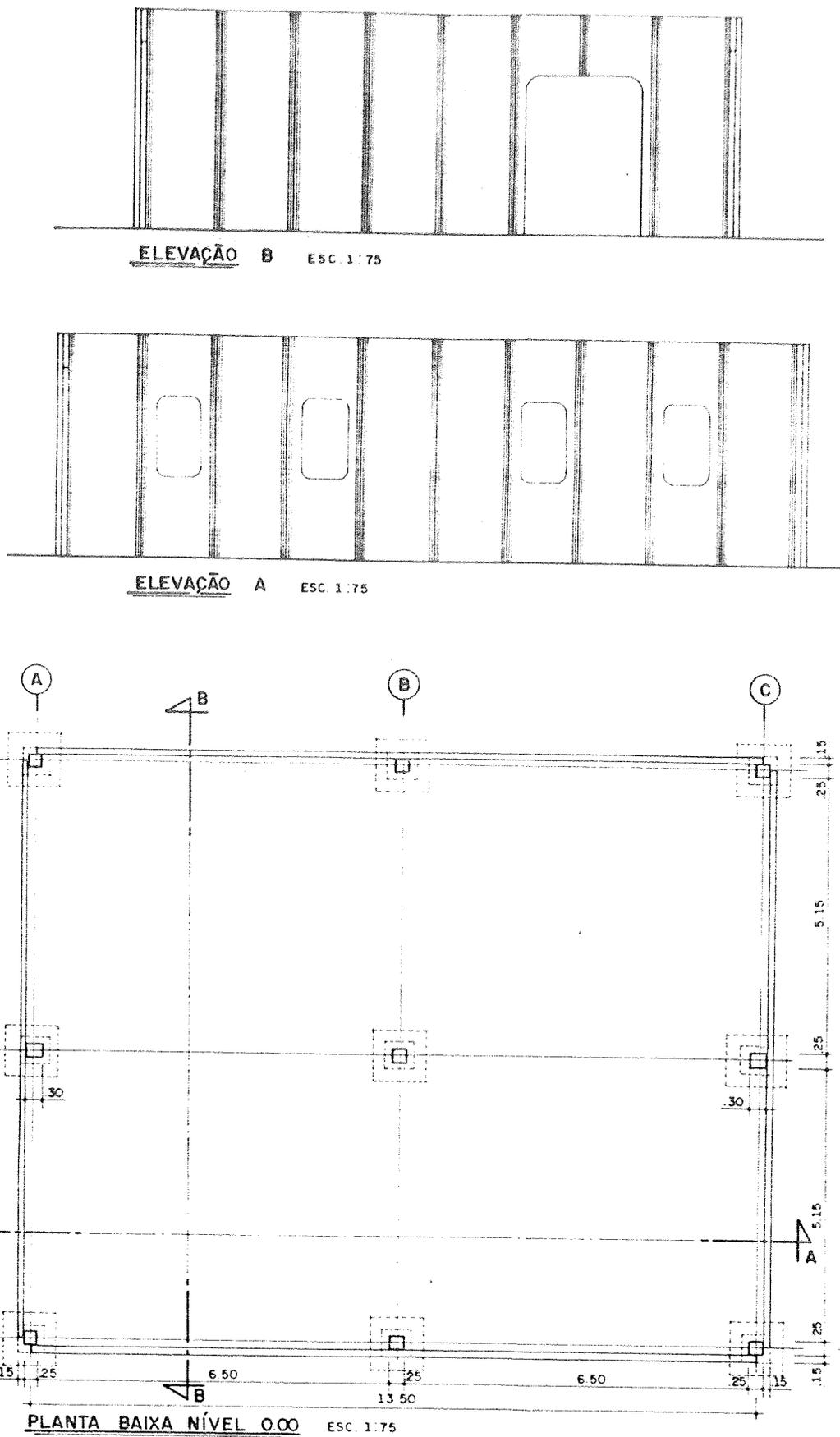


Fig. 5.2 - Planta baixa e cortes de parte do galpão

## 5.2. SITUAÇÕES DE ANÁLISE

Mantendo o sistema estrutural apresentado, o estudo da utilização de componentes de argamassa armada protendida, similares aos anteriormente adotados de concreto armado, considera duas situações distintas, que são identificadas neste texto como caso 1 e caso 2, descritos a seguir.

CASO 1: mesmas dimensões do galpão original, com cobertura de telha de fibra-cimento.

CASO 2: novas dimensões para o galpão, com módulos de 10m x 15m, com cobertura de vigas-telha protendidas.

Para cada caso são estudados os seguintes componentes:

- viga-calha;
- viga-cumeeira;
- viga-baldrame;
- painel de fechamento lateral;
- viga-telha (só para o caso 2).

Especificamente para a viga-calha, no caso 1 propõem-se diversas seções transversais, com o intuito de ilustrar as diferenças de comportamento para formas distintas, na esperança de escolher as mais adequadas ao tipo de solicitação e ao material.

Com o objetivo de acrescentar mais dados para projetos futuros, quase todas as peças estudadas (no caso 1 e no caso 2) são dimensionadas com tipos de protensão limitada e parcial. A escolha final seria resultado de outros estudos, que devem considerar parâmetros aqui não analisados com o rigor que a situação requer (arranjo de armaduras, estabilidade, estado de fissuração aceitável, custos,...).

A tabela 5.1 ilustra as situações de análise e a identificação das peças em cada uma.

PEÇA \ CASO	CASO 1		CASO 2	
	P. PARCIAL	LIMITADA	P. PARCIAL	LIMITADA
CALHA	calh-A1P	calh-A1L	calh-A2P	calh-A2L
	calh-B1P	calh-B1L		
	calh-C1P	calh-C1L		
CUMEEIRA	cum-1P	cum-1L	cum-2P	cum-2L
TELHA	—	—	telh-2P	telh-2L
PAINEL	pain-P	—	—	—
BALDRAME	bald1-1P	bald1-1L	bald1-2P	—
	bald2-1P	—	bald2-2P	

Tab.5.1 - Situações e peças para análise

Para cada peça em cada caso, as seções transversais adotadas no dimensionamento com protensão limitada e protensão parcial são iguais, alterando-se apenas as armaduras.

As vigas baldrames são de dois tipos para cada caso, em função da diferença da distância entre pilares nas direções transversal e longitudinal do galpão.

### 5.3. DIMENSIONAMENTO

Todas as peças são dimensionadas supondo-as simplesmente apoiadas, submetidas à flexão simples, analisando-as somente na região de máxima sollicitação (meio do vão). Assim, por simplicidade, no cálculo da viga-calha e do baldrame, não se considera a opção de fechamento lateral com painel, que introduziria esforços transversais às vigas, caracterizando casos de flexão oblíqua. Para estes cálculos adotam-se esforços solicitantes decorrentes do fechamento com alvenaria.

Os cálculos envolvem todas as principais verificações dos estados limites de utilização e estados limites últimos apontadas nos capítulos anteriores, abordando portanto a protensão, a fissuração, as flechas e a segurança à ruptura. Complementarmente são verificadas as condições de estabilidade

lateral conforme expressões da NBR-9062, citadas no capítulo 4, que estabelecem alguns valores de referência para a previsão da ocorrência do fenômeno.

Os esforços devidos ao vento e sobrecarga são considerados adotando-se como carga total equivalente o valor de  $0,50 \text{ kN/m}^2$ , tanto para sucção como para sobrepressão.

Nas situações que envolvem protensão parcial, adota-se uma hipótese que infringe as prescrições da NBR-7197, que estabelece que uma das condições para haver protensão parcial é a observância do estado limite de descompressão para as combinações quase-permanentes de ações. Como esta condição normalmente é preponderante na determinação da força de protensão necessária, a análise da fissuração na combinação frequente das ações é inócua. Ou seja, nestes casos, a protensão parcial confunde-se com a protensão limitada. A hipótese aqui adotada consiste em estabelecer uma tensão máxima de tração, para a combinação quase-permanente de ações, igual a  $f_{tk}$ , além de respeitar o estado de fissuração inaceitável para a combinação frequente. As fissuras são calculadas segundo a expressão adotada na NBR-11173 para o caso de tela soldada, adotando para a área de interesse para a fissuração o procedimento indicado no anexo da NBR-7197.

Para simplificar um pouco os cálculos, a resistência característica do concreto à compressão foi mantida constante em todos os exemplos. Também não se trabalhou com muitas tipologias para as telas (diâmetro dos fios e abertura das malhas), assim como para o diâmetro da armadura de barra suplementar e da armadura de protensão utilizadas. É importante frisar que para situações em que a força de protensão necessária é pequena, as cordoalhas utilizadas só existem na forma de aço de relaxação normal. Quando os valores necessários permitiram, adotaram-se, prioritariamente, os aços de relaxação baixa. Esta pequena variação nos parâmetros envolvidos nos cálculos é uma das razões de um dimensionamento menos apurado.

Alguns dos parâmetros mantidos constantes em todos os exemplos são:

- concreto:  $f_{ck} = 40\text{MPa}$ ;
- armadura de protensão:
  - cordoalhas de 2 ou 3 fios - 180RN - caso 1;
  - cordoalhas de 7 fios - 175RB ou 190RB - caso 2;
- armadura passiva:
  - $f_{syk} = 600\text{MPa}$ ;
  - $E_s = 210.000\text{MPa}$ ;
  - malha: 50mm x 100mm (quando não houver referência);
  - $\phi_{fio} = 2,77\text{mm}$  (quando não houver referência);
- para cálculo das perdas de protensão:
  - comprimento da pista = 50m;
  - penetração das cunhas = 6,0mm;
  - umidade do ar = 65%;
  - cimento ARI-32;
  - slump 5-9cm.

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos para cada peça estudada. Em cada página, constam o desenho da seção transversal (medidas em cm), com as armaduras passiva e ativa (sendo os fios complementares representados por círculos cheios e as cordoalhas por círculos vazios), e uma tabela com os valores:

#### DADOS:

- $S$  = área da seção transversal de argamassa ( $\text{cm}^2$ );
- $I$  = momento de inércia da seção de argamassa ( $\text{cm}^4$ );
- $l$  = comprimento da peça (m);
- $g$  = carga distribuída permanente total (kN/m);
- $q$  = carga distribuída acidental total (kN/m);
- $\phi_s$  = diâmetro da barra de aço complementar (mm).

#### PROTENSÃO:

- $P_i$  = força de protensão instalada (kN);
- $P_o$  = força de protensão na argamassa em  $t_o$  (kN);
- $P_\omega$  = força de protensão na argamassa em  $t_\omega$  (kN);
- $A_{pe}$  = área da armadura ativa da borda inferior ( $\text{cm}^2$ );
- $A_{pn}$  = área da armadura ativa necessária ( $\text{cm}^2$ );
- cord = tipo da cordoalha utilizada.

TENSÕES - borda inferior (1) e superior (2):

- $\sigma_{1,gt}$  e  $\sigma_{2,gt}$  = peso próprio (MPa);
- $\sigma_{1,g}$  e  $\sigma_{2,g}$  = carga permanente total (MPa);
- $\sigma_{1,q}$  e  $\sigma_{2,q}$  = carga acidental total (MPa);
- $\sigma_{1,po}$  e  $\sigma_{2,po}$  = força de protensão  $P_o$  (MPa);
- $\sigma_{1,f}$  e  $\sigma_{2,f}$  = na etapa da fabricação (MPa).

ESTADI LIMITE ÚLTIMO:

- $\epsilon_c$  = deformação na argamassa comprimida (%);
- $\epsilon_s$  = deformação na armadura tracionada (%);
- $M_u$  = momento fletor resistente (kN.m);
- $M_{max}$  = momento fletor máximo solicitante (kN.m);
- $A_{sve}$  = armadura transversal existente (cm<sup>2</sup>/m);
- $A_{svn}$  = armadura transversal necessária (cm<sup>2</sup>/m).

ESTADOS DE UTILIZAÇÃO:

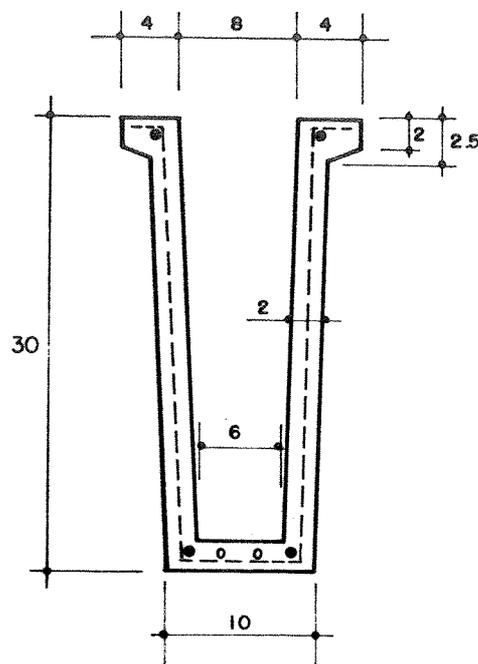
- $M_r$  = momento fletor de fissuração (kN.m);
- $M_{rp}$  = momento fletor total de fissuração (kN.m);
- $w$  = abertura característica de fissura (mm);
- $\sigma_s$  = tensão correspondente na armadura (MPa);
- $f_{gp}$  = flecha: carga permanente e força  $P_o$  (mm);
- $f_q$  = flecha: 70% da carga acidental (mm).

Observação: os valores de  $w$  e  $\sigma_s$  no caso de protensão limitada (em que se respeita o estado limite de formação de fissuras para a combinação frequente de ações) referem-se a abertura de fissura característica e a correspondente tensão na armadura complementar, calculada em estágio II, devida ao momento fletor de serviço  $M_s = M_g + 0.7M_q$  (como um valor de referência). No caso de protensão parcial, os primeiros valores correspondem ao mesmo momento de serviço. Os valores da segunda coluna referem-se ao momento fletor resultante da combinação frequente de ações.

### 5.3.1. VIGA CALHA

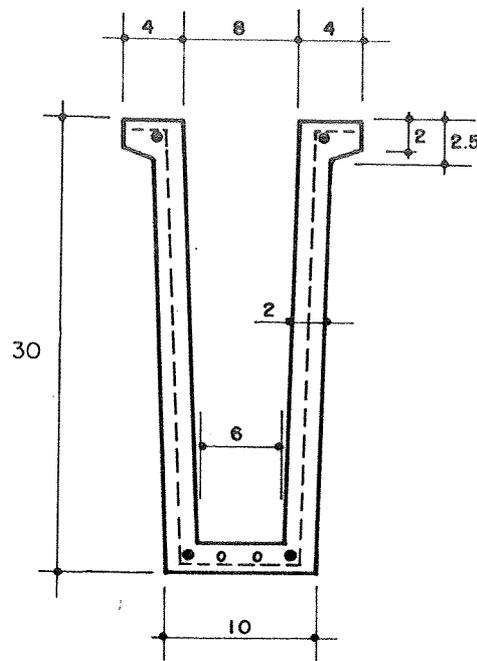
a) calh-A1P

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 145.5 \text{ cm}^2$		
$I = 19970 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.51 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.57 \text{ MPa}$
$G = 1.9 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 7.92 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -8.29 \text{ MPa}$
$Q = 9.4 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 14.15 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -14.7 \text{ MPa}$
$l = 5.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -8.52 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 9.41 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 6.9 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -7.91 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 2.16 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 40.99 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -2.9 \text{ ‰}$	$M_r = 9.8 \text{ kNm}$
$P_o = 98.89 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 10.0 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 9.6 \text{ kNm}$
$P_{\omega} = 28.98 \text{ kN}$	$M_u = 27.2 \text{ kNm}$	$W = 0.14/0.09 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.282 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 28.1 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 979/147 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.21 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 0.6 \text{ mm}$
cord : $2\phi 9\text{mm}$	$A_{svn} = 0.69 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 6.8 \text{ mm}$



b) calh-A1L

DADOS	TENSOES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 145.5 \text{ cm}^2$	$\sigma_{1G1} = 1.51 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.57 \text{ MPa}$
$I = 19970 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G} = 7.92 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -8.29 \text{ MPa}$
$G = 1.9 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 14.15 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -14.7 \text{ MPa}$
$Q = 9.4 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Po} = -12.58 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 5.04 \text{ MPa}$
$l = 5.5 \text{ m}$	$\sigma_{1f} = -11.97 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 9.78 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 6.9 \text{ mm}$		
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilizaçãõ
$P_i = 61.69 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.5 \%$	$M_r = 9.8 \text{ kNm}$
$P_o = 57.29 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 9.0 \%$	$M_{rp} = 11.8 \text{ kNm}$
$P_\omega = 40.07 \text{ kN}$	$M_u = 31.9 \text{ kNm}$	$w = 0.09 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.424 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 28.1 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 264 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.498 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = -1.7 \text{ mm}$
cord : $3\phi 8\text{mm}$	$A_{svn} = 0.64 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 6.8 \text{ mm}$

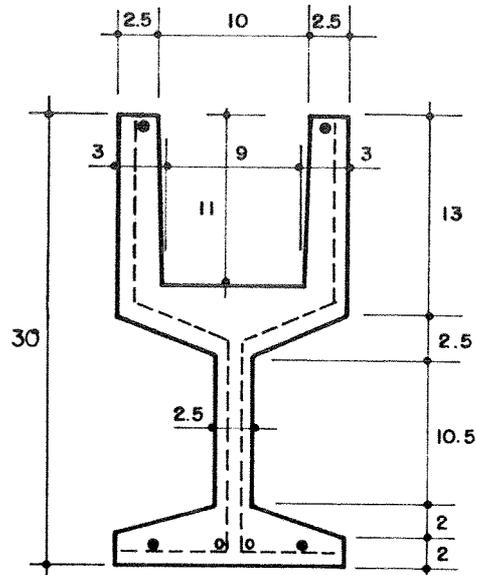


Obs: Para a seção calha-A1:

$$\frac{L \cdot h}{b_f^2} = 258 < 500 \quad ; \quad \frac{L}{b_f} = 69 > 50$$

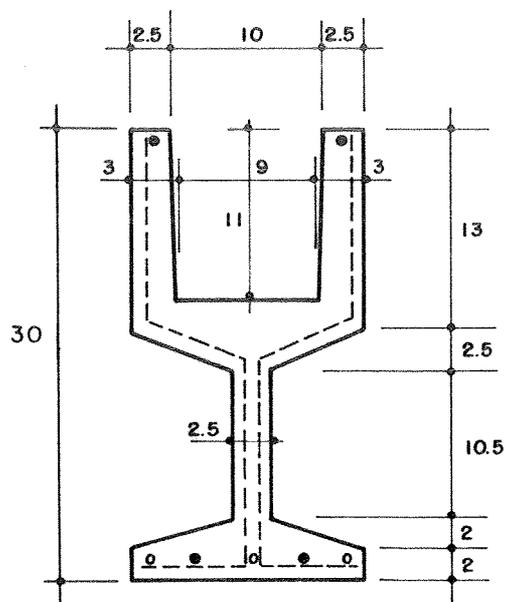
c) calh-B1P

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 186.1 \text{ cm}^2$		
$I = 15755 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.61 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.74 \text{ MPa}$
$G = 2.0 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 6.94 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -7.50 \text{ MPa}$
$Q = 9.4 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 11.77 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -12.71 \text{ MPa}$
$l = 5.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -7.14 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 9.19 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 6.9 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -5.85 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 1.80 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 42.79 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.4 \text{ ‰}$	$M_r = 4.2 \text{ kNm}$
$P_o = 40.48 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 10.0 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 10.1 \text{ kNm}$
$P_{\infty} = 90.42 \text{ kN}$	$M_u = 27.1 \text{ kNm}$	$W = 0.15/0.09 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.294 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 28.6 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 962 / 159 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.21 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 0.7 \text{ mm}$
cord : $3\phi 2.5\text{mm}$	$A_{svn} = 1.04 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 5.7 \text{ mm}$



d) calh-B1L

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 186.1 \text{ cm}^2$		
$I = 15755 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.61 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.74 \text{ MPa}$
$G = 2.0 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 6.94 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -7.50 \text{ MPa}$
$Q = 9.4 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 11.77 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -12.71 \text{ MPa}$
$l = 5.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -10.61 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 4.74 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 6.9 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -99.2 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 9.35 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 64.10 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -3.5 \text{ ‰}$	$M_r = 4.2 \text{ kNm}$
$P_o = 60.16 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 8.0 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 12.5 \text{ kNm}$
$P_{\omega} = 42.81 \text{ kN}$	$M_u = 31.6 \text{ kNm}$	$W = 0.08 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.441 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 28.6 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 247 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.46 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = -1.3 \text{ mm}$
cord : $3\phi 2.5\text{mm}$	$A_{svh} = 1.01 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 5.7 \text{ mm}$

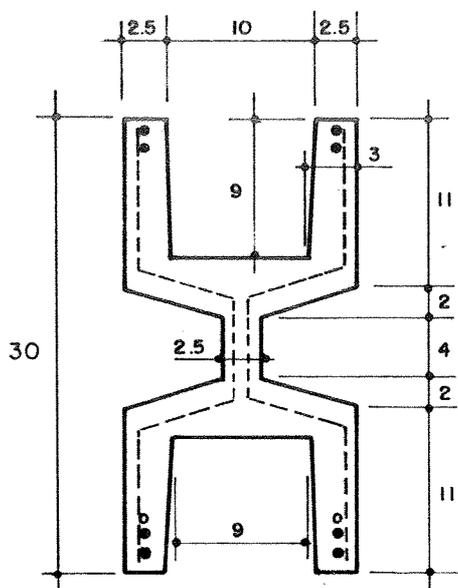


Obs: Para a seção calha-B1:

$$\frac{L \cdot h}{b_f^2} = 545 > 500 \quad ; \quad \frac{L}{b_f} = 100 > 50$$

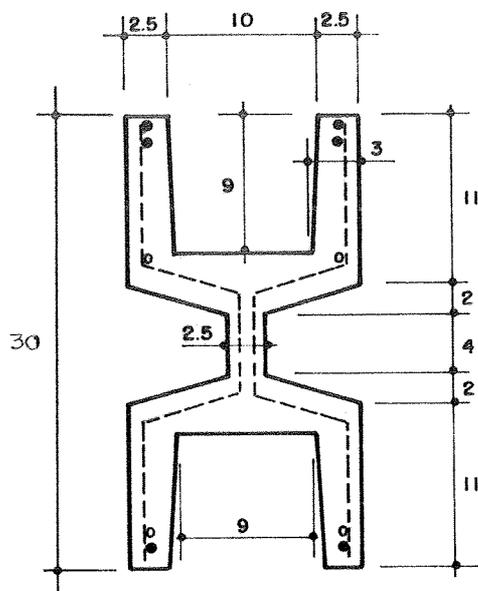
e) calh-C1P

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 204.0 \text{ cm}^2$		
$I = 19209 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 2.19 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -2.19 \text{ MPa}$
$G = 2.05 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 8.80 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -8.80 \text{ MPa}$
$Q = 9.4 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 14.60 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -14.6 \text{ MPa}$
$l = 5.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -8.08 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 4.27 \text{ MPa}$
$\Phi_B = 6.9 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -6.32 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 2.52 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 40.99 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.1 \text{ ‰}$	$M_r = 4.2 \text{ kNm}$
$P_o = 98.89 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 10.0 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 9.1 \text{ kNm}$
$P_{\omega} = 29.89 \text{ kN}$	$M_u = 91.2 \text{ kNm}$	$W = 0.12/0.09 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.282 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 28.9 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 323 / 158 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.26 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 1.6 \text{ mm}$
cord : $2\phi 9\text{mm}$	$A_{svn} = 1.07 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 6.8 \text{ mm}$



f) calh-C1L

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 204 \text{ cm}^2$		
$I = 13209 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 2.19 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -2.19 \text{ MPa}$
$G = 2.05 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 8.80 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -8.80 \text{ MPa}$
$Q = 9.4 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 14.60 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -14.6 \text{ MPa}$
$l = 5.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -14.89 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 4.86 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 6.3 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -19.14 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 2.52 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 109.30 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.5 \text{ ‰}$	$M_r = 4.2 \text{ kNm}$
$P_o = 102.33 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 7.1 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 19.2 \text{ kNm}$
$P_{\omega} = 69.98 \text{ kN}$	$M_u = 29.9 \text{ kNm}$	$W = 0.13 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.564 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 28.9 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 316 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.54 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = -2.0 \text{ mm}$
cord : $3\phi 3.5\text{mm}$	$A_{svh} = 1.01 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 6.8 \text{ mm}$



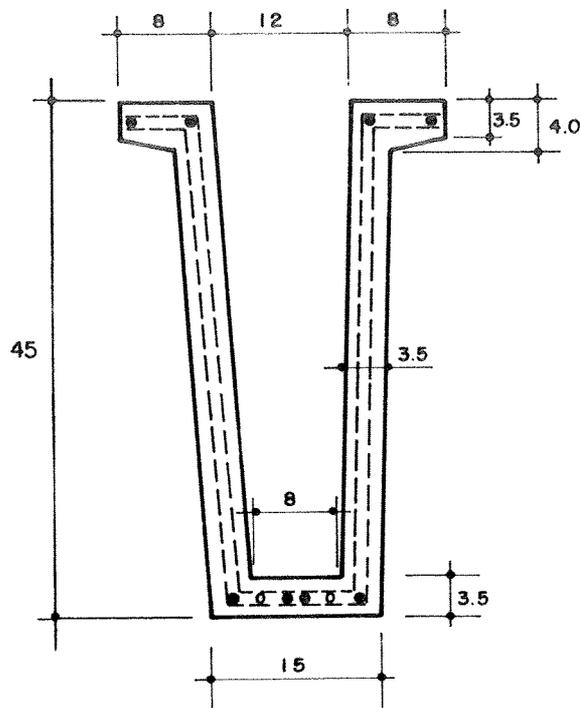
$$A_{p,sup} = 2 \text{ cord } 3 \phi 2,0\text{mm}$$

$$\frac{L \cdot h}{b_f^2} = 545 > 500 \quad ; \quad \frac{L}{b_f} = 100 > 50$$

g) calh-A2P

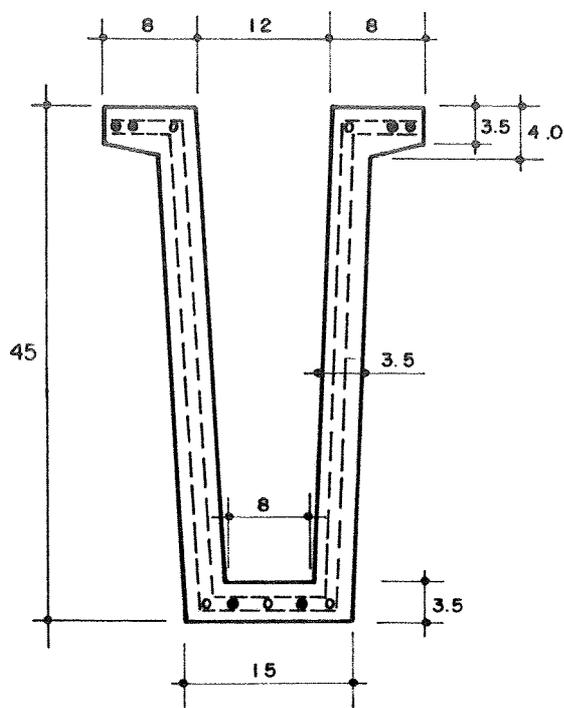
DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 991.7 \text{ cm}^2$		
$I = 81740 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.77 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.99 \text{ MPa}$
$G = 7.7 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 12.95 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -19.87 \text{ MPa}$
$Q = 7.0 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 11.22 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -12.6 \text{ MPa}$
$l = 7.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -19.90 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 5.07 \text{ MPa}$
$\bar{\Phi}_s = 8.0 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -11.80 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 9.57 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 168.67 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.5 \%$	$M_r = 15.1 \text{ kNm}$
$P_o = 156.95 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 9.7 \%$	$M_{rp} = 58.7 \text{ kNm}$
$P_{\infty} = 149.28 \text{ kN}$	$M_u = 141.8 \text{ kNm}$	$W = 0.13/0.04 \text{ mm}$
$A_{pe} = 1.096 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 149.5 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 997/147 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 1.00 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 2.41 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 9.0 \text{ mm}$
cord : 9/8"	$A_{svn} = 2.26 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 6.9 \text{ mm}$

Aço 190RB



h) calh-A2L

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 391.7 \text{ cm}^2$		
$I = 81740 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.77 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.99 \text{ MPa}$
$G = 7.7 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 12.95 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -19.87 \text{ MPa}$
$Q = 7.0 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 11.22 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -12.6 \text{ MPa}$
$l = 7.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -18.59 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 4.18 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 8.0 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -16.99 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 2.69 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 319.43 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -3.5 \text{ ‰}$	$M_r = 15.1 \text{ kNm}$
$P_o = 292.76 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 6.7 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 69.8 \text{ kNm}$
$P_\omega = 236.53 \text{ kN}$	$M_u = 146.6 \text{ kNm}$	$W = 0.11 \text{ mm}$
$A_{pe} = 1.644 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 149.5 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 287 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 1.70 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 2.41 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 0.9 \text{ mm}$
cord : 3/8"	$A_{svn} = 2.17 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 6.9 \text{ mm}$



Aço CP 190RB

$A_{p,sup} = 2 \text{ cord } 3 \phi 2,5 \text{ mm}$

(180 RN)

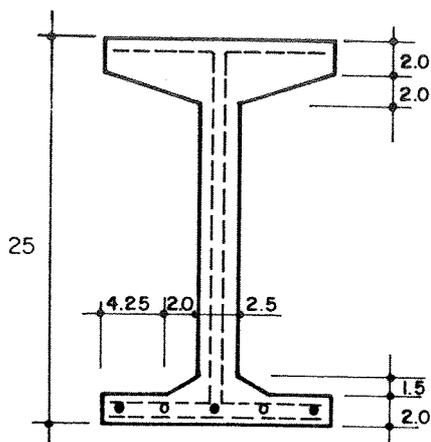
$$\frac{L \cdot h}{b_f^2} = 132 < 500 \quad ; \quad \frac{L}{b_f} = 47 < 50$$

### 5.3.2. VIGA CUMEEIRA

a) cum-1P

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 128.0 \text{ cm}^2$		
$I = 11929 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.41 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.26 \text{ MPa}$
$G = 1.86 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 8.21 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -7.91 \text{ MPa}$
$Q = 9.4 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 15.01 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -19.96 \text{ MPa}$
$l = 5.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -8.56 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 1.89 \text{ MPa}$
$\phi_s = 6.9 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -7.49 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 0.88 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 40.99 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.0 \text{ ‰}$	$M_r = 2.9 \text{ kNm}$
$P_o = 98.89 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 10.0 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 8.4 \text{ kNm}$
$P_{\infty} = 29.15 \text{ kN}$	$M_u = 28.9 \text{ kNm}$	$W = 0.09/0.02 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.282 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 27.8 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 284 / 111 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.26 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 2.41 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 1.2 \text{ mm}$
cord : $2\phi 9\text{mm}$	$A_{svn} = 1.92 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 8.0 \text{ mm}$

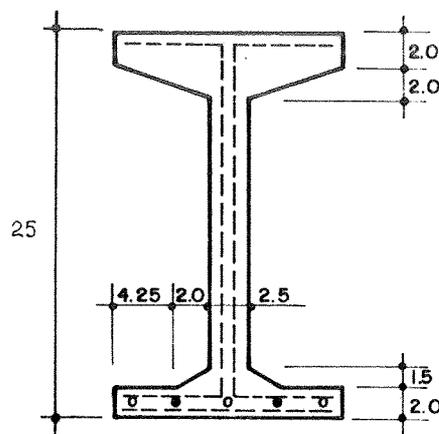
# tela = 50mmx50mm



b) cum-1L

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 128.0 \text{ cm}^2$		
$I = 11929 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.41 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.26 \text{ MPa}$
$G = 1.86 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 8.21 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -7.31 \text{ MPa}$
$Q = 3.4 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 15.01 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -13.36 \text{ MPa}$
$l = 5.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -13.11 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 2.89 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 6.3 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -11.98 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 1.89 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_l = 64.10 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.5 \text{ ‰}$	$M_r = 2.9 \text{ kNm}$
$P_o = 59.44 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 9.6 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 10.8 \text{ kNm}$
$P_{\omega} = 41.53 \text{ kN}$	$M_u = 29.5 \text{ kNm}$	$W = 0.07 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.441 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 27.8 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 242 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.45 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 2.41 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = -1.5 \text{ mm}$
cord : $3\phi 3.5\text{mm}$	$A_{svn} = 1.29 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 8.0 \text{ mm}$

# tela = 50mmx50mm



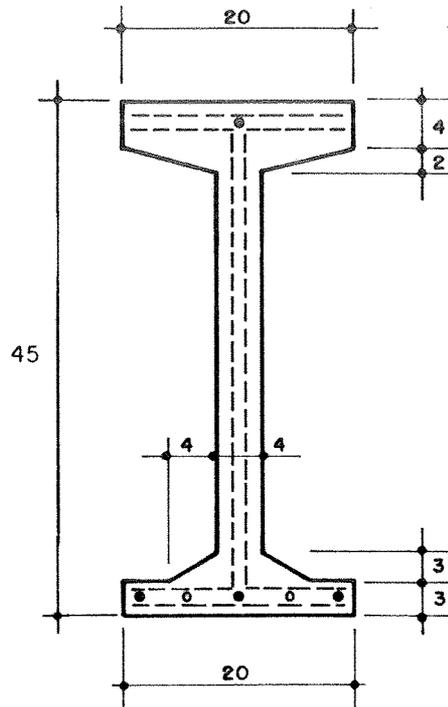
$$\frac{L \cdot h}{b_f^2} = 61 < 500 \quad ; \quad \frac{L}{b_f} = 37 < 50$$

c) cum-2P

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 320.0 \text{ cm}^2$		
$I = 87944 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.52 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.98 \text{ MPa}$
$G = 7.4 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 14.09 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -12.72 \text{ MPa}$
$Q = 7.0 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 19.99 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -12.09 \text{ MPa}$
$l = 7.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -14.29 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 9.56 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 10.0 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -19.01 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 24.6 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 168.67 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.5 \%$	$M_r = 19.1 \text{ kNm}$
$P_o = 156.24 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 9.7 \%$	$M_{rp} = 59.9 \text{ kNm}$
$P_{\omega} = 199.04 \text{ kN}$	$M_u = 199.9 \text{ kNm}$	$W = 0.08/0.01 \text{ mm}$
$A_{pe} = 1.096 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 141.7 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 254 / 97 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.94 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 2.41 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 2.9 \text{ mm}$
cord : 3/8"	$A_{svn} = 2.89 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 7.4 \text{ mm}$

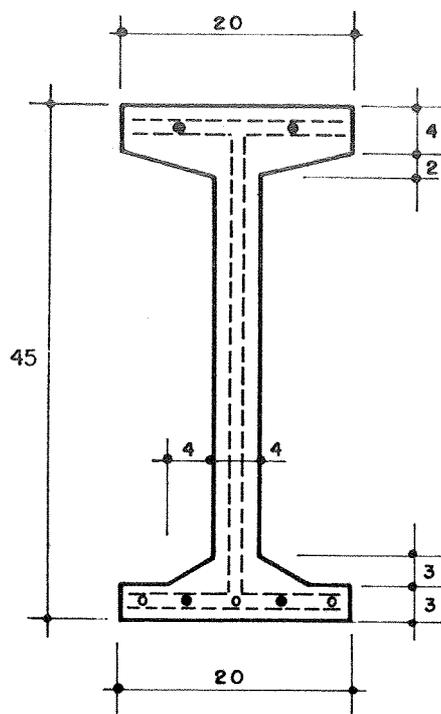
# tela = 50mmx50mm

Aço CP 190RB



d) cum-2L

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 920.0 \text{ cm}^2$		
$I = 87944 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.52 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.98 \text{ MPa}$
$G = 7.4 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 14.09 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -12.72 \text{ MPa}$
$Q = 7.0 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 19.99 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -12.09 \text{ MPa}$
$l = 7.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -20.67 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 5.17 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 8.0 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -19.45 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 4.07 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 259.01 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.5 \%$	$M_r = 19.1 \text{ kNm}$
$P_o = 226.95 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 9.5 \%$	$M_{rp} = 74.6 \text{ kNm}$
$P_{\infty} = 182.79 \text{ kN}$	$M_u = 144.7 \text{ kNm}$	$W = 0.05 \text{ mm}$
$A_{pe} = 1.644 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 141.7 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 197 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 1.40 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 2.41 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 1.7 \text{ mm}$
cord : 3/8"	$A_{svn} = 2.82 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 7.4 \text{ mm}$



Aço CP 190RB

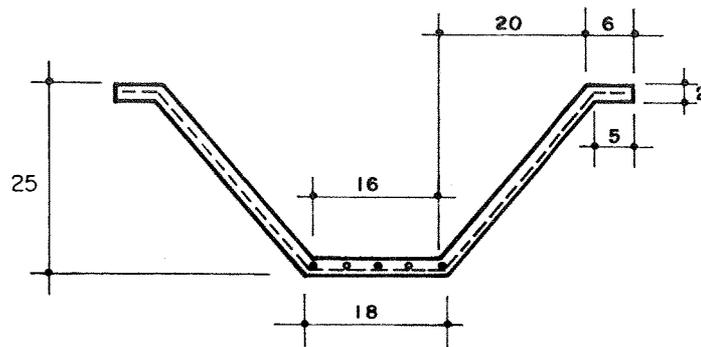
$$\frac{L \cdot h}{b_f^2} = 84 < 500 \quad ; \quad \frac{L}{b_f} = 37 < 50$$

### 5.3.3. VIGA TELHA

A) telh-P

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 182.0 \text{ cm}^2$		
$I = 12947 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 5.16 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -5.82 \text{ MPa}$
$G = 0.45 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 5.16 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -5.82 \text{ MPa}$
$Q = 0.50 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 5.71 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -6.45 \text{ MPa}$
$l = 10.0 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -2.65 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 0.97 \text{ MPa}$
$\bar{\Phi}_s = 6.9 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = 1.47 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = -3.69 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 18.91 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -1.9 \text{ ‰}$	$M_r = 4.9 \text{ kNm}$
$P_o = 17.95 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 10.0 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 6.6 \text{ kNm}$
$P_\omega = 19.49 \text{ kN}$	$M_u = 18.2 \text{ kNm}$	$W = 0.09/0.04 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.126 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 16.8 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 298 / 180 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.10 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 0.63 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 8.8 \text{ mm}$
cord : $2\phi 2\text{mm}$	$A_{svn} = 0.0 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 11.9 \text{ mm}$

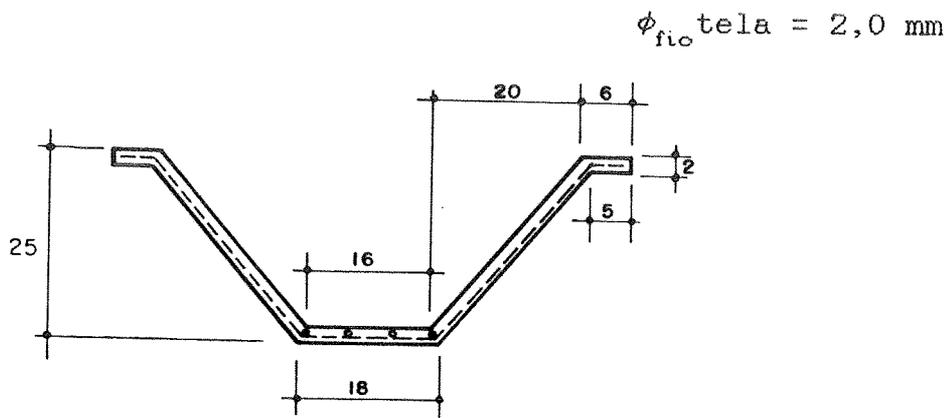
$$\phi_{fio} \text{ tela} = 2,0 \text{ mm}$$



b) telh-L

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 182.0 \text{ cm}^2$		
$I = 12947 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 5.16 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -5.82 \text{ MPa}$
$G = 0.45 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 5.16 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -5.82 \text{ MPa}$
$Q = 0.50 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 5.71 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -6.45 \text{ MPa}$
$l = 10.0 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -8.92 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 9.25 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 6.9 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -4.79 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = -1.41 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 61.69 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.2 \%$	$M_r = 4.9 \text{ kNm}$
$P_o = 58.92 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 10.0 \%$	$M_{rp} = 11.2 \text{ kNm}$
$P_{\omega} = 40.97 \text{ kN}$	$M_u = 29.5 \text{ kNm}$	$W = 0.0 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.424 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 16.8 \text{ kNm}$	$\sigma_s = \text{----} * \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.962 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 0.63 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 4.8 \text{ mm}$
cord : $2\phi 9\text{mm}$	$A_{svn} = 0.0 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 11.9 \text{ mm}$

\* O momento fletor de serviço é inferior ao momento fletor de fissuração.



$$\frac{L \cdot h}{b_f^2} = 174 < 500 \quad ; \quad \frac{L}{b_f} = 83 > 50$$

### 5.3.4. PAINEL

a) pain-P

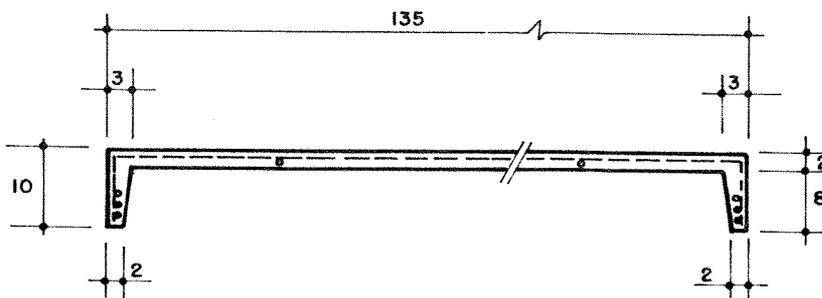
DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 978.7 \text{ cm}^2$		
$I = 1246 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 9.56 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -2.07 \text{ MPa}$
$G = 0.95 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = \text{----} \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = \text{----} \text{ MPa}$
$Q = 0.94 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 9.49 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -0.74 \text{ MPa}$
$l = 9.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -8.01 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 0.0 \text{ MPa}$
$\bar{\phi}_s = 6.9 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = 1.55 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = -2.07 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 56.98 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -0.7 \text{ ‰}$	$M_r = 0.8 \text{ kNm}$
$P_o = 59.98 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 10.0 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 1.4 \text{ kNm}$
$P_{\infty} = 39.55 \text{ kN}$	$M_u = 8.9 \text{ kNm}$	$W = 0.0 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.196 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 2.8 \text{ kNm}$	$\sigma_s = \text{----} * \text{ MPa}$
$A_{pn} = \text{---} * \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = -9.9 \text{ mm}$
cord : $2\phi 2.5\text{mm}$	$A_{svn} = 0.0 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 1.2 \text{ mm}$

\* O momento fletor correspondente às combinações de ações é inferior ao momento fletor de fissuração.

\* Em função da grande variação para pequenas mudanças nas excentricidades, não foi calculada a armadura necessária.

#<sub>tela</sub> = 100mmx100mm

A<sub>p,sup</sub> = 2 cord 2  $\phi$  2,5 mm



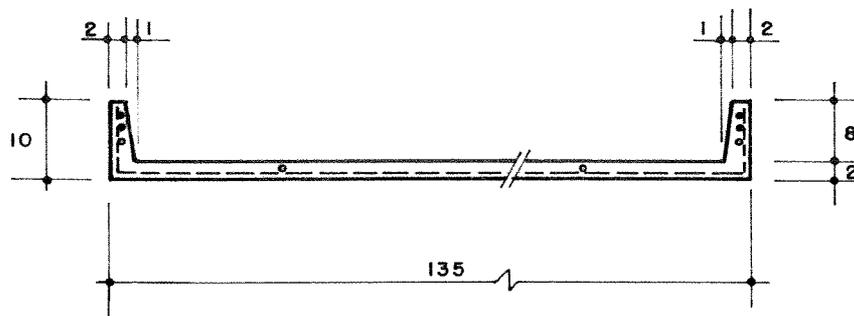
b) pain-Pi ( Análise do vento de sucção)

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 978.7 \text{ cm}^2$		
$I = 1246 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 2.07 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -9.56 \text{ MPa}$
$G = 0.95 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = \text{----} \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = \text{----} \text{ MPa}$
$Q = 0.94 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 0.74 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -3.49 \text{ MPa}$
$l = 3.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = 0.0 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = -8.01 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 6.9 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = 2.07 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = -17.57 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 56.98 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -3.5 \text{ ‰}$	$M_r = 4.9 \text{ kNm}$
$P_o = 59.98 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 9.6 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 4.9 \text{ kNm}$
$P_\omega = 35.89^* \text{ kN}$	$M_u = 5.9 \text{ kNm}$	$W = 0.0 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.196 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 2.8 \text{ kNm}$	$\sigma_s = \text{----}^* \text{ MPa}$
$A_{pn} = \text{---}^* \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 9.9 \text{ mm}$
cord : $2\phi 2.5\text{mm}$	$A_{svn} = 0.0 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 1.2 \text{ mm}$

- \* O momento fletor correspondente às combinações de ações é inferior ao momento fletor de fissuração.
- \* Em função da grande variação para pequenas mudanças nas excentricidades, não foi calculada a armadura necessária.

$$\#_{\text{tela}} = 100\text{mm} \times 100\text{mm}$$

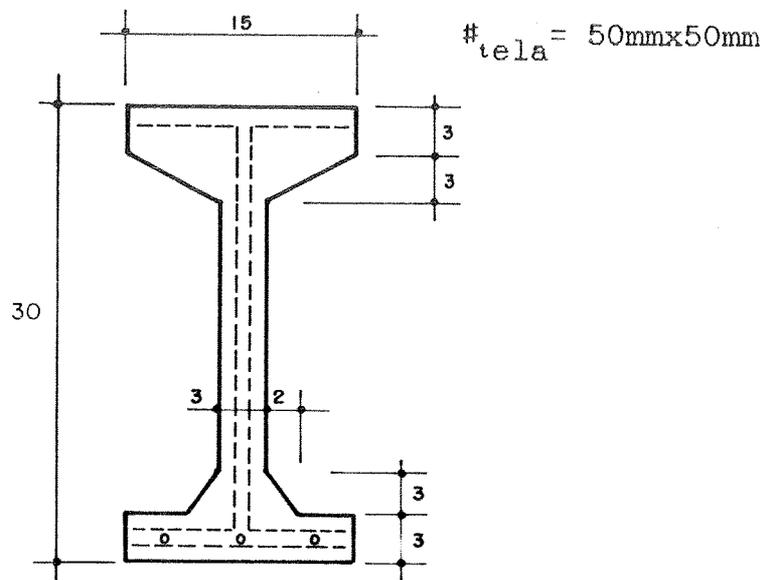
$$A_{p,\text{sup}} = 2 \text{ cord } 2 \phi 2,5 \text{ mm}$$



### 5.3.5. VIGA BALDRAME

a) bald1-1P

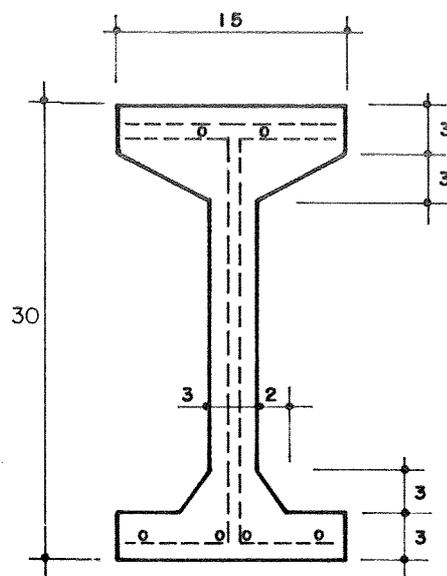
DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 186.0 \text{ cm}^2$		
$I = 22748 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.21 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.10 \text{ MPa}$
$G = 5.96 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 15.58 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -14.17 \text{ MPa}$
$Q = 1.80 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 4.70 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -4.28 \text{ MPa}$
$l = 5.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -17.92 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 4.04 \text{ MPa}$
$\phi_s = 6.9 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -12.98 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 9.03 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 125.58 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -2.6 \text{ ‰}$	$M_r = 5.0 \text{ kNm}$
$P_o = 114.10 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 10.0 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 29.8 \text{ kNm}$
$P_\infty = 85.52 \text{ kN}$	$M_u = 49.9 \text{ kNm}$	$W = 0.06/0.02 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.864 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 41.1 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 234 / 146 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.82 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 2.41 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 1.4 \text{ mm}$
cord : $3\phi 9.5 \text{ mm}$	$A_{svn} = 1.54 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 2.1 \text{ mm}$



b) bald1-1L

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 186.0 \text{ cm}^2$		
$I = 22748 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.21 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.10 \text{ MPa}$
$G = 5.96 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 15.58 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -14.17 \text{ MPa}$
$Q = 1.80 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 4.70 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -4.28 \text{ MPa}$
$l = 5.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -22.21 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 3.12 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 6.9 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -21.24 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 2.29 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 185.76 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.5 \%$	$M_r = 5.0 \text{ kNm}$
$P_o = 166.45 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 8.0 \%$	$M_{rp} = 23.8 \text{ kNm}$
$P_{\infty} = 114.07 \text{ kN}$	$M_u = 48.2 \text{ kNm}$	$W = 0.0 \text{ mm}$
$A_{pe} = 1.152 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 41.1 \text{ kNm}$	$\sigma_s = \text{----} * \text{ MPa}$
$A_{pn} = 1.25 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 2.41 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = -0.4 \text{ mm}$
cord : $3\phi 3.5\text{mm}$	$A_{svn} = 1.46 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 2.1 \text{ mm}$

\* O momento fletor de serviço é inferior ao momento fletor de fissuração.



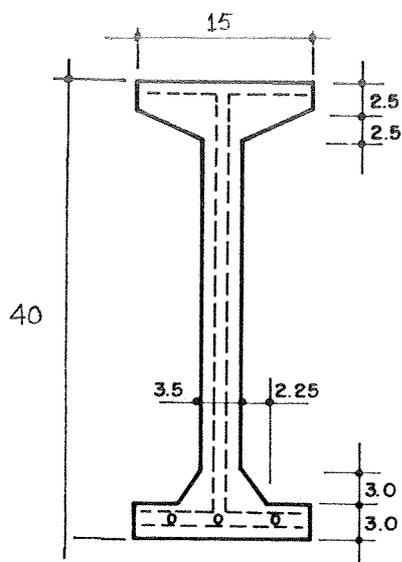
$\phi_{fio} \text{ tela} = 2,5 \text{ mm}$   
 $\#_{tela} = 50\text{mm} \times 50\text{mm}$   
 $A_{p,sup} = 2 \text{ cord } 2 \phi 2,0 \text{ mm}$

Obs: Para a seção bald-1-1:

$$\frac{L \cdot h}{b_f^2} = 73 < 500 \quad ; \quad \frac{L}{b_f} = 37 < 50$$

c) bald2-1P

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 224.4 \text{ cm}^2$		
$I = 46347 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.41 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.39 \text{ MPa}$
$G = 6.06 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 15.23 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -15.01 \text{ MPa}$
$Q = 0.0 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 0.0 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = 0.0 \text{ MPa}$
$l = 6.8 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -14.68 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 4.25 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 6.3 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -13.55 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 3.14 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 125.58 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -2.9 \text{ ‰}$	$M_r = 8.5 \text{ kNm}$
$P_o = 115.49 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 10.0 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 34.8 \text{ kNm}$
$P_{ao} = 89.85 \text{ kN}$	$M_u = 61.8 \text{ kNm}$	$W = 0.04/0.04 \text{ mm}$
$A_{pe} = 0.864 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 49.0 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 180/180 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 0.87 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 1.20 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 2.9 \text{ mm}$
cord : $3\phi 3.5\text{mm}$	$A_{svn} = 0.69 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 0.0 \text{ mm}$



#<sub>tela</sub> = 50mmx50mm

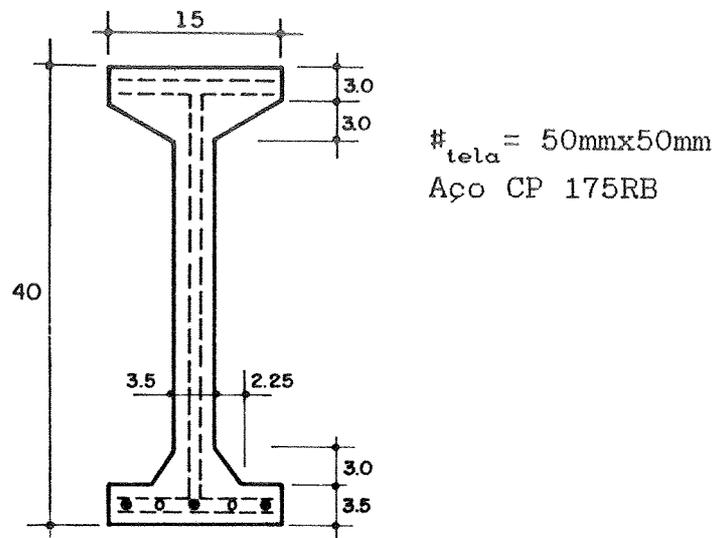
Obs: Para a seção bald2-1:

$$\frac{L \cdot h}{b_f^2} = 121 < 500 \quad ; \quad \frac{L}{b_f} = 45 < 50$$

d) baldi-2P

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 298.7 \text{ cm}^2$		
$I = 49979 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 1.71 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -1.65 \text{ MPa}$
$G = 6.1 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 17.49 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -16.89 \text{ MPa}$
$Q = 2.5 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 7.15 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = -6.92 \text{ MPa}$
$l = 7.5 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -15.17 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 4.20 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 6.9 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -13.81 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 2.88 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 140.09 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.5 \text{ ‰}$	$M_r = 8.9 \text{ kNm}$
$P_o = 127.97 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 7.4 \text{ ‰}$	$M_{rp} = 49.4 \text{ kNm}$
$P_\infty = 117.54 \text{ kN}$	$M_u = 84.2 \text{ kNm}$	$W = 0.09/0.0 \text{ mm}$
$A_{pe} = 1.046 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 84.6 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 199 / \text{---} * \text{ MPa}$
$A_{pn} = 1.08 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 2.41 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 5.2 \text{ mm}$
cord : 3/8"	$A_{svn} = 1.68 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 4.6 \text{ mm}$

\* O momento fletor correspondente às combinações de ações é inferior ao momento fletor de fissuração.

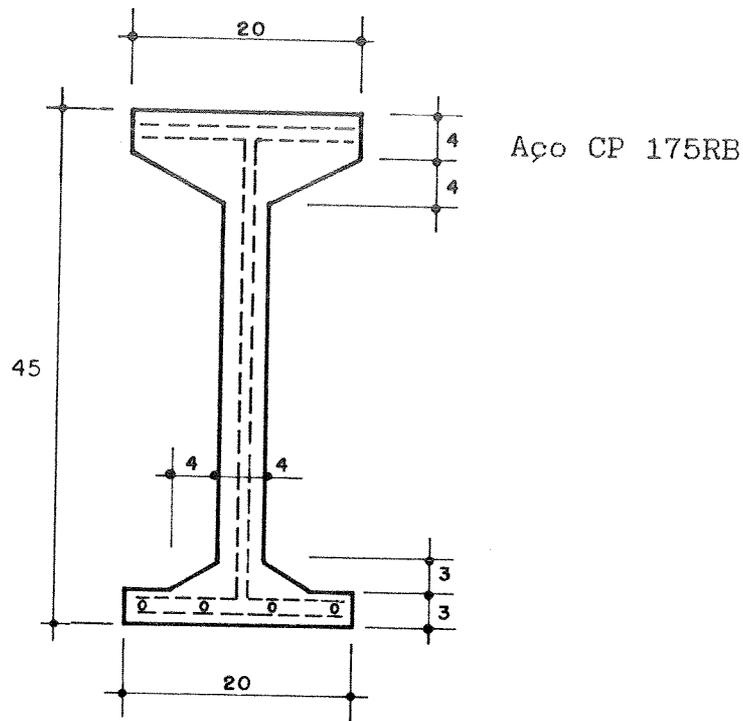


Obs: Para a seção baldi-2:

$$\frac{L \cdot h}{b_f^2} = 133 < 500 \quad ; \quad \frac{L}{b_f} = 50$$

e) bald2-2P

DADOS	TENSÕES NAS BORDAS	
	INFERIOR	SUPERIOR
$S = 996.0 \text{ cm}^2$		
$I = 90946 \text{ cm}^4$	$\sigma_{1G1} = 2.81 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G1} = -2.98 \text{ MPa}$
$G = 7.44 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1G} = 24.93 \text{ MPa}$	$\sigma_{2G} = -21.09 \text{ MPa}$
$Q = 0.0 \text{ kN/cm}$	$\sigma_{1Q} = 0.0 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Q} = 0.0 \text{ MPa}$
$l = 10.0 \text{ m}$	$\sigma_{1Po} = -21.98 \text{ MPa}$	$\sigma_{2Po} = 5.15 \text{ MPa}$
$\Phi_s = 8.0 \text{ mm}$	$\sigma_{1f} = -19.79 \text{ MPa}$	$\sigma_{2f} = 3.24 \text{ MPa}$
PROTENSÃO	E.L.Ultimo	E.L.Utilização
$P_i = 280.07 \text{ kN}$	$\epsilon_c = -9.5 \%$	$M_r = 13.1 \text{ kNm}$
$P_o = 244.75 \text{ kN}$	$\epsilon_s = 9.5 \%$	$M_{rp} = 89.8 \text{ kNm}$
$P_\infty = 228.87 \text{ kN}$	$M_u = 137.4 \text{ kNm}$	$W = 0.03/0.03 \text{ mm}$
$A_{pe} = 2.092 \text{ cm}^2$	$M_{max} = 130.2 \text{ kNm}$	$\sigma_s = 154 / 154 \text{ MPa}$
$A_{pn} = 2.25 \text{ cm}^2$	$A_{sve} = 2.41 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_{gp} = 9.9 \text{ mm}$
cord : 3/8"	$A_{svn} = 1.56 \text{ cm}^2/\text{m}$	$f_q = 0.0 \text{ mm}$



Obs: Para a seção bald2-2:

$$\frac{L \cdot h}{b_f^2} = 112 < 500 \quad ; \quad \frac{L}{b_f} = 50$$

#### 5.4. COMENTÁRIOS

Os comentários apresentados a seguir são, em alguns casos, decorrentes de conclusões que os resultados dos exemplos permitem incorporar. Em outros, repetem algumas indicações já apresentadas no capítulo anterior e que devem ter o respaldo de estudos experimentais futuros.

Reafirma-se novamente que as seções propostas e as respectivas armaduras ativa e passiva não representam um dimensionamento otimizado. A análise de pequenos detalhes a respeito de deformações na ruptura, armadura de cisalhamento e o próprio arranjo das armaduras, mostra que para alguns casos eles podem ser revistos.

Em nenhum exemplo o critério de dimensionamento foi determinado pelo valor da contra-flecha, ainda que ele seja determinante para algumas peças. Os painéis de fechamento por exemplo, devem receber uma protensão próxima da protensão centrada, de modo a permanecerem predominantemente planos. Nos exemplos, a flecha devido à protensão foi inferior a 4,0 mm.

Particularmente para coberturas em duas águas, a contra-flecha não é primordial para as vigas-telha. Porém, se esse fosse o critério de determinação da força de protensão, a armadura necessária teria que ser maior, conforme mostram os resultados.

As seções calha apresentam uma forma que, pela própria exigência de utilização, agravada pela existência de paredes delgadas (característica da argamassa armada), ressurte-se de mais massa de argamassa na região comprimida, na análise da segurança à ruptura. Daí a necessidade de se dispor armadura de barras complementares na região comprimida, em quantidade superior a das barras construtivas recomendadas. Uma solução melhor parece a adoção de formas com mesas de compressão, conforme se utilizou nas seções calha-A dos exemplos. Outra possibilidade seria aumentar as espessuras das paredes na região comprimida, extrapolando o limite convencional de 4cm, fato que não se contrapõe às características de elementos de seção delgada.

Ainda sobre a definição da forma das seções, um fator importante é a posição do centro geométrico. Em linhas gerais, seções aproximadamente simétricas em relação à altura são mais adequadas, pois os efeitos da força de protensão se distribuem de maneira mais uniforme nas bordas inferior e superior. Ou seja, seções com centro de massa muito próximo à borda inferior, por exemplo, podem apresentar problemas de tração excessiva na etapa de fabricação do elemento, especialmente porque as peças de argamassa armada têm peso reduzido, além de se ter uma protensão menos eficiente, próxima de uma protensão centrada. As seções propostas nos exemplos incorporam estas indicações.

Conforme já foi comentado no capítulo anterior, a utilização de aços de protensão de relaxação baixa favorece o controle da tensão de tração na borda que será comprimida pelas ações externas. É um fato que pode ser observado nos exemplos.

Ainda sobre as tensões de tração na etapa da fabricação, não se observaram maiores problemas nas peças estudadas, fato revelado pelo pequeno número de elementos em que se previu a armadura de protensão adicional na borda superior. Este fato é explicado por um valor maior na relação inércia/área que apresentam as seções delgadas.

Sobre a armadura ativa na borda superior, o critério adotado para a sua colocação foi basicamente o controle da tensão de tração na fibra de concreto da borda superior. No entanto, apesar de trazer desvantagens no dimensionamento no estado limite último por solicitações normais e de resultar numa protensão menos eficiente, enquanto análise de excentricidade equivalente, conforme atestam os resultados, as vantagens adicionais da presença desta armadura parecem indicar a sua utilização com maior frequência.

Sob aspectos construtivos, ela pode substituir com vantagens as barras complementares normalmente dispostas nas posições de dobras das telas, introduzindo uma maior rigidez ao conjunto das armaduras e proporcionando um controle mais efetivo do cobrimento das telas.

Além disso, o comportamento da peça deve ser superior, com um controle adicional quando da ocorrência de uma possível

fissuração nesta região, provocada por uma solicitação excepcional, principalmente nas etapas de fabricação, transporte e montagem.

A escolha da abertura das malhas das telas utilizadas se deu em função de diversos aspectos. Para o espaçamento longitudinal, decorreu da armadura transversal necessária, e complementarmente do controle da fissuração. Na outra direção, adotou-se um espaçamento entre os fios da tela (50mm) de maneira a atender satisfatoriamente a segurança à ruptura, prevendo a colocação de armadura adicional de barras na região tracionada de maneira ponderada. Conforme indicado no capítulo anterior, procurou-se utilizar malhas com a máxima abertura. A menos de alguns exemplos de vigas cumeeira e baldrame, as telas de 50mmx100mm foram suficientes. Nos outros casos, talvez seja melhor aumentar a espessura das almas e conservar telas com malhas mais abertas, o que pode resultar em peças mais econômicas e mais estáveis.

O diâmetro dos fios das telas de 2,77mm foi predominantemente adotado por imaginá-lo mais indicado para a maior rigidez e resistência que se espera da armadura difusa nas peças protendidas, onde a sua colaboração deve ser efetiva e acentuada nas etapas de carga posteriores à ocorrência da primeira fissura.

Exemplos com telas de aço de chapa expandida não foram feitos para simplificar os cálculos. Porém, conforme se comenta no capítulo posterior (a partir dos resultados experimentais), nestes casos deve-se prever ao menos duas telas em toda a seção. A razão é a mesma apresentada no parágrafo anterior, que justifica o uso de fios de tela soldada de maior diâmetro.

De uma maneira geral, os resultados foram bons. As peças propostas com relação altura/vão (1/18 em média para as vigas e 1/40 para a telha) próxima aos valores usualmente adotados nos elementos pré-fabricados protendidos apresentaram boas possibilidades de um dimensionamento adequado.

## CAPÍTULO 6

### ANÁLISE EXPERIMENTAL

No breve estudo experimental que se desenvolve neste trabalho procura-se investigar o comportamento de perfis de argamassa armada protendida solicitados à flexão. Ele tem um caráter introdutório e geral, e apesar de ser pouco representativo para obter resultados específicos concludentes, em virtude de serem ensaiados apenas dois modelos, traz bons indicativos da viabilidade das propostas e das hipóteses adotadas.

São executados dois modelos de mesma seção transversal, armados com tela de aço soldada e tela de chapa de aço expandida. Os modelos escolhidos foram ensaiados em pesquisas recentes desenvolvidas por Giongo<sup>4</sup> e Barboza<sup>5</sup>. Eles assumem portanto aqui uma função comparativa na análise de peças protendidas e não protendidas, especialmente em relação aos valores do momento fletor de fissuração, do momento fletor resistente, do estado de fissuração e dos deslocamentos.

#### 6.1. MODELOS EXPERIMENTAIS

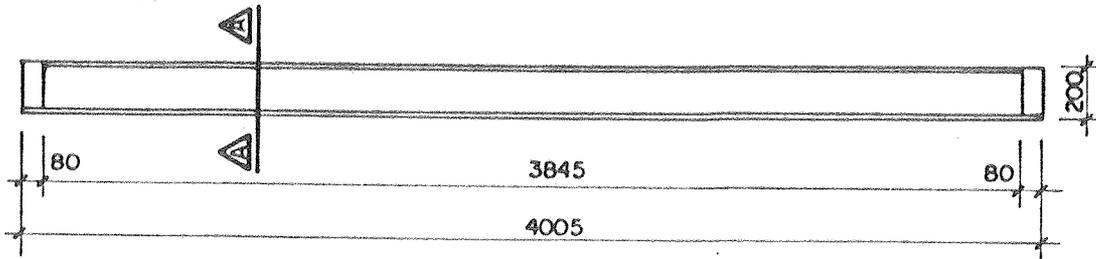
Os modelos ensaiados têm seção transversal tipo duplo T, com comprimento total de face a face de 4005mm (e distância entre os centros dos apoios de 3925mm). A altura mede 200mm e as mesas de tração e compressão têm largura de 325mm e 100mm respectivamente. As espessuras das mesas e da alma são adotadas iguais a 25mm.

As mísulas posicionadas na ligação das mesas com a alma são para facilitar a operação de desforma.

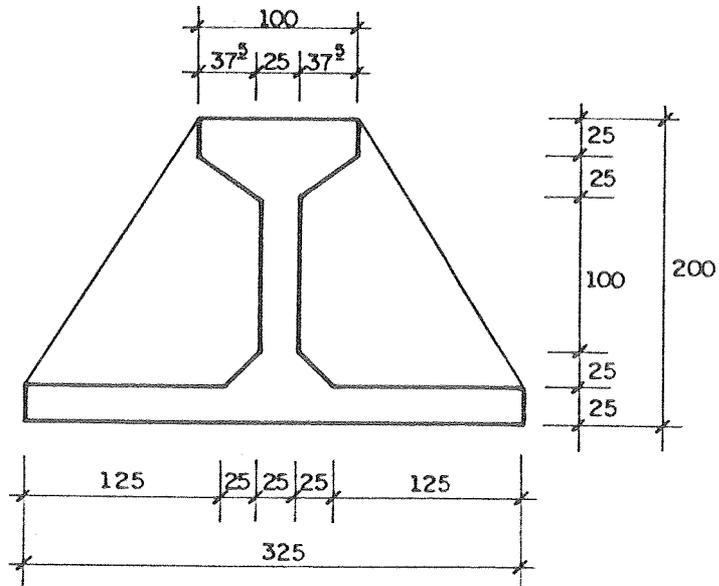
Os modelos têm diafragmas incorporados nas extremidades, para distribuir melhor as reações dos apoios na seção transversal.

A figura 6.1 ilustra os dados relativos à seção geométrica dos modelos.

FORMA

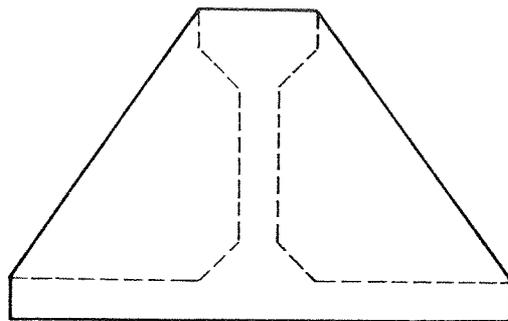


VISTA LATERAL  
ESC. 1 : 30

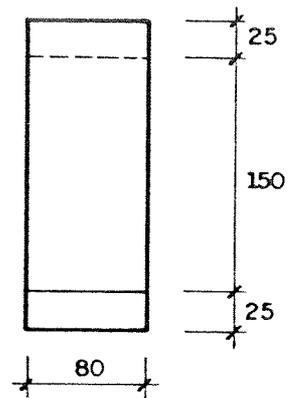


CORTE A  
ESC. 1 : 5

SEÇÕES DOS APOIOS



VISTA DE TOPO  
ESC. 1 : 5



VISTA LATERAL  
ESC. 1 : 5

Fig. 6.1 - Vista lateral e corte dos modelos

## 6.2. FÔRMAS

A fôrma utilizada foi a mesma projetada e utilizada nos ensaios dos modelos realizados por Giongo<sup>4</sup>. Ela foi construída com chapas de aço de 3mm, perfis metálicos e madeira, conectados por parafusos. Ela foi projetada para moldagem com a viga na posição horizontal, no sentido da mesa tracionada para a comprimida.

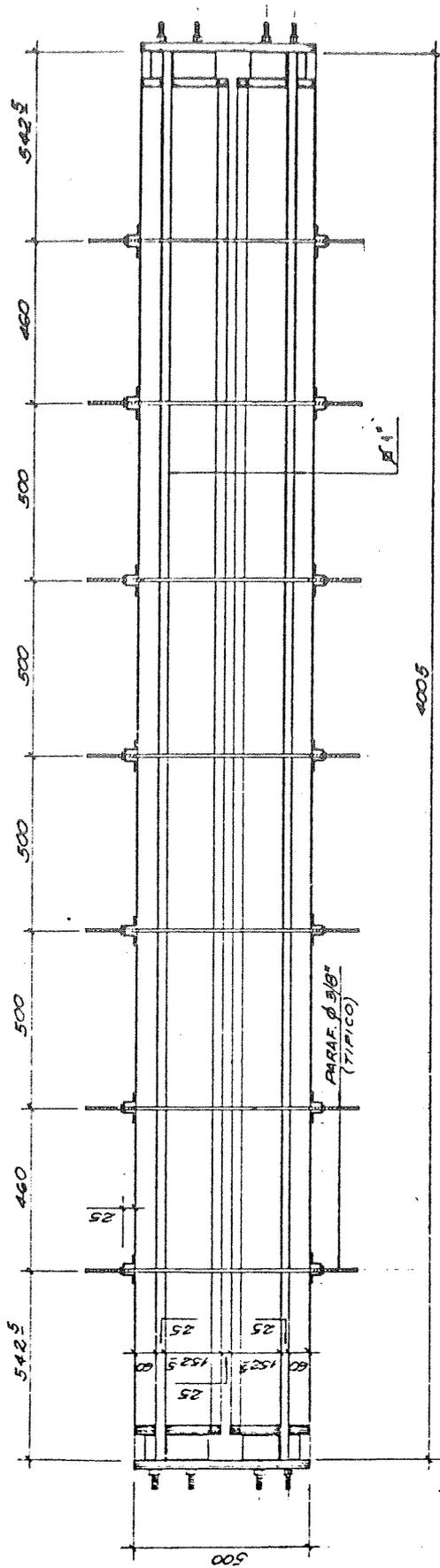
Nas faces laterais da fôrma utilizaram-se vigotas de peroba de 60mm x 160mm e na mesa tracionada (parte superior), tábuas de pinho de 25mm de espessura, ligadas às vigotas e aos perfis metálicos.

As figuras 6.2. e 6.3. mostram as vistas superior e lateral, além de outros detalhes das fôrmas.

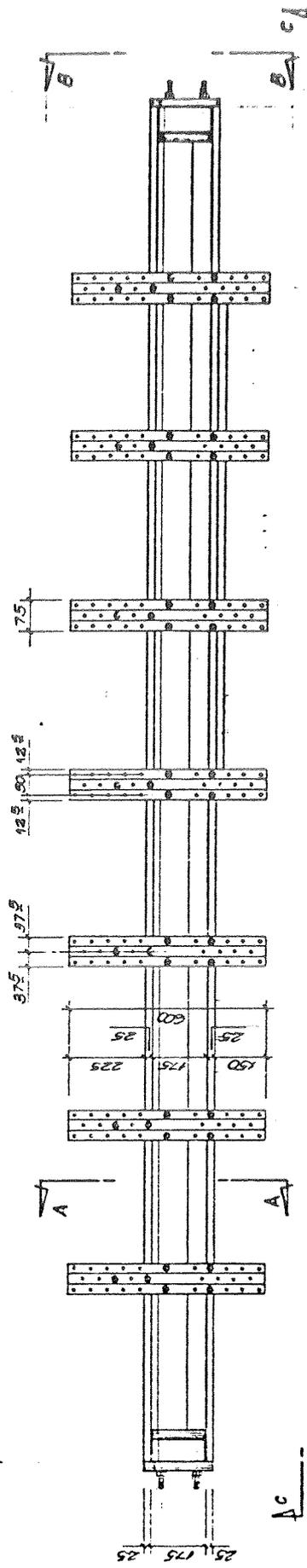
## 6.3. ARGAMASSA

Os materiais utilizados na composição da argamassa foram areia média do rio Mogi-Guaçu, pedra britada com diâmetro máximo de 6,0mm e cimento de alta resistência inicial (ARI) da Ciminias (que propiciou a desprotensão aos 4 dias e ensaio aos 6 dias, após cura à temperatura ambiente).

Na dosagem da argamassa foram considerados os parâmetros de resistência, lançamento e adensamento. Estudos desenvolvidos em trabalhos anteriores indicaram que uma proporção de 60,6% de areia e 39,4% de pedrisco resultavam numa trabalhabilidade adequada. A quantidade de água foi fixada de modo a obter um índice de consistência aproximado de 220mm ("flow-table"), para proporcionar uma moldagem perfeita mesmo com a pequena espessura dos modelos. Alguns ensaios preliminares efetuados no Laboratório de Materiais do Departamento de Arquitetura da EESC, resultaram num valor de 0,48 para a relação água/cimento, considerado razoável inclusive para o aspecto de durabilidade. E finalmente, para se obter uma resistência média dos corpos-de-prova aos 7 dias da ordem de 40MPa, o consumo de cimento resultou aproximadamente igual a  $500\text{kg/m}^3$ , conforme comprovaram alguns corpos-de-prova anteriormente ensaiados, em



VISTA SUPERIOR  
ESC. 1:15



VISTA LATERAL  
ESC. 1:15

Fig.6.2 - Vista superior e lateral da fôrma



concordância ainda com os valores obtidos por Agnesini [1988]<sup>33</sup>. O traço final adotado foi de 1:1,7:1,1:0,48 em massa de cimento, areia, pedrisco e água.

O controle de resistência da argamassa, de relevância acentuada para permitir a liberação da protensão, foi feito com ensaios executados em corpos-de-prova cilíndricos, conforme recomenda a NBR-7215 - Ensaios de Cimento Portland [1982]<sup>34</sup>.

#### 6.4. ARMADURAS

Os modelos foram dimensionados para apresentar um momento fletor de ruptura próximo ao dos modelos ensaiados por Giongo<sup>4</sup> e Barboza<sup>5</sup>, da ordem de 20,0 a 22,0 KNm. Como se pretendeu dispor apenas uma tela em toda a seção transversal, com o objetivo de diminuir o consumo de telas, a armação dos perfis resultou nos esquemas ilustrados nas figuras 6.5 e 6.6. A figura 6.4 mostra a armação dos diafragmas das extremidades.

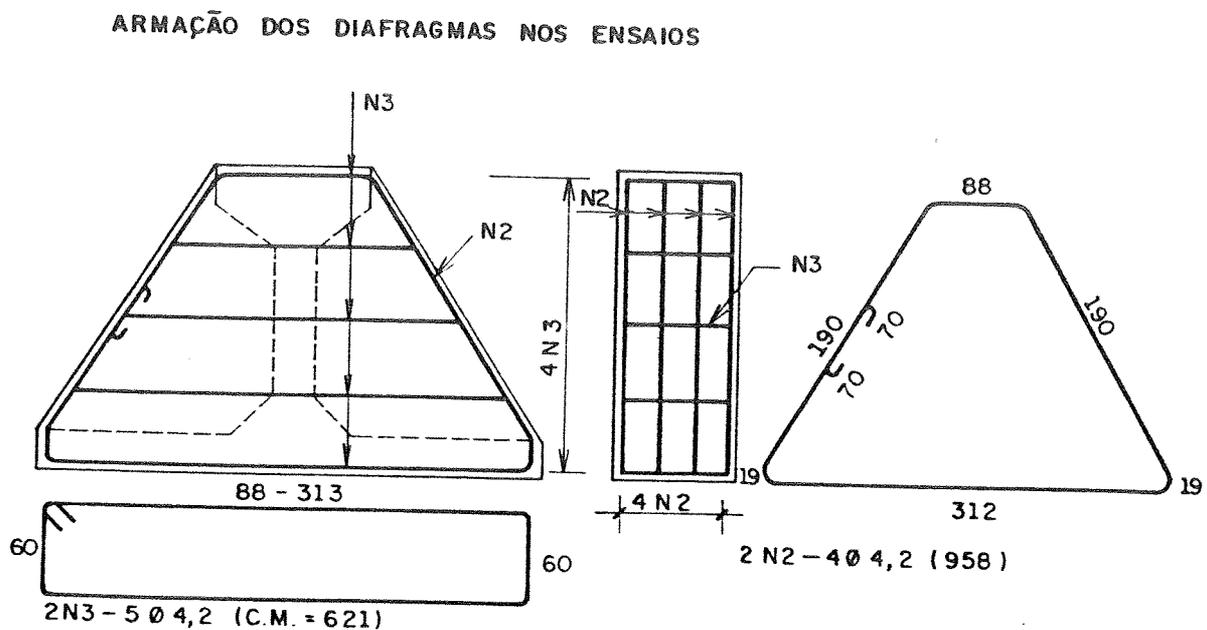


Fig.6.4 - Armação dos diafragmas

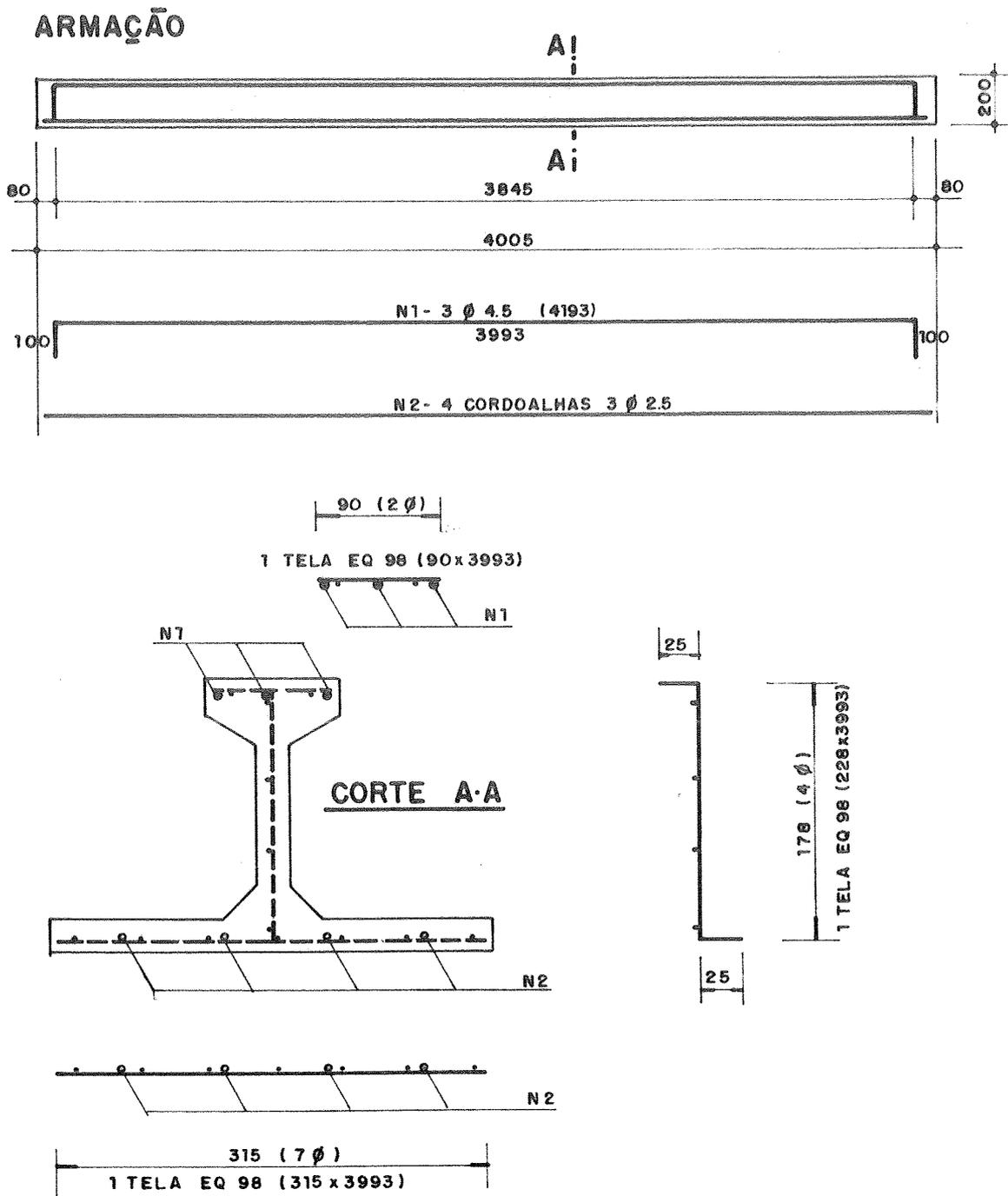


Fig.6.5 - Armação do modelo 1

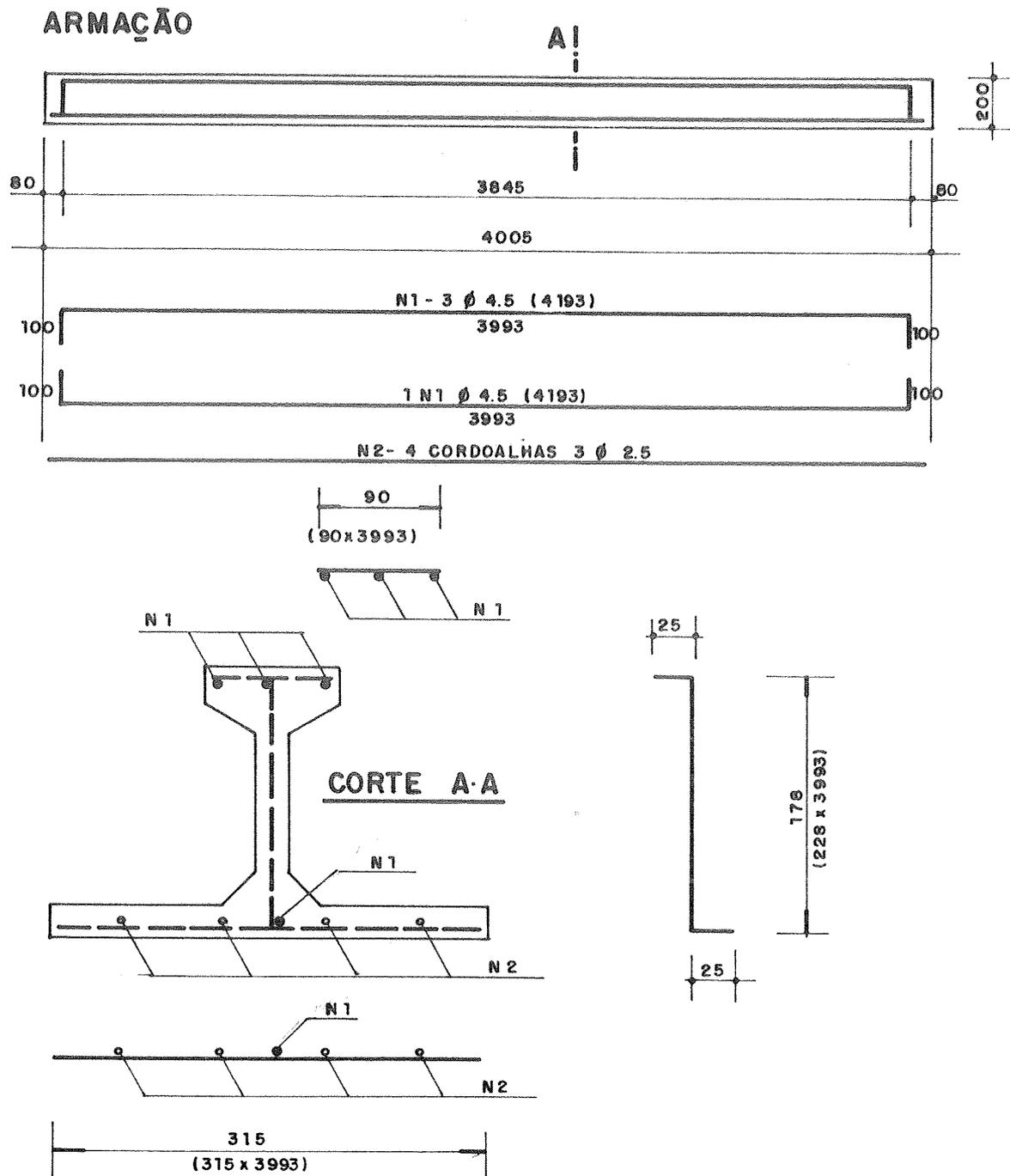


Fig.6.6 - Armação do modelo 2

A tela de aço soldada utilizada foi a EQ98, aço CA-60B, com fios de diâmetro de 2,5mm e espaçamento longitudinal e transversal de 50mm. As características desta tela foram obtidas em trabalho anterior, de Ballarin<sup>16</sup>:

$$f_y = 840 \text{ MPa} ; \quad f_{0,2} = 777 \text{ MPa} ; \quad E_t = 197000 \text{ MPa} .$$

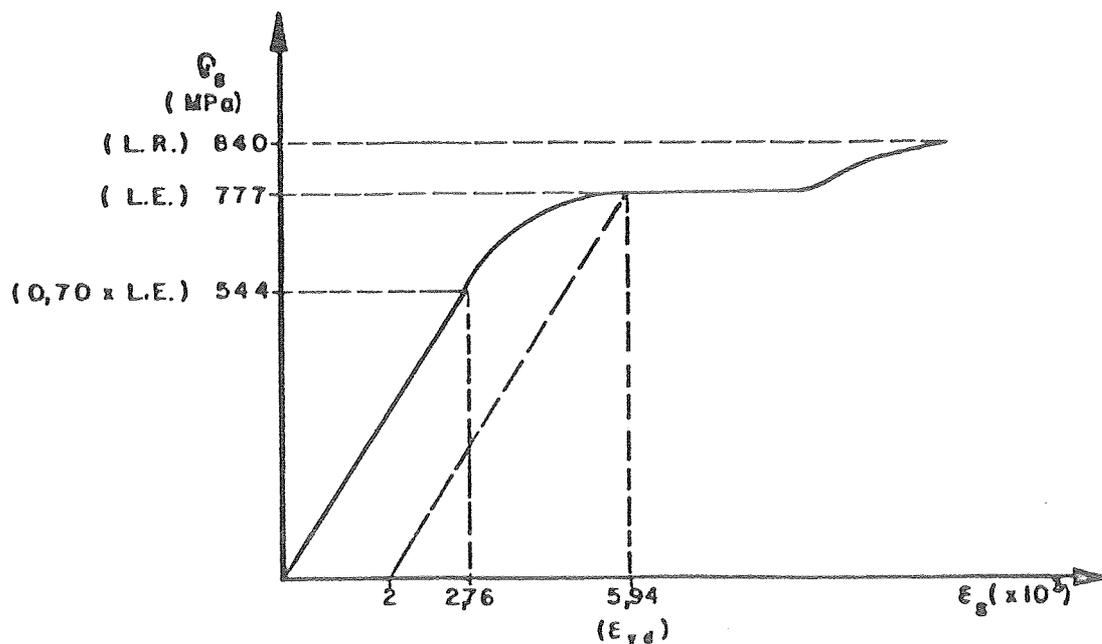


Fig. 6.7<sup>16</sup> - Diagrama  $\sigma$  x  $\epsilon$  da tela de aço soldada

A tela de aço de chapa expandida utilizada foi a de abertura 18mm x 50mm, espessura da chapa igual a 0,9mm e largura do cordão igual a 1,5mm. Os ensaios de tração efetuados por Barboza<sup>5</sup> indicam valores de 438MPa e 298MPa para as resistências últimas destas telas nas direções perpendicular e paralela à direção da expansão respectivamente, que implicam em valores de  $f_{yk}$  de 300MPa e 180MPa. A identificação de um diagrama  $\sigma$  x  $\epsilon$  experimental não foi possível naquele trabalho, dadas as características particulares desta tela.

Optou-se aqui por dispor a tela expandida com direção da expansão paralela ao eixo da viga, ainda que assim ela tenha menor eficiência mecânica. Em compensação, evita-se a perda de telas com emendas e facilita-se bastante a montagem da armadura.

A armadura complementar constituiu-se de fios de 4,5mm de diâmetro, aço CA-60B. Os ensaios dos corpos-de-prova da armadura revelaram as seguintes características<sup>5</sup>:

$$\begin{aligned} \epsilon_p &= 1,91\% ; f_p = 377\text{MPa} ; \epsilon_y = 5,15\% ; \\ f_y &= 651\text{MPa} ; f_u = 737\text{MPa} ; \epsilon_B = 199155\text{MPa} . \end{aligned}$$

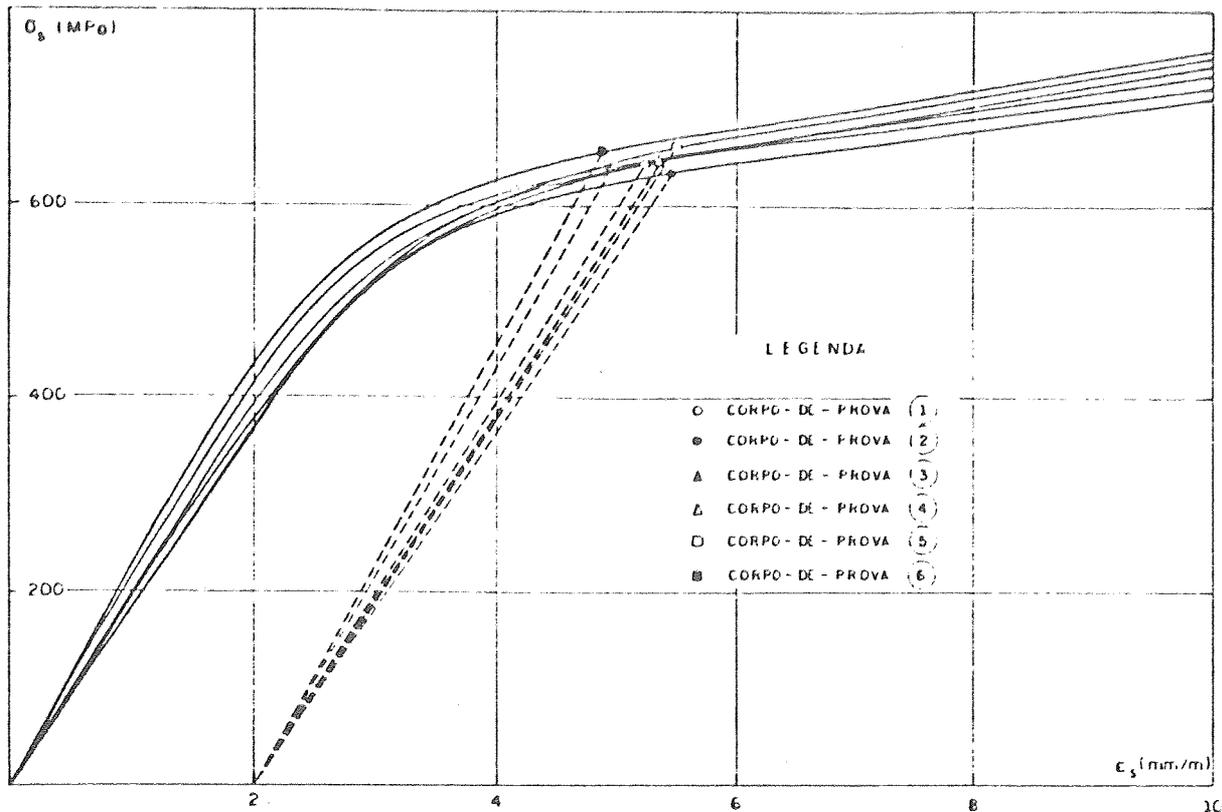


Fig.6.8<sup>5</sup> - Diagrama  $\sigma \times \epsilon$  armadura complementar

As fotos 6.1 e 6.2 mostram as armaduras das telas e fios complementares dos modelos 1 e 2.

A armadura de protensão foi constituída por quatro cordoalhas de três fios de 2,5mm de diâmetro, de aço de relaxação normal (CP180RN), que apresenta os seguintes valores característicos:

$$\begin{aligned} f_{ptk} &= \text{limite nominal de resistência à tração} = 180\text{kgf/mm}^2 ; \\ f_{pyk} &= \text{tensão nominal para alongamento de 1\%} = 153\text{kgf/mm}^2 ; \\ S &= \text{área nominal de aço de uma cordoalha} = 14,7\text{mm}^2 ; \\ E_p &= \text{módulo de elasticidade longitudinal} = 19.500\text{kgf/mm}^2 ; \\ \psi &= \text{coeficiente de relaxação (100h, 20}^\circ\text{C)} = 4,5\%, 7\% \text{ e } 12\% \\ &\text{para } \sigma_{pi}/f_{ptk} = 60\%, 70\% \text{ e } 80\% \text{ respectivamente.} \end{aligned}$$

A figura 6.9. mostra o diagrama  $\sigma \times \epsilon$  nominal destas cordoalhas.

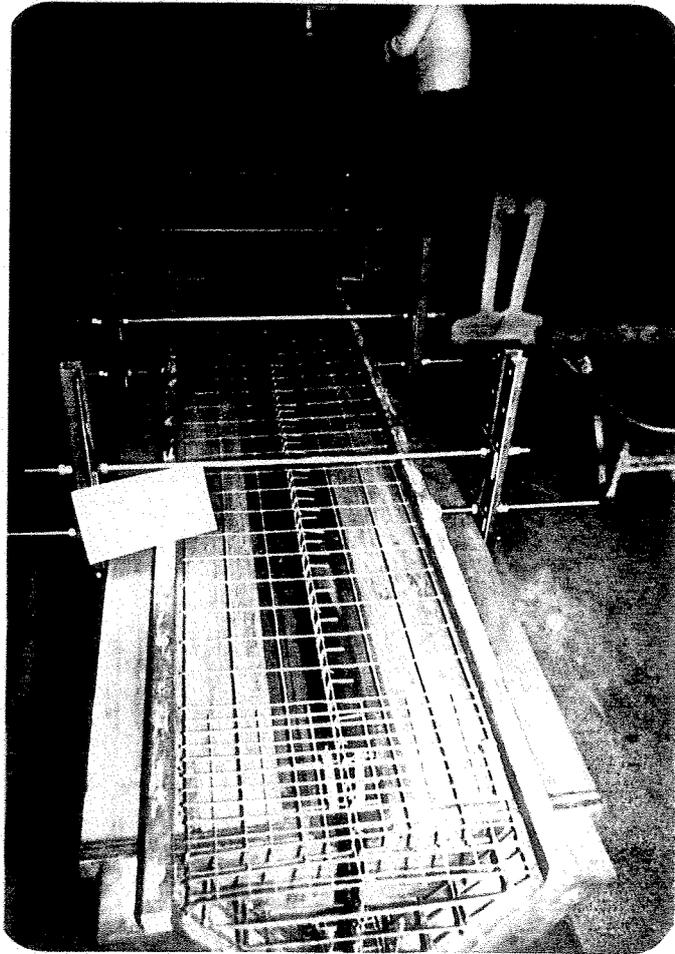


Foto 6.1 - Aspecto da armação do modelo 1 na fôrma

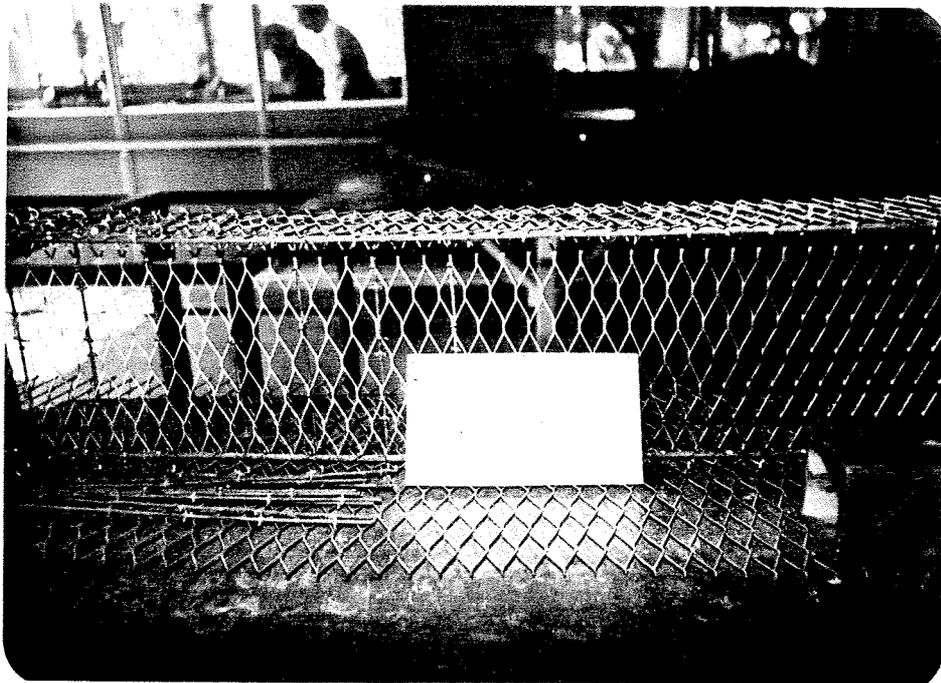


Foto 6.2 - Armação do modelo 2 fora da fôrma

CORDOALHA 2 e 3 FIOS ALIVIADA DE TENSÕES PARA CONCRETO PROTENDIDO  
 CP - 180 RN

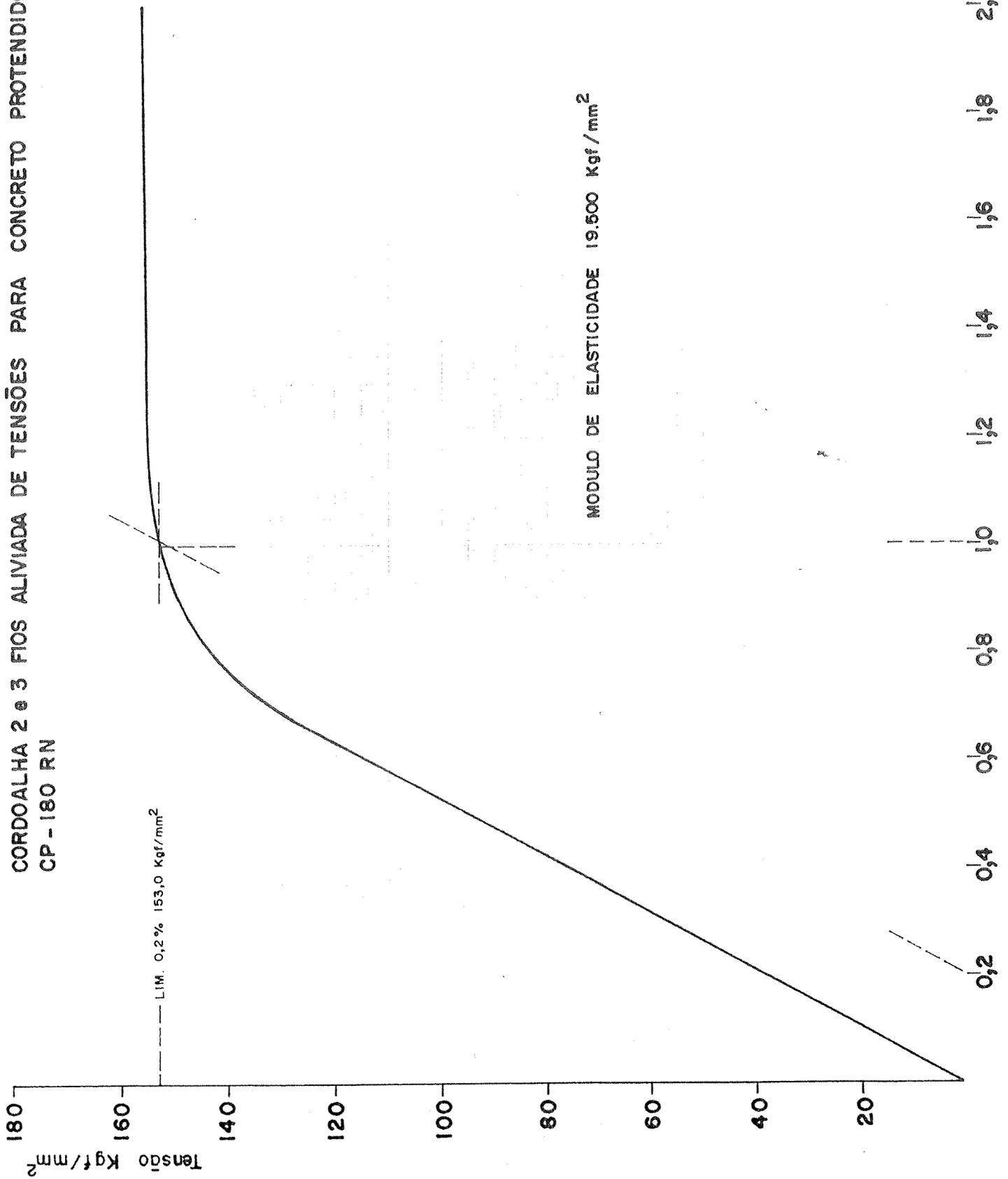


Fig.6.9 - Diagrama característico  $\sigma \times \epsilon$  da cordoalha

O grau de protensão correspondente ao arranjo de armaduras adotado tem o valor aproximado de 0,5 , considerando valores de 10,0kN.m e 21,0kN.m para o momento fletor de descompressão e momento fletor último.

As armaduras foram posicionadas nas fôrmas de modo a resultar um cobrimento da ordem de 8mm para os fios externos das telas. As cordoalhas da mesa tracionada tinham portanto um cobrimento de 10,5mm, já que os fios das telas eram amarrados às cordoalhas já esticadas. Com o posicionamento correto das cordoalhas dispensou-se portanto a colocação de espaçadores nesta região da viga.

A armadura transversal composta pelos fios das telas era suficiente para que a ruptura se desse por flexão. Porém, para evitar qualquer problema devido ao cisalhamento, foram colocados fios de 2,5mm a cada 5,0cm nas almas, num trecho de 50cm a partir dos apoios.

Foi adicionada uma armadura complementar de telas na região de introdução da protensão, constituída por uma tela adicional do mesmo tipo da usada nos respectivos modelos, num trecho de 25cm, de modo a envolver as cordoalhas, como armadura de fretagem, que seria mais eficiente se fosse helicoidal (mas de difícil execução, face à pequena espessura das peças). Esta recomendação consta inclusive da Norma Soviética de Argamassa Armada. A foto 6.3 ilustra a armadura adicional de cisalhamento e de fretagem.

Deve ser ressaltada a simplicidade da armadura dos dois modelos, obtida com uma pequena quantidade de dobras e com a ausência de emendas.

#### 6.5. EXECUÇÃO DOS MODELOS

O processo de execução dos modelos envolveu várias etapas. A armadura passiva foi preparada inicialmente na bancada do Laboratório da EESC-USP, paralelamente à montagem da fôrma. Após o seu posicionamento (ainda parcial) no interior da fôrma, o conjunto foi levado até a pista de protensão. As cordoalhas ainda estavam soltas, de modo a não haver qualquer interferência

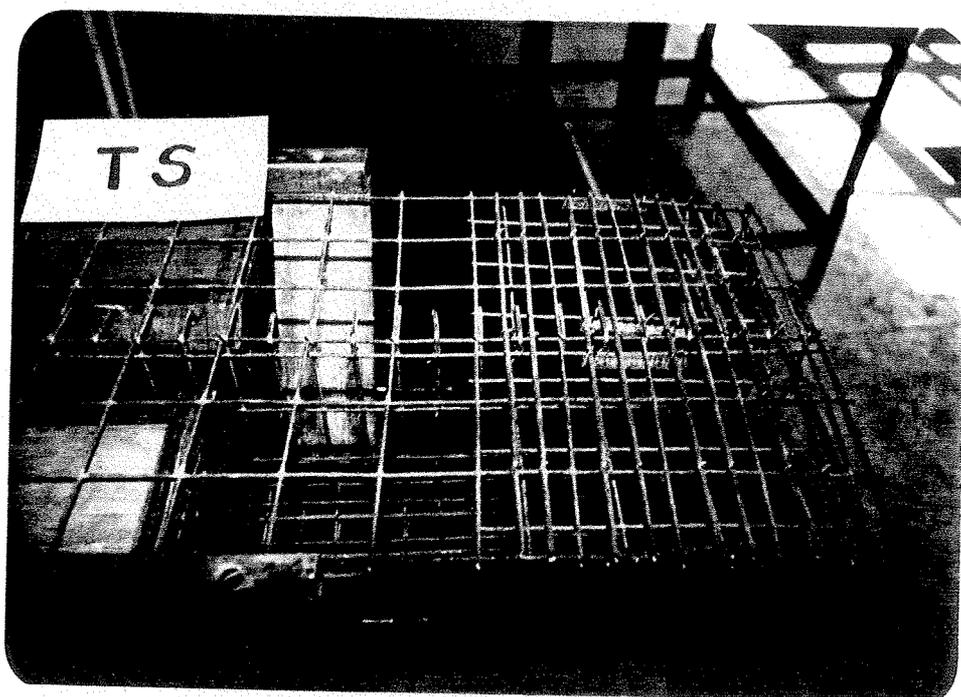


Foto 6.3 - Armadura adicional de cisalhamento e de fretagem do modelo 1

no conjunto durante a operação de estiramento.

A protensão das cordoalhas se deu uma a uma, já que o macaco utilizado era monofio. Ao término desta operação, foi feito o ajuste final da armadura na fôrma, a qual foi amarrada às cordoalhas tensionadas. Em função de alguns pequenos contratempos, previsíveis pela própria natureza do trabalho e pela novidade que ele representava, as etapas posteriores de moldagem, adensamento e acabamento foram executadas no dia seguinte.

A seguir apresentam-se com mais detalhes as etapas de protensão, adensamento e cura, além dos respectivos equipamentos utilizados.

Para a execução da protensão foi construída uma pista cujas principais características são:

dimensões: comprimento = 12,0 m ;

largura = 1,5 m ;

força máxima:  $P = 30,0$  tf para uma excentricidade máxima de 0,50 m.

Como é usual nos casos de pré-tração, o esticamento se deu em uma única cabeceira (de protensão). A estrutura de reação para o apoio do macaco de protensão e para a ancoragem morta na cabeceira passiva é constituída por dois perfis de aço verticais, interligados por solda na base através de um perfil transversal. O perfil posicionado na altura correspondente à posição das cordoalhas e que serve de guia para o seu correto posicionamento, foi parafusado aos perfis verticais, de modo a permitir a protensão em diversos níveis. Na verdade são dois perfis I interligados por chapas soldadas, deixando uma abertura para a passagem das cordoalhas.

Na cabeceira passiva, as ancoragens se apoiam em pequenas chapas posicionadas nestes perfis. Entre estas chapas e os porta-cunhas foram colocadas células de carga em todas as cordoalhas, para medir as forças efetivamente transferidas a elas pelo macaco. As células, construídas na EESC-USP, tinham capacidade para 25kN. Na cabeceira de protensão, a ancoragem e o macaco se posicionam de maneira análoga.

O macaco utilizado, fabricado pela WEILER, é do tipo monofio e de encunhamento manual, com capacidade para 160kN, e neste caso trabalhou ligado a uma bomba hidráulica manual.



Foto 6.4 -Detalhe da cabeceira de protensão

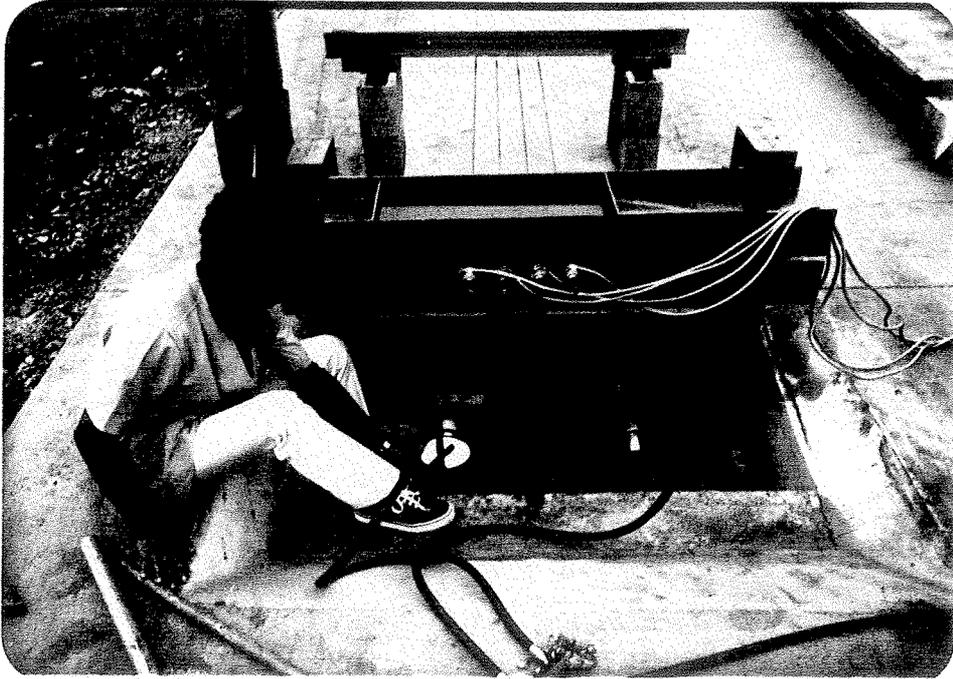


Foto 6.5 - Detalhe da cabeceira de desprotensão com as células de carga e macacos de desprotensão

As fotos 6.4 e 6.5 mostram maiores detalhes das cabeceiras de protensão e desprotensão.

Cada cordoalha foi instrumentada com 3 extensômetros elétricos KYOWA, um em cada fio da cordoalha, num total de 12 extensômetros, para acompanhamento das forças instaladas. Esta instrumentação foi uma operação delicada, devido ao entrelaçamento dos fios das cordoalhas.

O esticamento da primeira cordoalha se deu em 4 etapas de carga, numa tentativa de testar o funcionamento dos extensômetros, que deveriam acusar deformações previstas conforme o diagrama tensão x deformação do aço, já que a força efetivamente aplicada era registrada pelas células de carga. O acompanhamento das deformações era feito através do indicador de deformações TRANSDUTEC, acoplado a uma caixa seletora HUGGENBERGER de 12 canais, após cada etapa de carga.

A foto 6.6 mostra em detalhe a instrumentação das cordoalhas e a foto 6.7 uma vista das cordoalhas esticadas na pista de protensão.

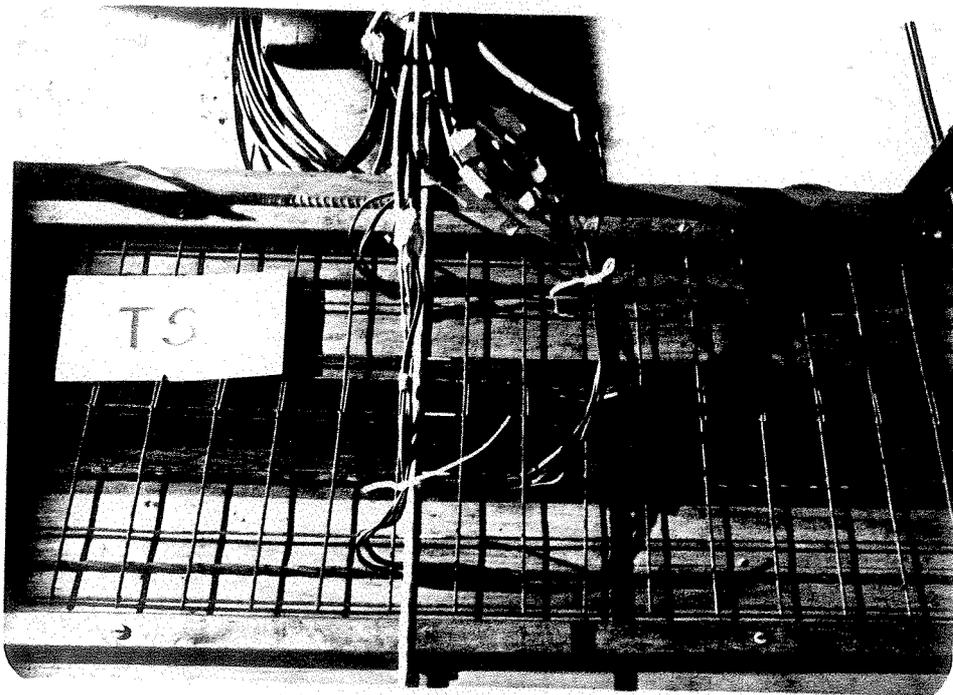


Foto 6.6 - Extensômetros elétricos na cordoalha

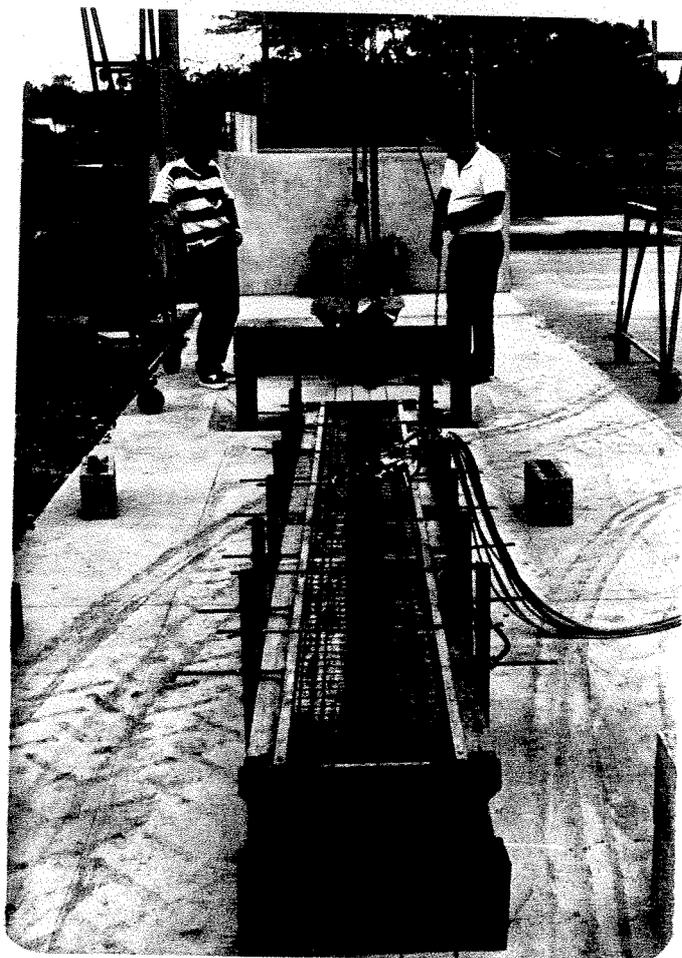


Foto 6.7 - Vista das cordoalhas esticadas na pista

As deformações em todas as cordoalhas esticadas foram medidas em várias fases: antes e após o estiramento, antes e após o estiramento da próxima cordoalha, antes e após o próximo encunhamento, e finalmente em intervalos regulares, até o início do ensaio. O objetivo principal desse procedimento era o cálculo das perdas de protensão devidas ao encunhamento, deformações dos perfis e relaxação das cordoalhas.

Após a pré-tração das cordoalhas e o ajuste final das armaduras, a peça foi moldada. Os materiais da argamassa foram medidos em massa e misturados em betoneira. Paralelamente à moldagem dos modelos, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, ensaiados com 1 dia, 4 dias, e no dia do ensaio.

A vibração foi feita com dois motovibradores WEILER de 3600 RPM e 0,75W, posicionados junto à mesa comprimida, na parte inferior do modelo. Por este motivo foi necessário que a peça na pista ficasse apoiada em suportes de madeira, elevada a 40 cm do chão. A foto 6.8 mostra a peça moldada na pista.

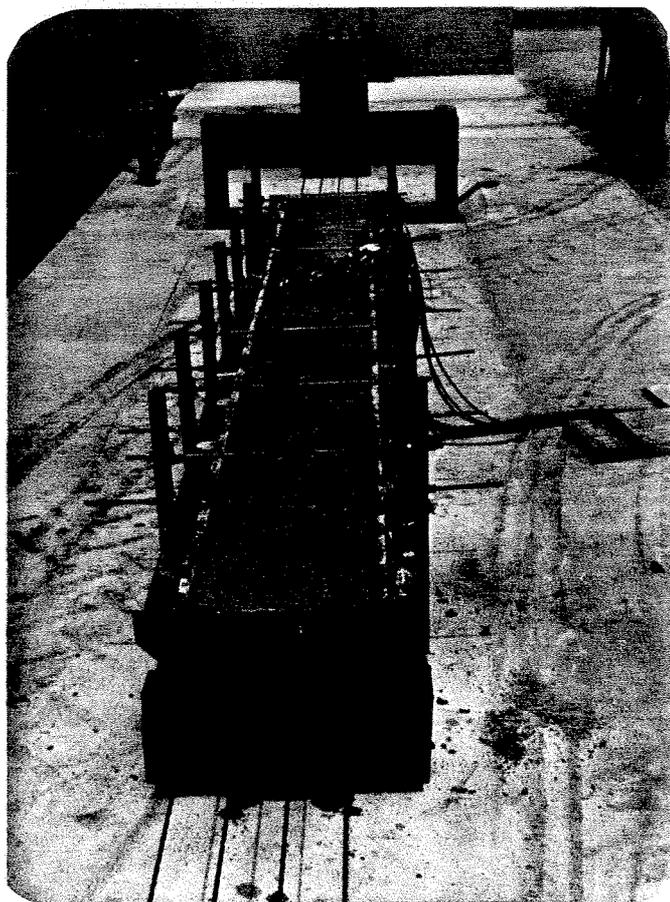


Foto 6.8 - Vista do modelo já moldado

A cura dos modelos foi feita com cobertura da mesa tracionada (parte superior), por espumas de borracha permanentemente molhadas por 3 dias, quando então a armadura era desprotendida e a peça desformada.

A liberação da protensão e a conseqüente transferência do esforço à argamassa aos 4 dias, quando a resistência média à compressão era da ordem de 30MPa, foi feita com o auxílio de dois macacos hidráulicos, com capacidade de 200kN. Para facilitar a desprotensão, os pórticos de reação não foram engastados nos blocos das cabeceiras. O apoio inferior se deu com calços (perfis metálicos), que na cabeceira da ancoragem passiva tinham prolongamentos com roscas. Desta forma, com os macacos posicionados junto aos calços, estes foram retirados (encurtando os prolongamentos), transferindo os esforços aos macacos, que procediam então a desprotensão lentamente. Neste momento as fôrmas já estavam parcialmente liberadas, para permitir a deformação do modelo sem interferências.

Após o corte das cordoalhas e a desforma completa, a peça foi içada por um pórtico rolante e levada até o local do ensaio, através de dois ganchos posicionados na parte central da viga. As fotos 6.9 e 6.10 mostram o aspecto do pórtico na cabeceira de desprotensão após a liberação das cordoalhas e a operação de corte das cordoalhas.

## 6.6. ENSAIOS

Os modelos foram ensaiados com a mesa tracionada virada para cima, para melhor visualização das fissuras no acompanhamento do ensaio. Desta forma, as cargas foram aplicadas de baixo para cima, através de dois macacos hidráulicos de 200kN, apoiados sobre blocos de concreto (ligados a uma laje de reação), distantes 1,5 m dos centros dos apoios.

O modelos estavam apoiados em dois pórticos metálicos, cujas barras atirantadas transferem o esforço de tração a que ficam submetidos à laje de reação.

Para o controle do valor das cargas aplicadas, foram posicionadas duas células de carga junto aos macacos, com

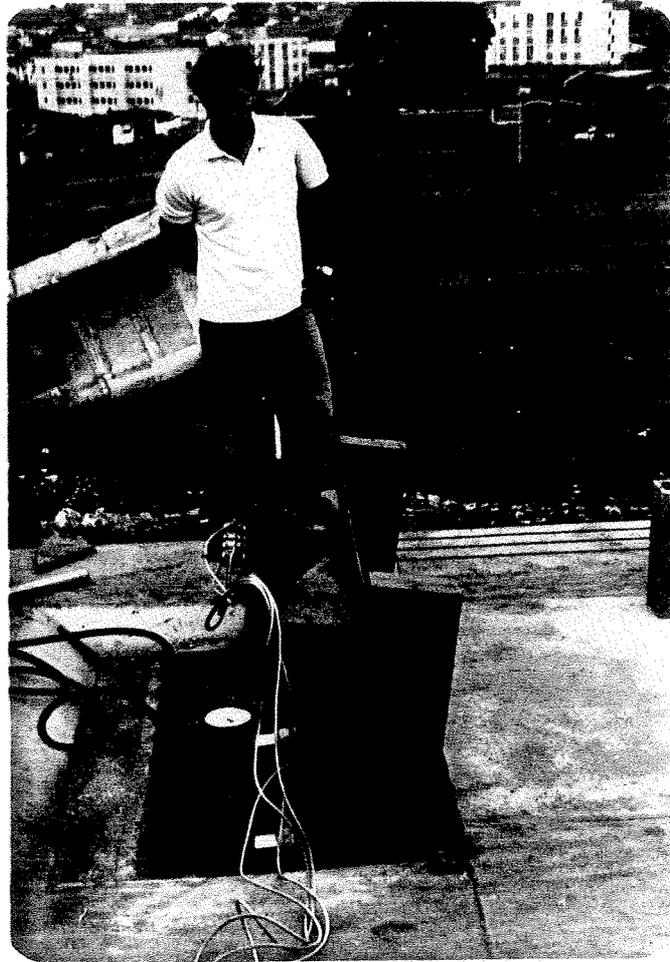


Foto 6.9 - Pórtico da cabeceira de desprotensão após a liberação das cordoalhas

capacidade de 25 kN, ligadas a um sistema de aquisição de dados, que forneceu também os valores das deformações dos 12 extensômetros elétricos das cordoalhas, a cada incremento de carga (que foi da ordem de 1/10 da carga última prevista).

Os deslocamentos foram medidos por defletômetros mecânicos MITUTOYO, com sensibilidade de 0,01mm e curso total de 50,0mm. Foram cinco aparelhos posicionados no alinhamento dos apoios (D1 e D5), a 50mm dos pontos de aplicação das cargas (D2 e D4) e no centro geométrico (D3), sempre referidos ao eixo longitudinal, conforme mostra a figura 6.10. As fotos 6.11 e 6.12 mostram os equipamentos componentes do sistema de aquisição de dados e um aspecto geral da execução do ensaio, onde se vêem os blocos de concreto, o pórtico metálico e os macacos hidráulicos.



Foto 6.10 - Corte das cordoalhas

Além das deformações das cordoalhas, foram medidas as deformações na argamassa nas mesas tracionada e comprimida, com 5 extensômetros mecânicos HUGGENBERGER, de sensibilidade de 0,001mm, apoiados em bases de 100mm coladas nas mesas no meio de vão, cujas posições são indicadas na figura 6.10. Na mesa comprimida foram colados ainda dois extensômetros elétricos KYOWA.

A abertura das fissuras foi medida usando-se uma lupa comparadora MITUTOYO, com graduação até 0,16 mm. A partir daí, utilizava-se régua comparadora do LNEC. A abertura das fissuras foi medida após cada incremento de carga, depois do aparecimento da primeira fissura visível, escolhendo-se algumas fissuras da parte central e das extremidades para acompanhamento.



Foto 6.11 - Vista geral de sistema de aquisição de dados.

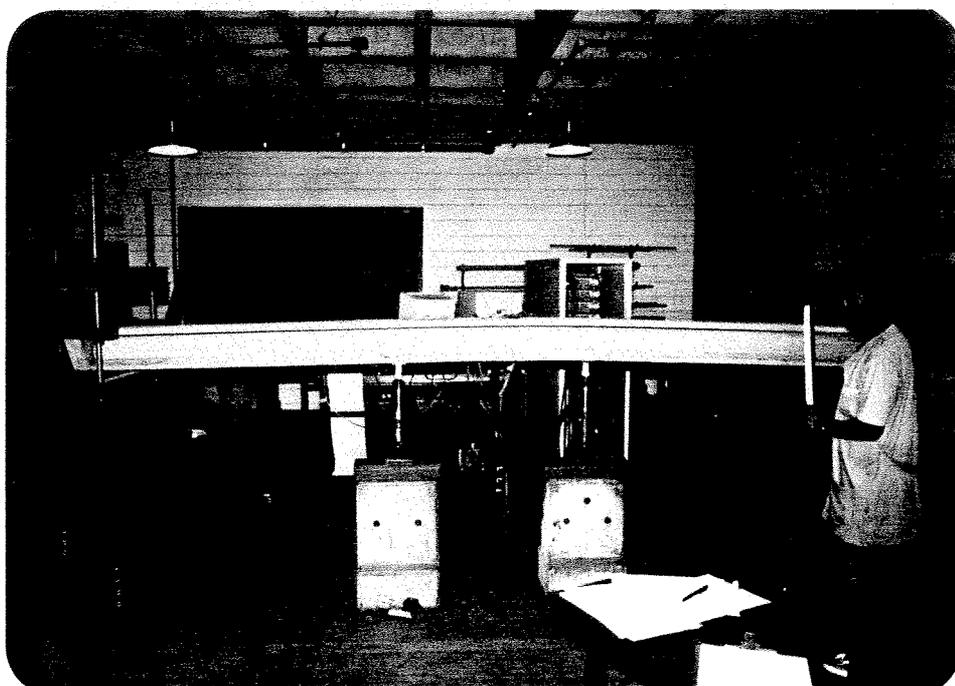
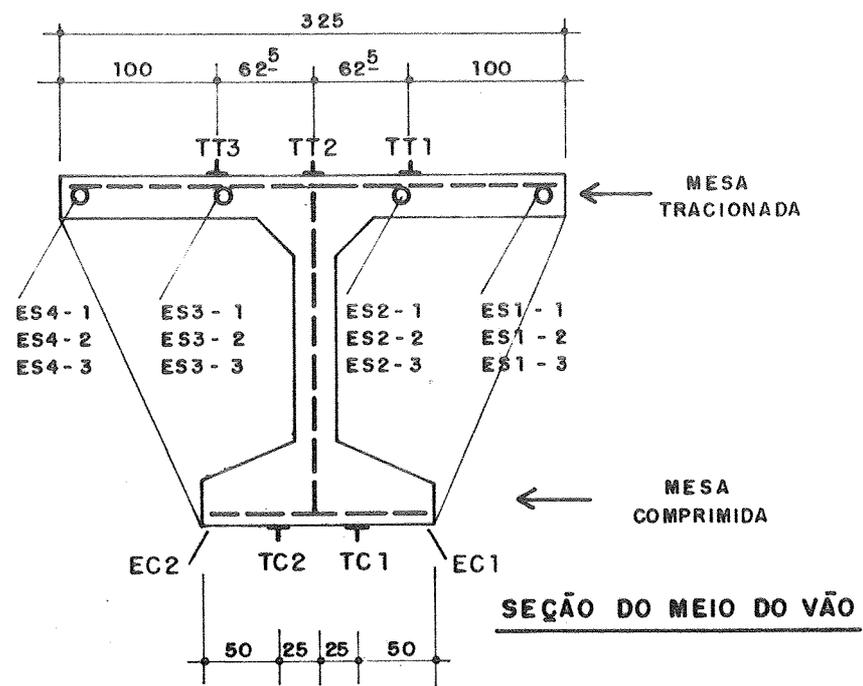
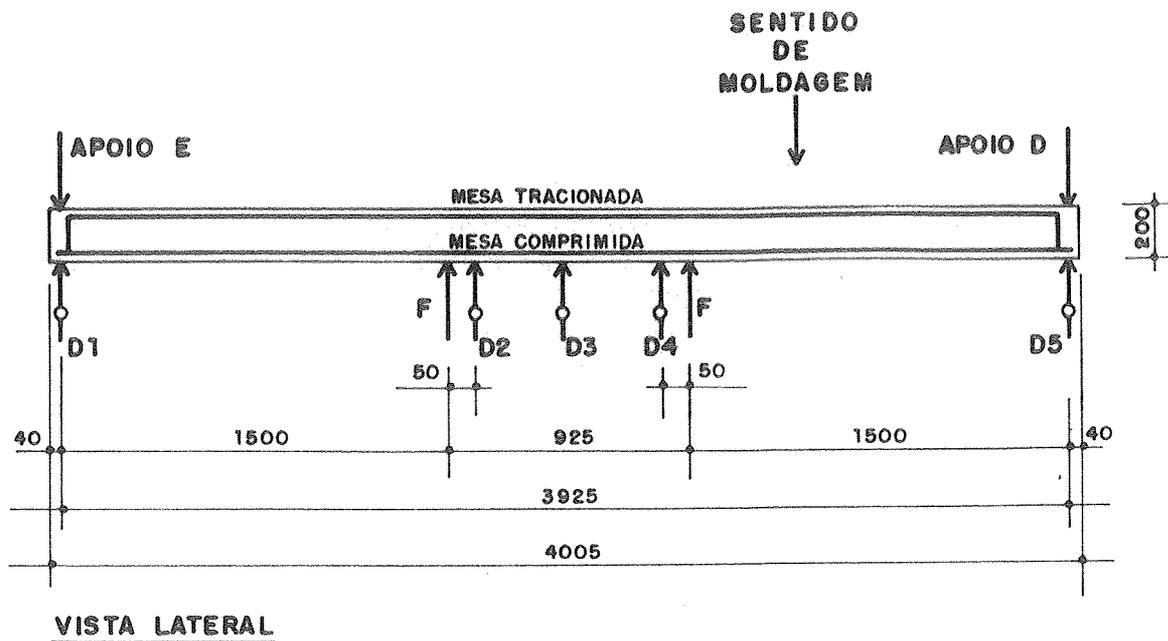


Foto 6.12 - Vista do pórtico metálico, dos blocos de concreto e dos macacos hidráulicos



**LEGENDA**

- ES** - EXTENSÔMETRO ELÉTRICO NA ARMADURA DE PROTENSÃO (3 POR CORDOALHA)
- EC** - EXTENSÔMETRO ELÉTRICO NA MESA COMPRIMIDA
- TT** - EXTENSÔMETRO MECÂNICO INSTALADO NA MESA TRACIONADA
- TC** - EXTENSÔMETRO MECÂNICO INSTALADO NA MESA COMPRIMIDA

Fig.6.10 - Esquema das carga e da instrumentação

## 6.7. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os principais resultados experimentais obtidos são apresentados a seguir. Na primeira página, na etapa de execução da protensão, mostra-se a tabela e o gráfico das forças medidas nas células de carga em cada etapa.

Na segunda página estão os resultados dos ensaios de resistência à tração e compressão dos corpos-de-prova de argamassa, efetuados a 1 dia, 4 dias e no dia do ensaio, além do diagrama tensão x deformação dos dois corpos-de-prova instrumentados.

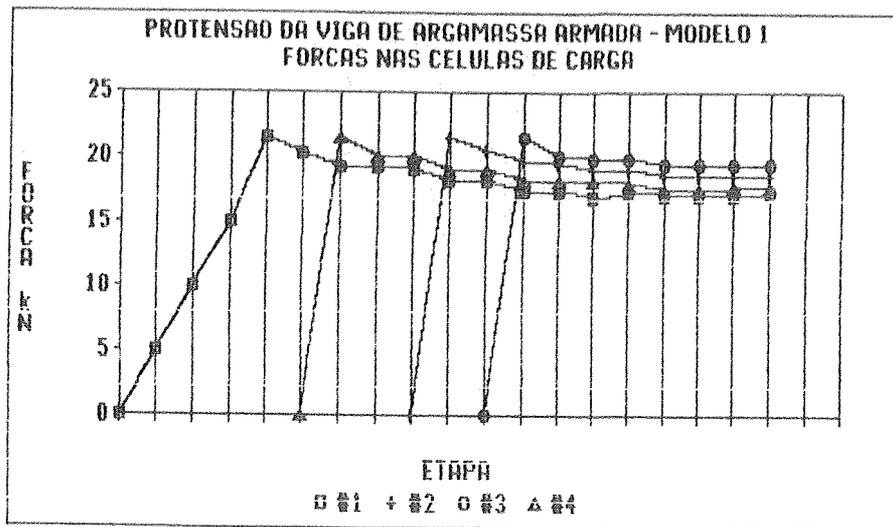
Na terceira página apresentam-se os deslocamentos absolutos medidos nos defletômetros D2, D3 e D4 em cada etapa de carga. Ao lado, mostram-se os deslocamentos teóricos (a), calculados conforme se indica no item 6.8.2.2. Na mesma página, o diagrama força x deslocamento absoluto observado nos ensaios com os mesmos defletômetros.

Na quarta página, o diagrama força x deslocamento dos valores teóricos e experimentais plotados num mesmo gráfico.

Na quinta página, constam as deformações indicadas pelos extensômetros mecânicos posicionados na argamassa na borda tracionada (ET1, ET2 e ET3) e na borda comprimida (EC1 e EC2), em cada etapa de carga, com o respectivo diagrama força x deformação.

Na sexta página estão os resultados fornecidos pelo sistema de aquisição de dados, constando as forças efetivamente aplicadas pelos macacos hidráulicos ( $F_1$  e  $F_2$ ), as deformações nos 12 extensômetros elétricos das cordoalhas ( $EP_i$ ) e as deformações nos extensômetros elétricos da borda comprimida de argamassa ( $EC_1$  e  $EC_2$ ), para cada etapa de carga.

Nas três páginas seguintes (7,8 e 9), mostram-se os diagramas força x deformação fornecidos pelo sistema para os extensômetros de duas das quatro cordoalhas (as outras duas têm resultados semelhantes), sendo um gráfico para cada leitura de força em cada macaco hidráulico; e para os extensômetros na borda comprimida da argamassa, de acordo com as tabelas anteriores. Para o modelo 2, a apresentação posterior é igual.



-----  
**PROTENSÃO DA VIGA DE ARGAMASSA ARMADA - MODELO 1**  
 -----

Etapa	Data	Hora	Forças nas células de carga (kN)					
			Cord. Prot.	Cord. ancor.	1	2	3	4
0					0			
1	06/12				4.99			
2					9.98			
3					14.97			
4			#1		21.37			
5				#1	20.18			0
6			#4		19.19			21.37
7				#4	19.14			20.00
8					19.02		0	19.95
9			#2		18.17	21.37		19.02
10				#2	18.08	20.34	0	19.00
11			#3		17.35	19.61	21.38	18.16
12				#3	17.28	19.44	19.96	18.07
13					16.82	19.02	19.69	18.09
14		16:45			17.20	18.90	19.71	17.92
15	07/12	08:25			17.08	18.48	19.32	17.48
16		11:17			17.01	18.46	19.27	17.50
17		14:02			17.03	18.58	19.37	17.65
18	10/12	09:20			17.35	18.60	19.32	17.65
19		10:50						
20								

-----

CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA

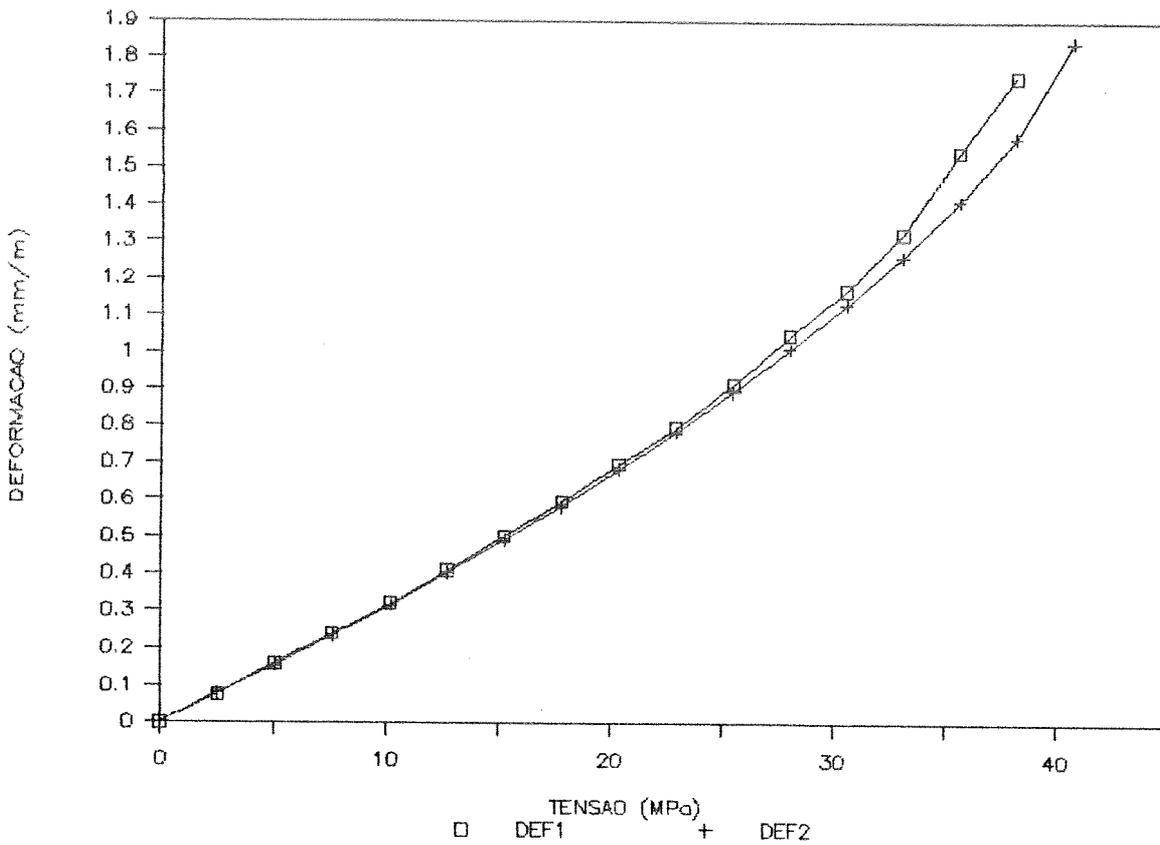
RESISTENCIA A COMPRESSAO (MPa)

IDADE	1 DIA	4 DIAS	7 DIAS
	22.5	38.1	43.9
	23.4	44.4	43.9
		38.8	40.7
			40.6
			39.0
			42.0
MEDIA	23.0	40.4	42.9

RESISTENCIA A TRACAO (MPa)

IDADE	1 DIA	4 DIAS	6 DIAS
		3.4	4.5
		3.8	4.0
			4.2
MEDIA		3.6	4.2

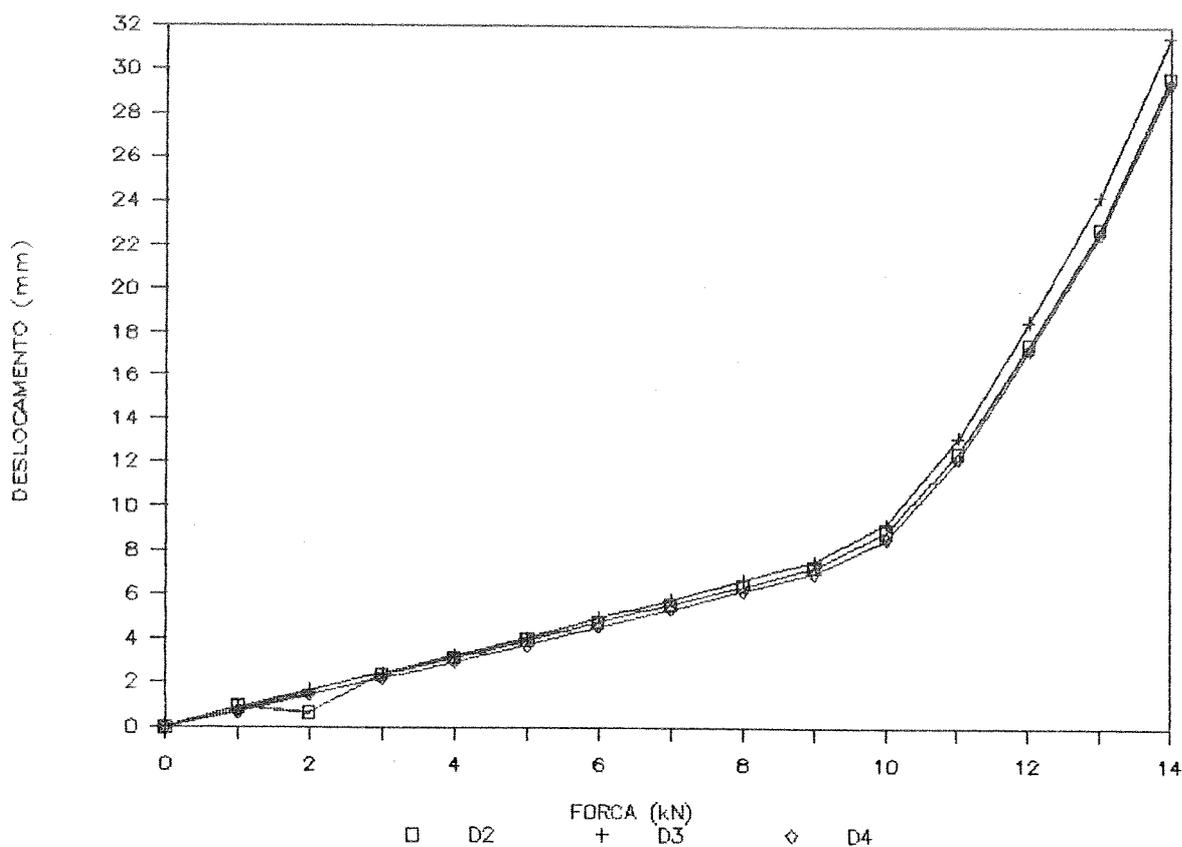
DIAGRAMAS TENSAO - DEFORMACAO



FORÇA (kN)	I <sub>eq</sub> (cm <sup>4</sup> )	a (mm)	ETAPA	FORÇA (kN)	D2	D3	D4
0.0	8200	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
1.0	8200	0.91	1	1.0	0.90	0.70	0.66
2.0	8200	1.83	2	2.0	0.64	1.64	1.42
1.0	8200	0.91	1	1.0	0.96	0.80	0.74
2.0	8200	1.83	2	2.0	0.66	1.67	1.46
3.0	8200	2.74	3	3.0	2.39	2.45	2.19
4.0	8200	3.66	4	4.0	3.17	3.27	2.97
5.0	8200	4.57	5	5.0	3.95	4.06	3.72
6.0	8200	5.49	6	6.0	4.78	4.96	4.57
7.0	8200	6.40	7	7.0	5.56	5.79	5.35
8.0	8200	7.32	8	8.0	6.42	6.68	6.19
9.0	8200	8.23	9	9.0	7.24	7.53	7.00
10.0	7240	12.19	10	10.0	8.88	9.27	8.55
11.0	5730	16.94	11	11.0	12.49	13.22	12.23
12.0	4810	22.01	12	12.0	17.48	18.56	17.22
13.0	4100	27.98	13	13.0	22.79	24.21	22.55
14.0	3570	34.60	14	14.0	29.68	31.48	29.38

RUPTURA POR FLEXÃO Fu=15.0 kN

## DIAGRAMAS DESLOCAMENTO – FORÇA

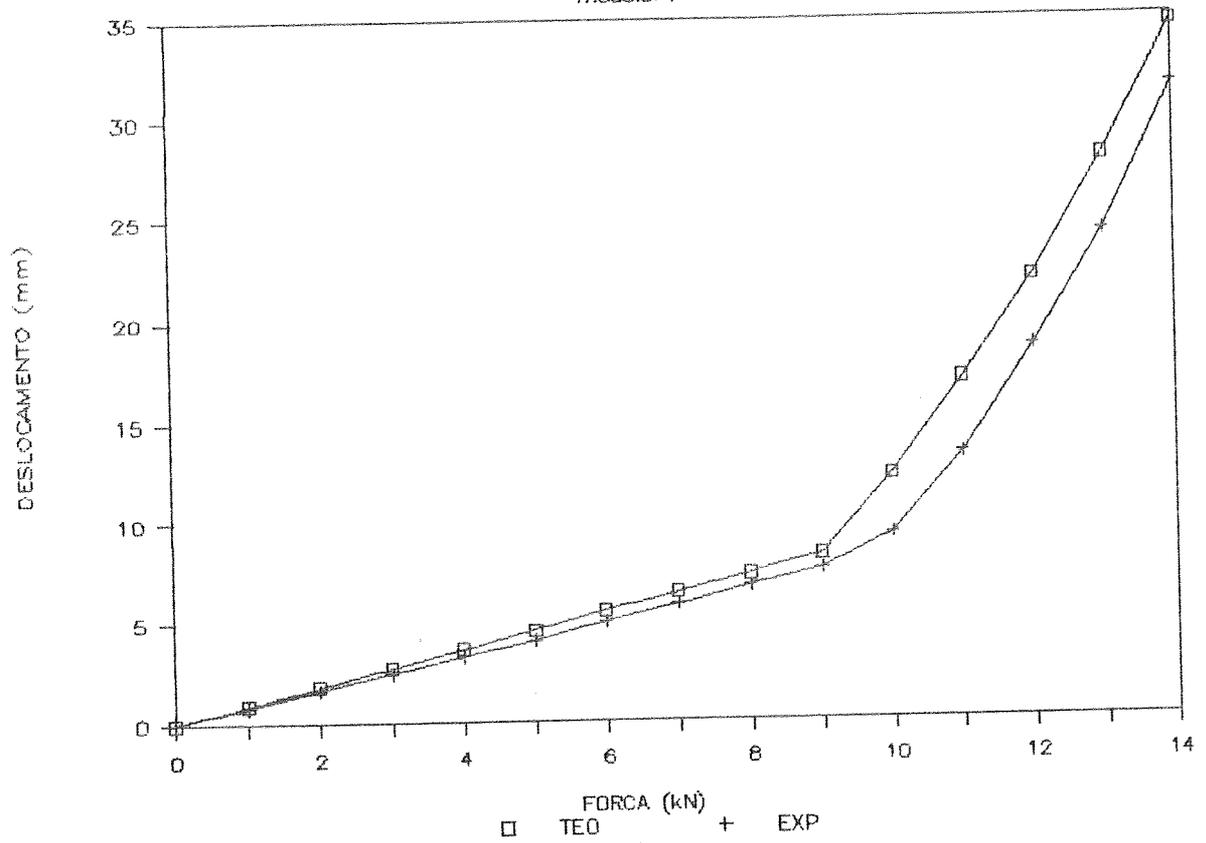


página 3

MODELO 1 - Deslocamentos absolutos: valores teóricos e experimentais e diagrama força-deslocamento

# DIAGRAMAS DESLOCAMENTO – FORÇA

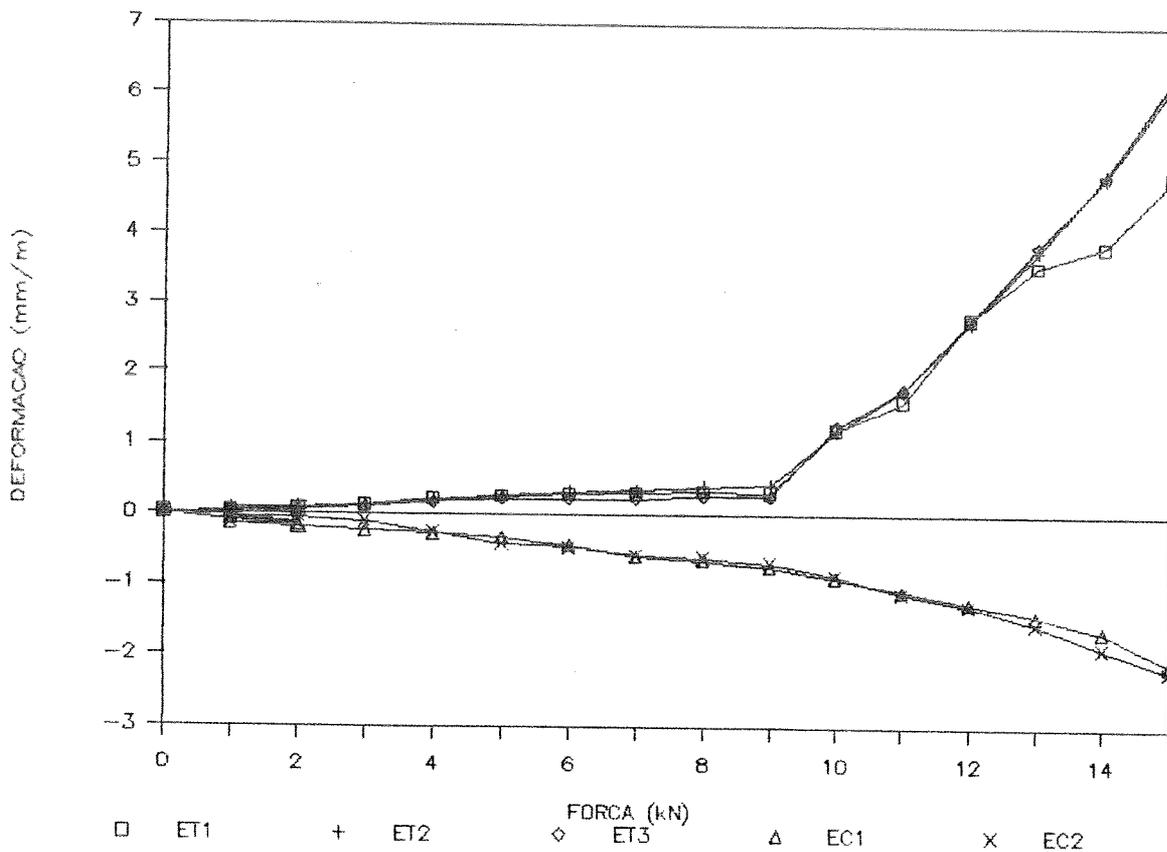
modelo 1



DEFORMAÇÕES NA ARGAMASSA - EXTENSÔMETROS MECÂNICOS  
(mm/m)

ETAPA	FORÇA(KN)	ET1	ET2	ET3	EC1	EC2
0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	1.0	0.01	0.01	-0.02	-0.10	-0.10
2	2.0	0.07	0.07	0.04	-0.17	-0.14
1	1.0	0.03	0.07	0.04	-0.15	-0.06
2	2.0	0.04	0.08	0.05	-0.20	-0.06
3	3.0	0.11	0.12	0.09	-0.24	-0.12
4	4.0	0.21	0.19	0.16	-0.28	-0.26
5	5.0	0.24	0.26	0.21	-0.33	-0.42
6	6.0	0.28	0.31	0.21	-0.44	-0.47
7	7.0	0.29	0.33	0.21	-0.60	-0.59
8	8.0	0.32	0.38	0.26	-0.65	-0.62
9	9.0	0.31	0.41	0.26	-0.75	-0.69
10	10.0	1.21	1.19	1.25	-0.90	-0.87
11	11.0	1.61	1.77	1.78	-1.09	-1.12
12	12.0	2.81	2.77	2.80	-1.25	-1.29
13	13.0	3.56	3.77	3.84	-1.43	-1.54
14	14.0	3.84	4.88	4.84	-1.65	-1.88
15	15.0	4.83	6.26	6.17	-2.10	-2.19

DIAGRAMAS DEFORMAÇÃO — FORÇA

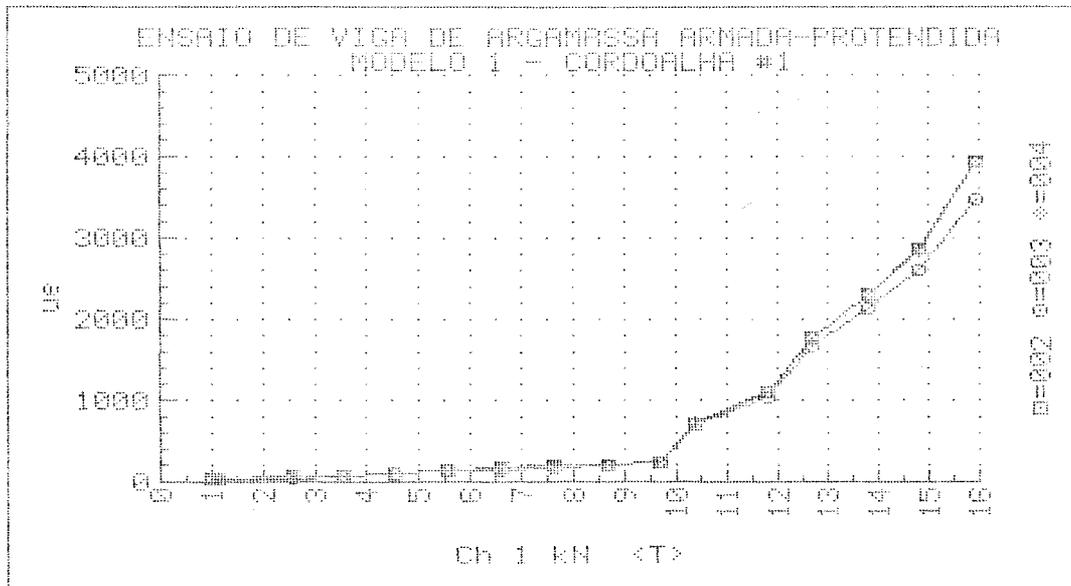


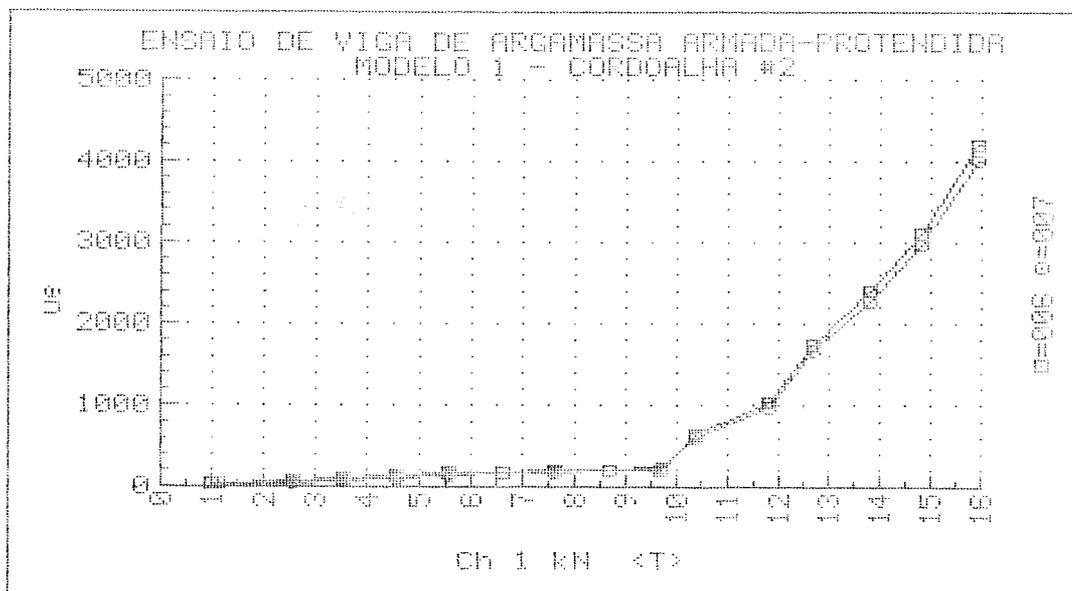
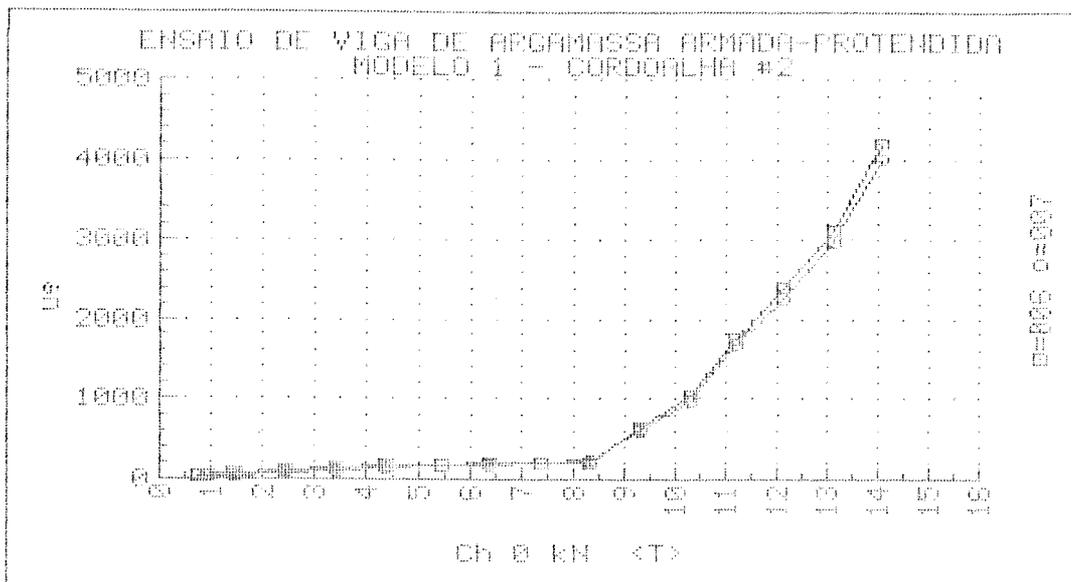
ENSAIO DE VIGA DE ARGAMASSA ARMADA (TELA SOLDADA) PROTENDIDA - 13/12/90

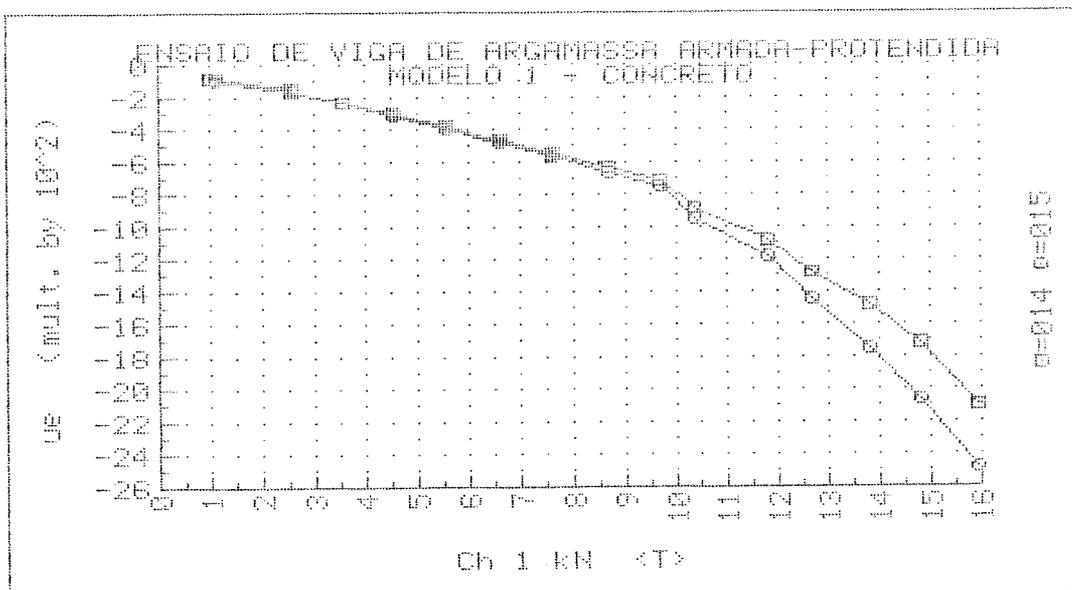
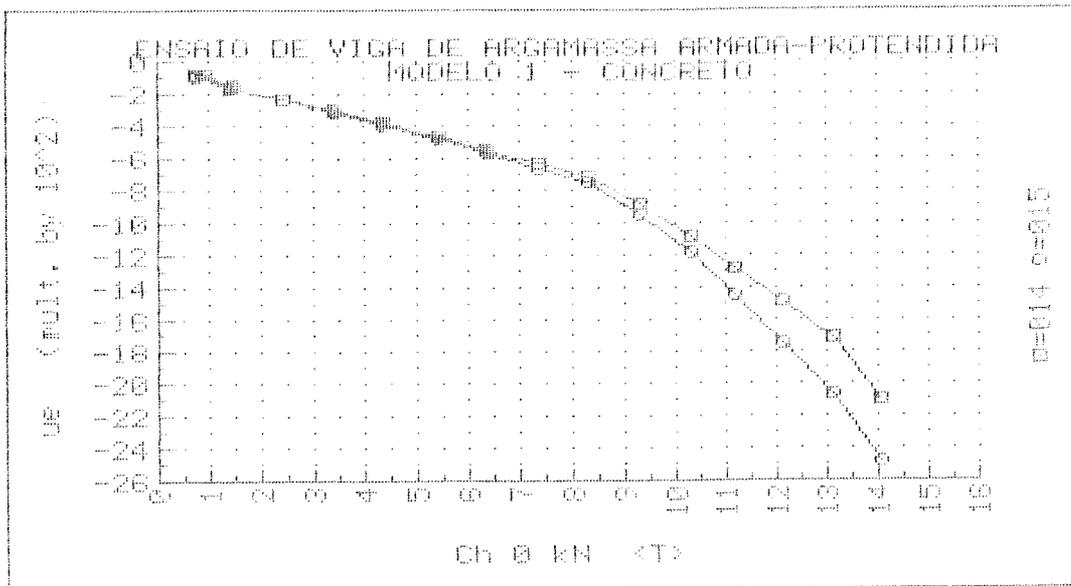
F <sub>1</sub> (kN)	F <sub>2</sub> (kN)	EP <sub>1</sub> (µε)	EP <sub>2</sub> (µε)	EP <sub>3</sub> (µε)	EP <sub>4</sub> (µε)	EP <sub>5</sub> (µε)	EP <sub>6</sub> (µε)	EP <sub>7</sub> (µε)	EP <sub>8</sub> (µε)	EP <sub>9</sub> (µε)	EP <sub>10</sub> (µε)	EP <sub>11</sub> (µε)	EP <sub>12</sub> (µε)
0.92	1.03	25.	23.	25.	-1074.	27.	23.	25.	22.	23.	26.	23.	26.
1.52	2.56	53.	40.	52.	-1910.	58.	48.	53.	45.	47.	55.	49.	56.
0.73	1.13	26.	23.	26.	-1453.	44.	22.	24.	21.	21.	25.	22.	25.
1.47	2.54	53.	40.	52.	-1373.	72.	47.	51.	45.	46.	54.	49.	55.
2.44	3.54	79.	71.	78.	-1173.	97.	72.	79.	68.	71.	83.	77.	83.
3.46	4.57	106.	97.	105.	-1302.	125.	98.	108.	94.	98.	113.	103.	114.
4.36	5.58	132.	119.	130.	-793.	151.	123.	134.	117.	121.	141.	131.	143.
5.43	6.61	161.	146.	157.	-808.	180.	156.	165.	144.	149.	172.	159.	174.
6.39	7.63	186.	169.	181.	0/5+	194.	176.	2035.	169.	175.	203.	167.	205.
7.41	8.66	216.	195.	210.	0/5+	203.	203.	1997.	196.	204.	234.	217.	238.
8.31	9.67	244.	221.	237.	0/5+	214.	230.	2025.	223.	231.	265.	247.	270.
9.29	10.40	712.	685.	726.	-626.	625.	601.	769.	669.	687.	909.	863.	920.
10.34	11.83	1091.	1041.	1106.	-647.	1032.	989.	1136.	976.	1017.	1296.	1225.	1311.
11.20	12.71	1769.	1658.	1780.	-645.	1745.	1657.	1702.	1457.	1522.	1731.	1638.	1765.
12.12	13.80	2311.	2139.	2309.	-264.	2386.	2273.	2371.	1949.	2049.	2110.	1998.	2181.
13.14	14.83	2861.	2616.	2849.	-355.	3105.	2956.	3272.	2607.	2764.	3239.	3038.	3345.
14.06	15.96	3940.	3477.	3950.	-180.	4213.	3924.	4380.	3439.	3681.	4216.	3976.	4376.
11.09	7.63	4957.	4095.	5194.	-317.	4154.	3821.	4208.	3150.	3433.	1068.	938.	1285.
F <sub>1</sub> (kN)	F <sub>2</sub> (kN)	EC <sub>1</sub> (µε)	EC <sub>2</sub> (µε)										
0.92	1.03	-75.	-80.										
1.52	2.56	-155.	-164.										
0.73	1.13	-88.	-92.										
1.47	2.54	-159.	-167.										
2.44	3.54	-229.	-241.										
3.46	4.57	-306.	-322.										
4.36	5.58	-380.	-399.										
5.43	6.61	-463.	-488.										
6.39	7.63	-544.	-575.										
7.41	8.66	-628.	-667.										
8.31	9.67	-711.	-757.										
9.29	10.40	-877.	-948.										
10.34	11.83	-1076.	-1190.										
11.20	12.71	-1276.	-1443.										
12.12	13.80	-1481.	-1742.										
13.14	14.83	-1724.	-2061.										
14.06	15.96	-2097.	-2463.										
11.09	7.63	-1465.	-2469.										

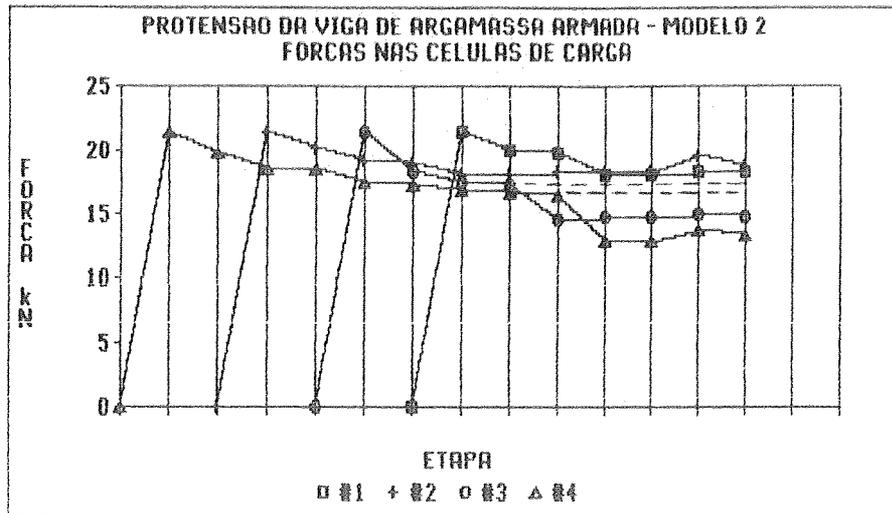
página 6

MODELO 1 - Forças nos macacos e deformações nos 12 extensômetros elétricos nas cordoalhas (EP<sub>i</sub>) e nos dois extensômetros na argamassa comprimida (EC1 e EC2)









-----  
**PROTENSÃO DA VIGA DE ARGAMASSA ARMADA - MODELO 2**  
 -----

Etapa	Data	Hora	Cord. Forças nas células de carga (kN)						
			Prot.	Cord. ancor.	1	2	3	4	
0								0	
1	12/12		#4						21.37
2				#4			0		19.88
3			#2			21.37			18.51
4				#2		20.20		0	18.51
5			#3			19.17	21.38		17.50
6				#3		0	19.05	18.25	17.38
7			#1		21.37	18.12	17.44		16.94
8				#1	19.97	18.14	17.34		16.77
9	13/12	09:00			19.87	18.29	14.55		16.40
10		11:05			18.12	18.29	14.82		12.90
11		16:30			18.15	18.29	14.77		12.90
12	14/12	08:40			18.27	19.63	15.06		13.83
13	18/12	08:40			18.34	18.78	14.74		13.32
14		09:30							
15	19/12	08:30							

-----

CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA

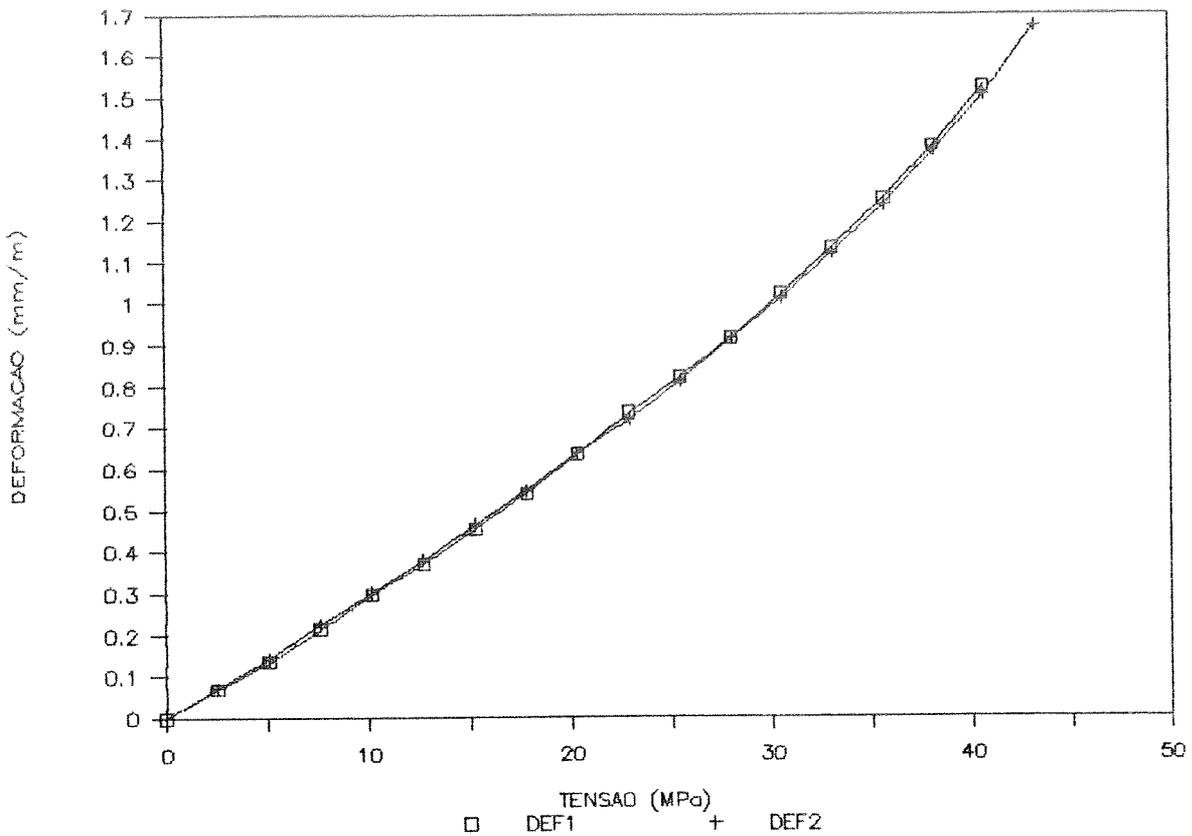
RESISTENCIA A COMPRESSAO (MPa)

IDADE	1 DIA	4 DIAS	6 DIAS
	16.8	37.2	43.2
	17.2	33.7	45.2
	16.4	36.9	45.8
		36.3	43.8
			43.0
MEDIA	16.8	36.0	44.2

RESISTENCIA A TRACAO (MPa)

IDADE	1 DIA	4 DIAS	6 DIAS
	2.0	3.9	4.2
	2.0	3.9	4.0
	2.0	3.4	3.9
		3.8	3.9
			3.4
MEDIA	2.0	3.8	3.9

DIAGRAMAS TENSAO - DEFORMACAO



DESLOCAMENTOS ABSOLUTOS  
(mm)

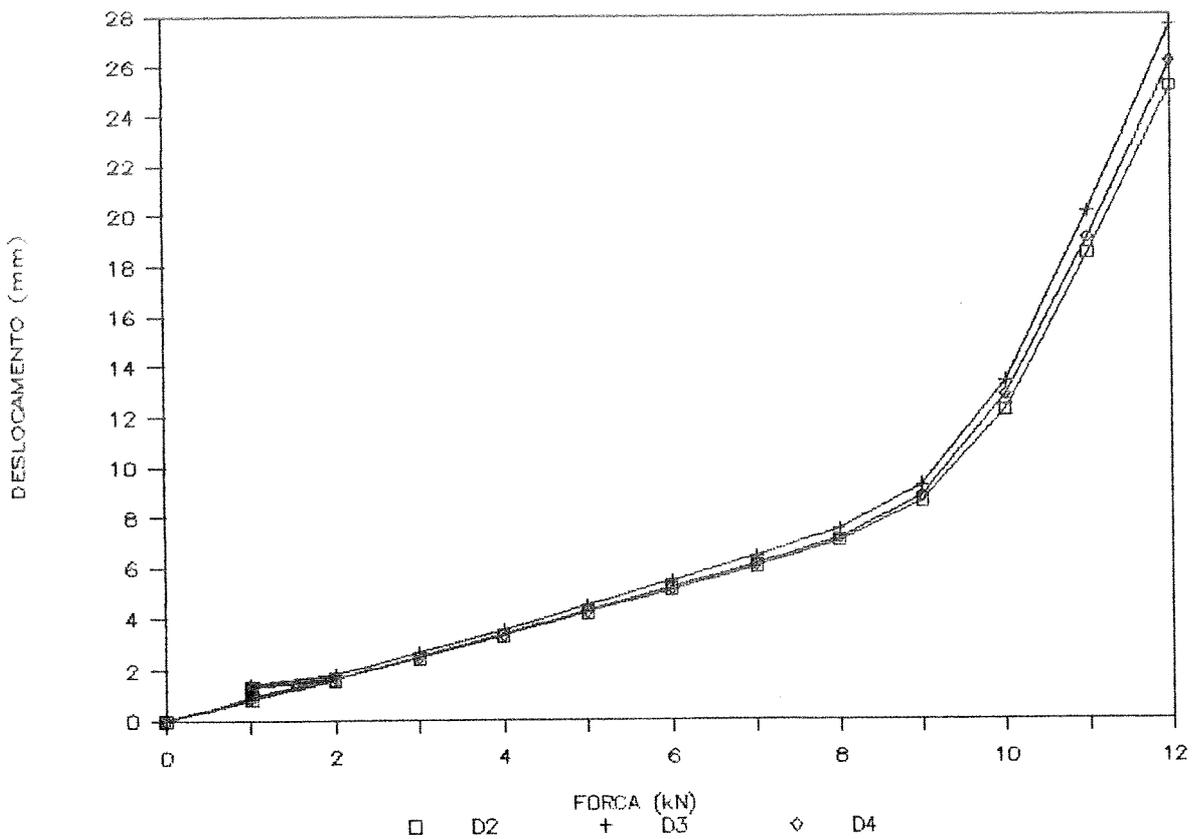
DESLOCAMENTOS TEÓRICOS

FORÇA (kN)	I <sub>eq</sub> (cm <sup>4</sup> )	a (mm)
0.0	8200	0.00
1.0	8200	0.02
2.0	8200	1.65
1.0	8200	0.02
2.0	8200	1.65
3.0	8200	2.47
4.0	8200	3.30
5.0	8200	4.13
6.0	8200	4.96
7.0	8200	5.78
8.0	8200	6.61
9.0	8200	7.44
10.0	8200	8.27
11.0	7400	13.62
12.0	5850	18.41
13.0	4760	23.90

ETAPA	FORÇA (kN)	D2	D3	D4
0	0.0	0.00	0.00	0.00
1	1.0	0.84	0.92	0.87
2	2.0	1.61	1.77	1.66
1	1.0	1.35	1.45	1.39
2	2.0	1.65	1.81	1.69
3	3.0	2.47	2.68	2.52
4	4.0	3.32	3.56	3.36
5	5.0	4.23	4.52	4.30
6	6.0	5.13	5.47	5.20
7	7.0	6.04	6.43	6.11
8	8.0	7.05	7.50	7.14
9	9.0	8.06	8.57	8.19
10	10.0	12.24	13.38	12.83
11	11.0	18.43	20.12	19.07
12	12.0	25.14	27.58	26.11

RUPTURA POR FLEXÃO Fu=13.5 kN

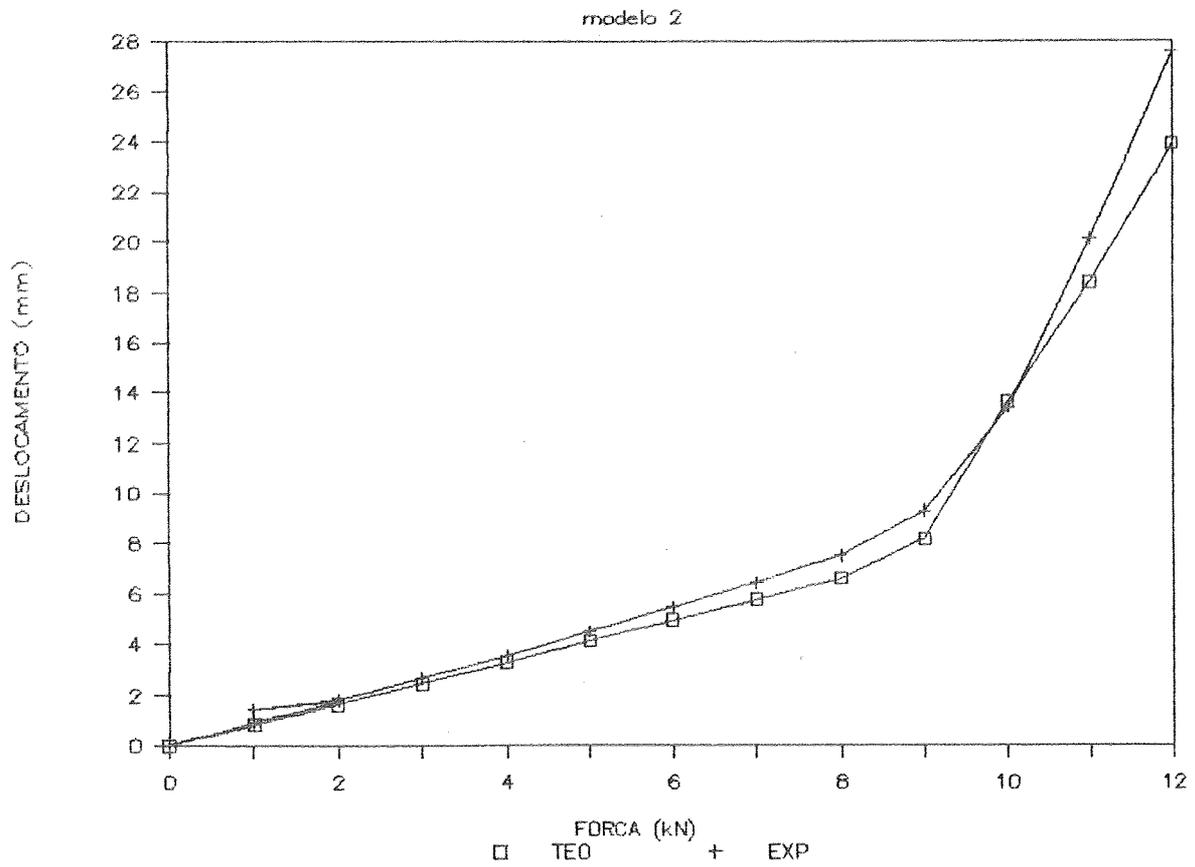
DIAGRAMAS DESLOCAMENTO – FORÇA



página 9

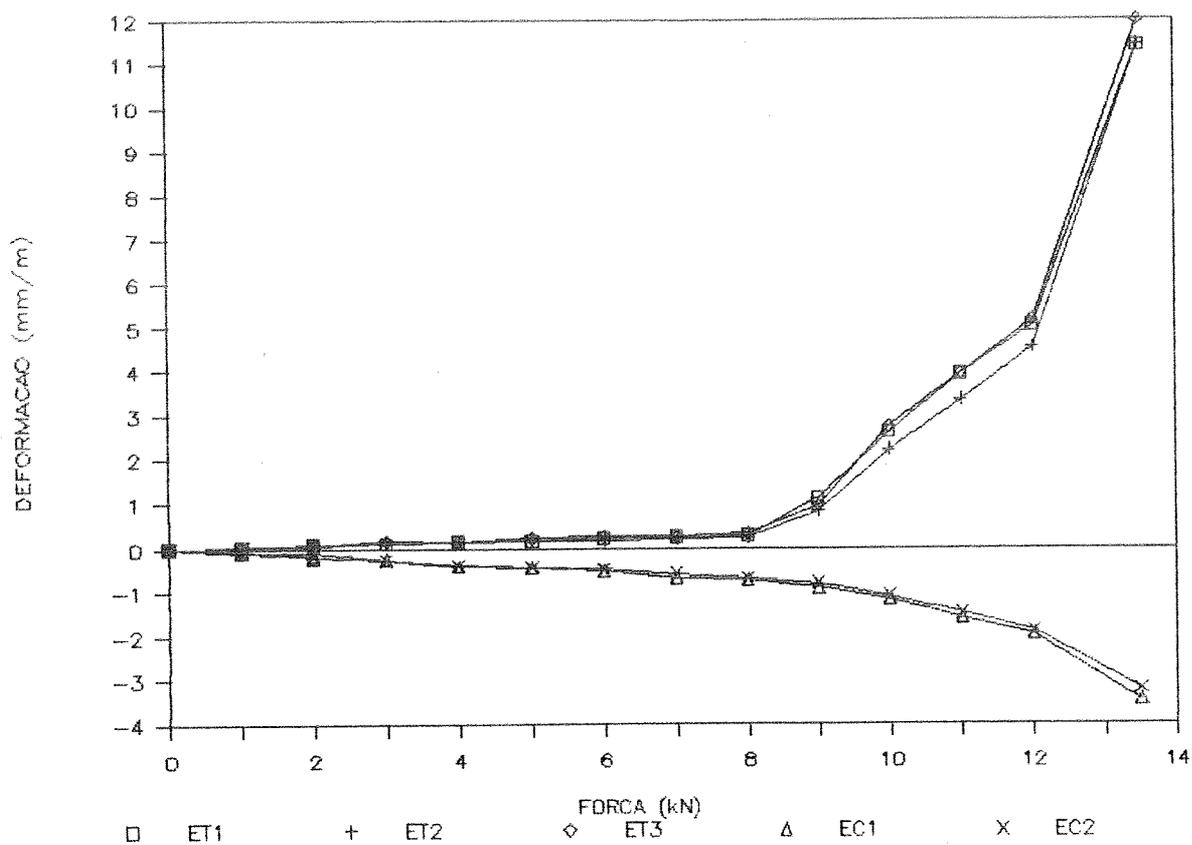
MODELO 2 - Deslocamentos absolutos: valores teóricos e experimentais e diagrama força-deslocamento

## DIAGRAMAS DESLOCAMENTO – FORÇA



ETAPA	FORÇA(KN)	ET1	ET2	ET3	EC1	EC2
0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	1.0	0.04	0.02	0.03	-0.09	-0.08
2	2.0	0.04	-0.02	0.05	-0.15	-0.15
1	1.0	0.03	0.01	0.05	-0.06	-0.09
2	2.0	0.09	0.05	0.06	-0.20	-0.11
3	3.0	0.12	0.13	0.16	-0.24	-0.26
4	4.0	0.15	0.15	0.15	-0.40	-0.39
5	5.0	0.17	0.17	0.23	-0.42	-0.43
6	6.0	0.23	0.19	0.27	-0.50	-0.48
7	7.0	0.24	0.22	0.26	-0.68	-0.58
8	8.0	0.28	0.24	0.32	-0.73	-0.69
9	9.0	1.12	0.83	0.94	-0.91	-0.79
10	10.0	2.61	2.21	2.74	-1.17	-1.11
11	11.0	3.94	3.34	3.95	-1.59	-1.49
12	12.0	5.03	4.53	5.15	-1.96	-1.89
13	13.5	11.40	11.42	11.96	-3.46	-3.20

DIAGRAMAS DEFORMAÇÃO - FORÇA



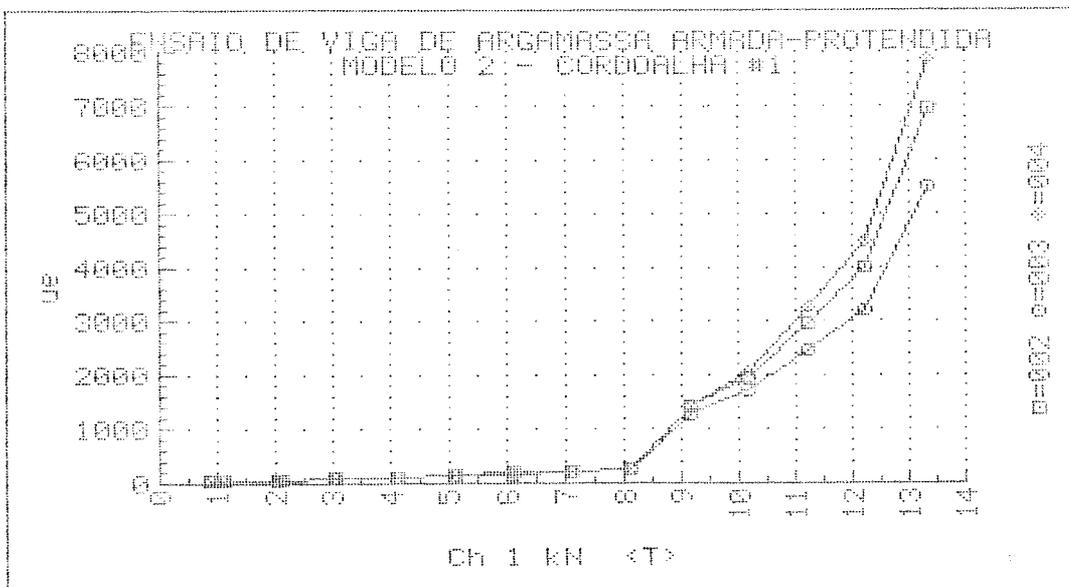
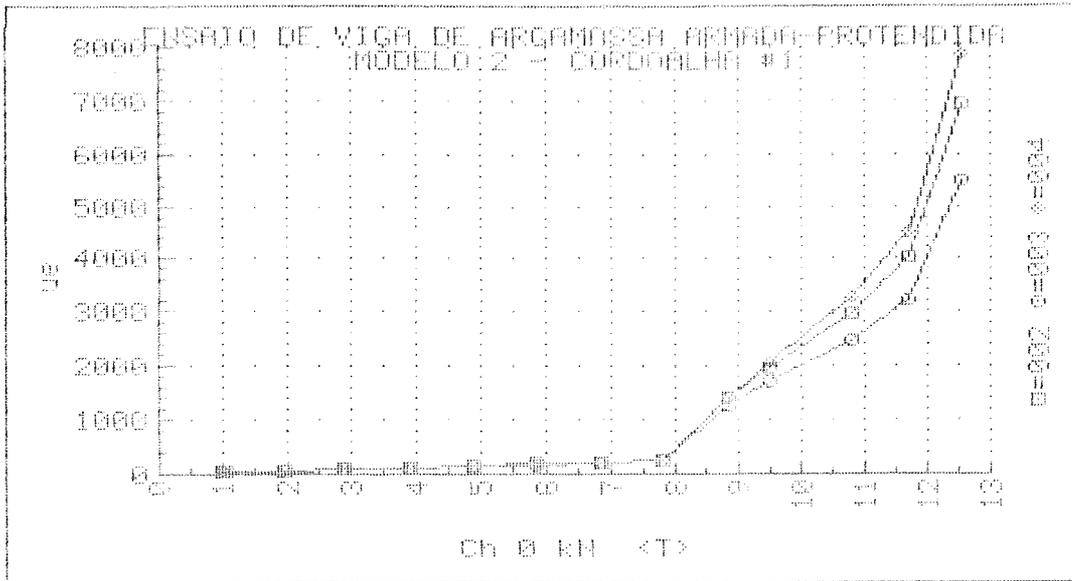
ENSAIO DE VIGA DE ARGAMASSA ARMADA (TELA EXPANDIDA) PROTENDIDA-19/12/90

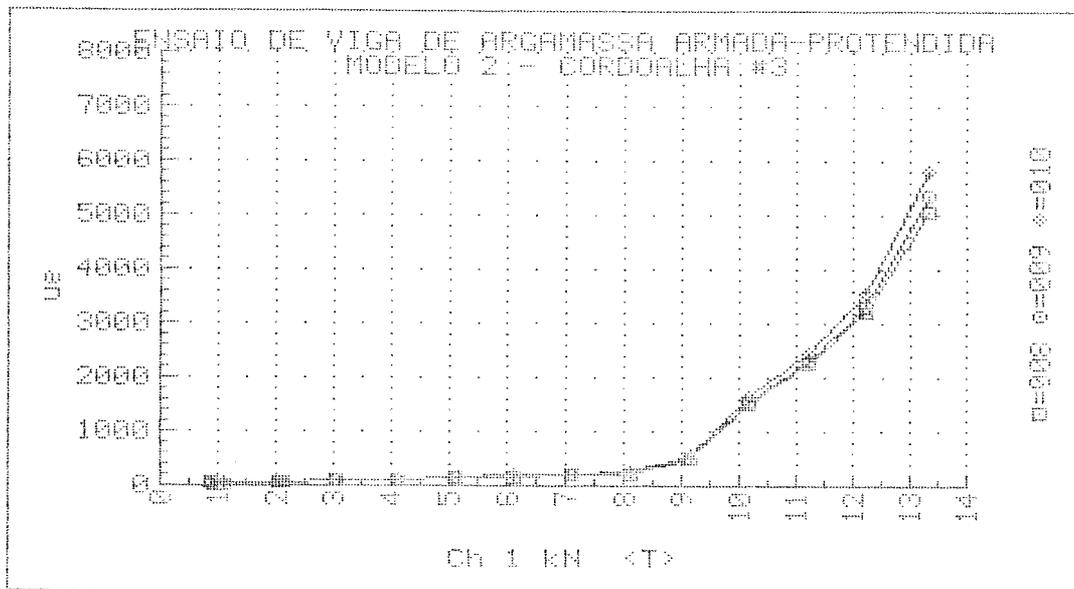
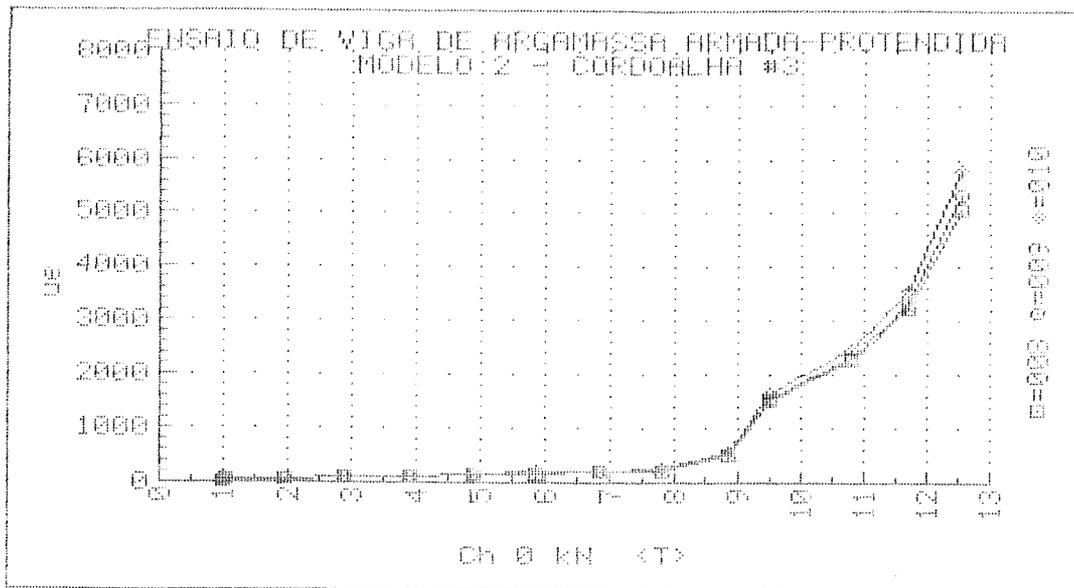
F <sub>1</sub> (kN)	F <sub>2</sub> (kN)	EP <sub>1</sub> (µε)	EP <sub>2</sub> (µε)	EP <sub>3</sub> (µε)	EP <sub>4</sub> (µε)	EP <sub>5</sub> (µε)	EP <sub>6</sub> (µε)	EP <sub>7</sub> (µε)	EP <sub>8</sub> (µε)	EP <sub>9</sub> (µε)	EP <sub>10</sub> (µε)	EP <sub>11</sub> (µε)	EP <sub>12</sub> (µε)
1.00	1.09	30.	28.	27.	27.	27.	-1052.	25.	25.	28.	26.	23.	24.
1.94	2.06	58.	54.	55.	55.	52.	-745.	51.	50.	56.	51.	50.	47.
1.05	0.90	30.	28.	28.	28.	27.	-965.	27.	25.	29.	27.	27.	24.
1.94	2.10	59.	55.	56.	57.	53.	52.	52.	51.	58.	52.	51.	45.
2.91	3.08	88.	81.	83.	83.	79.	40.	77.	77.	86.	80.	76.	69.
3.89	4.09	117.	108.	111.	111.	104.	68.	102.	103.	115.	106.	100.	93.
4.91	5.10	149.	137.	141.	141.	133.	144.	130.	132.	146.	134.	127.	117.
5.86	6.10	186.	166.	170.	169.	160.	161.	156.	159.	175.	162.	152.	141.
6.86	7.13	211.	195.	202.	200.	187.	196.	183.	187.	205.	189.	179.	168.
7.80	8.14	246.	227.	236.	233.	218.	239.	212.	216.	239.	221.	207.	196.
8.83	9.14	1407.	1240.	1410.	779.	738.	823.	481.	475.	529.	261.	229.	216.
9.51	10.15	1961.	1686.	2063.	1373.	1284.	1456.	1497.	1552.	1633.	1559.	1489.	1410.
10.79	11.24	2958.	2453.	3239.	2059.	1975.	2273.	2251.	2323.	2467.	2208.	2050.	1924.
11.69	12.21	4009.	3195.	4505.	3079.	3174.	3560.	3192.	3315.	3559.	3155.	2806.	2619.
12.54	13.34	6974.	5499.	7864.	4908.	5396.	5749.	5026.	5345.	5807.	5015.	4270.	3851.

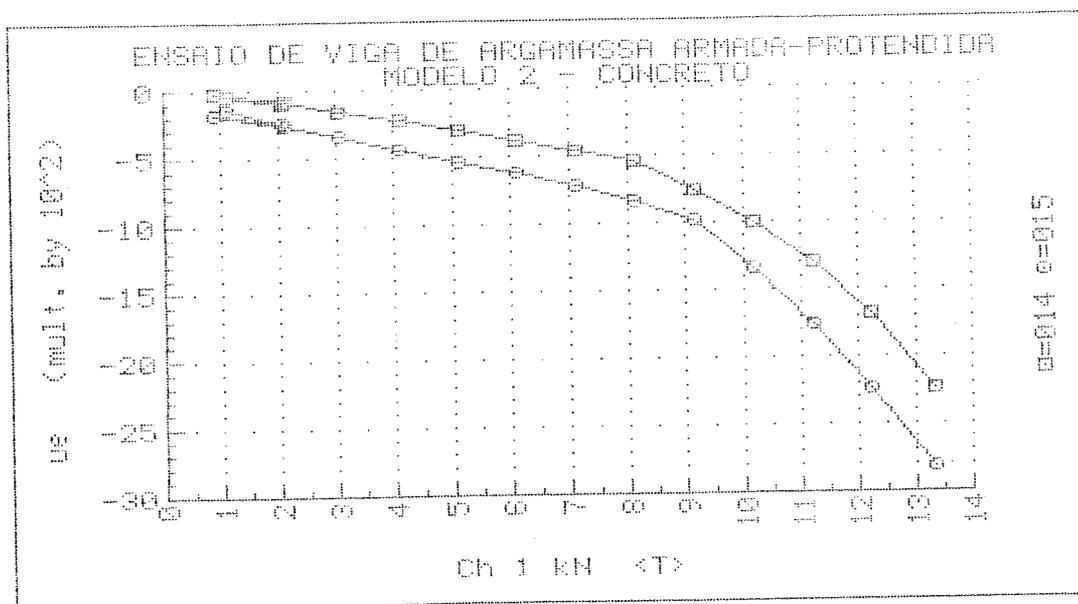
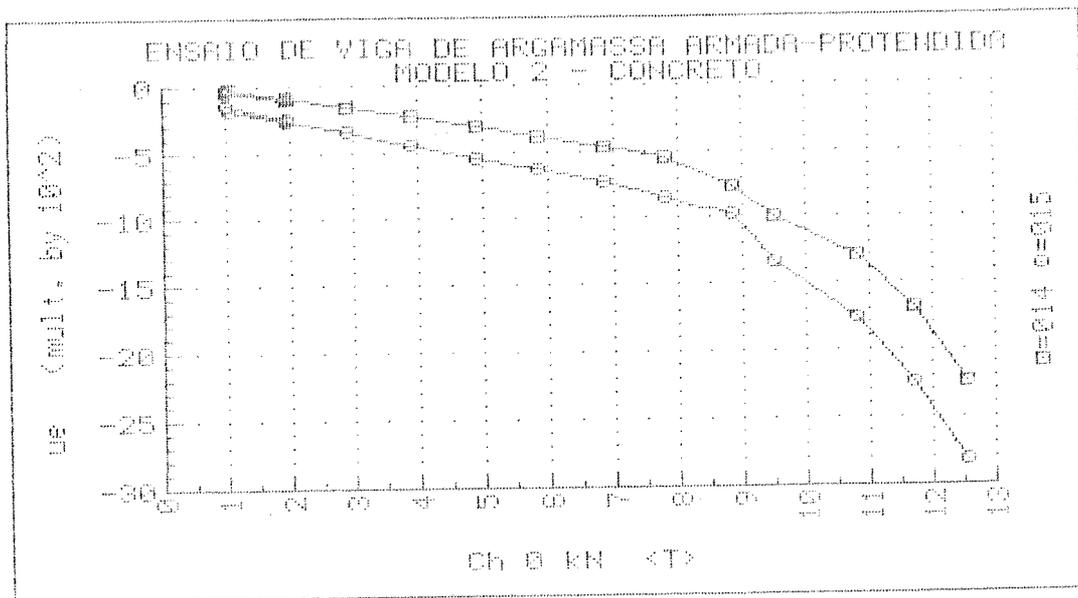
F <sub>1</sub> (kN)	F <sub>2</sub> (kN)	EC <sub>1</sub> (µε)	EC <sub>2</sub> (µε)
1.00	1.09	-44.	-140.
1.94	2.06	-90.	-247.
1.05	0.90	-23.	-175.
1.94	2.10	-89.	-256.
2.91	3.08	-151.	-350.
3.89	4.09	-218.	-440.
4.91	5.10	-294.	-535.
5.86	6.10	-370.	-627.
6.86	7.13	-451.	-722.
7.80	8.14	-543.	-832.
8.83	9.14	-753.	-981.
9.51	10.15	-990.	-1332.
10.79	11.24	-1291.	-1759.
11.69	12.21	-1681.	-2248.
12.54	13.34	-2232.	-2822.

página 6

MODELO 2 - Forças nos macacos e deformações nos 12 extensômetros elétricos nas cordoalhas (EP<sub>i</sub>) e nos dois extensômetros na argamassa comprimida (EC1 e EC2)







## 6.8. ANÁLISE DOS RESULTADOS

São analisados basicamente os resultados experimentais obtidos em relação à força de protensão, ao momento fletor de fissuração, à formação das fissuras, aos deslocamentos e ao momento fletor resistente, englobando a etapa da protensão, os estados limites de utilização e o estado limite último.

Em virtude do pequeno número de modelos, talvez não seja importante uma análise muito minuciosa, pois a amostragem reduzida não permite observações específicas muito conclusivas. Assim, a apresentação deste item procura ilustrar todas as etapas do ensaio num enfoque mais geral.

### 6.8.1. FORÇA DE PROTENSÃO (PERDAS DE PROTENSÃO)

A força de protensão efetivamente transferida à argamassa ficou próxima do valor esperado. A tabela 6.1 indica os valores da força de protensão teórica e os valores obtidos para cada modelo em cada etapa considerada.

FORÇA DE PROTENSÃO TOTAL (kN)			
P	TEÓRICA	MODELO 1	MODELO 2
$P_i$	85,5	85,5	85,5
$P_a$	69,5	72,9	70,1
$P_o$	67,0	71,3	66,8
$P_t$	64,7	67,6	62,3

Tab.6.1 - Força de protensão nas várias etapas

Na estimativa das perdas ocorridas de  $P_i$  até  $P_a$ , no cálculo teórico considerou-se a penetração das cunhas nos porta-cunhas igual a 6,0mm. Além disso, previram-se as perdas devidas à retração na argamassa e à relaxação nas cordoalhas até a etapa da desprotensão. Também foram estimadas as perdas de protensão ocorridas com o deslocamento dos pórticos das

cabeceiras, admitindo-se um deslocamento médio de 0,5mm na altura das cordoalhas. Esta perda ocorre apenas nas três primeiras cordoalhas estiradas, e adotou-se uma perda média para todas elas. Os resultados são apresentados na Tabela 6.2, juntamente com os valores obtidos experimentalmente. Neste caso, as perdas por relaxação e retração iniciais e pelo deslocamento dos pórticos estão agrupadas, devido à impossibilidade de avaliá-las independentemente.

PERDAS DE PROTENSÃO (%) : ETAPA DE $P_i \rightarrow P_a$			
PARCELA	TEÓRICA	MODELO 1	MODELO 2
ENCUNHAMENTO	6,4	5,9	8,3
RELAXAÇÃO/RETRAÇÃO + DESLOCAMENTO DO PÓRTICO	8,7 3,5	8,9	9,7

Tab.6.2 - Perdas de protensão até a ancoragem

Após a operação de tensionamento das cordoalhas, quando se tem a força ancorada, até o instante da liberação ( $t_0$ ), ocorre a perda por encurtamento elástico imediato da argamassa devido à transferência da força de protensão a ela. A estimativa deste valor para a perda experimental foi feita com a variação de deformações observadas nas cordoalhas na liberação (considerando variação linear de tensão), já que as células de carga se desvinculam das cordoalhas nesta etapa e não permitem uma leitura da força efetivamente transferida. A tabela 6.3 mostra estes resultados.

PERDAS DE PROTENSÃO (%) : ETAPA DE $P_a \rightarrow P_0$			
PARCELA	TEÓRICA	MODELO 1	MODELO 2
ENCURTAMENTO ELÁSTICO	3,5	2,2	4,7

Tab.6.3 - Perdas de protensão por encurtamento elástico

Da desprotensão até a execução do ensaio de flexão, as perdas se devem à progressão da relaxação nas cordoalhas, à retração na argamassa e à deformação lenta. Novamente na estimativa destes valores experimentais utilizou-se a variação de deformações observada nas cordoalhas. Os resultados estão na Tabela 6.4.

PERDAS DE PROTENSÃO (%): ETAPA DE $P_o \rightarrow P_i$	
TEÓRICA	3,4
MODELO 1	5,2
MODELO 2	6,5

Tab.6.4 - Perdas progressivas da protensão até o instante do ensaio

A Tabela 6.5 indica os valores teóricos e experimentais das perdas totais de protensão, relativas à força inicial.

PERDAS DE PROTENSÃO TOTAL(%)	
TEÓRICA	24,3
MODELO 1	20,9
MODELO 2	27,1

Tab.6.5 - Perdas totais de protensão

Toda a análise baseada nas deformações das cordoalhas deve cercar-se de cuidados, pois elas resultaram um pouco abaixo dos valores esperados como mostraram os resultados apresentados no item 6.7, comparados com os valores do diagrama tensão-deformação da cordoalha. Como na fase de tensionamento as forças foram medidas pelas células de carga, que fornecem valores precisos, conclui-se que as deformações não indicaram a tensão real a que a cordoalha ficou submetida. Este fato pode ser explicado pela própria colocação dos extensômetros elétricos

nas cordoalhas, que na realidade medem deformações inclinadas ao eixo da cordoalha, menores portanto que a deformação máxima.

A Tabela 6.6 mostra os valores das deformações teóricas e experimentais correspondentes às últimas forças medidas pelas células de carga, ou seja, imediatamente antes da transferência da protensão ao concreto.

CORDOALHAS		1	2	3	4
MODELO 1	FORÇA (kN)	17,35	18,60	19,32	17,65
	$\epsilon_{teo}$ (‰)	6,052	6,650	7,000	6,300
	$\epsilon_{exp}$ (‰)	5,745	6,919	5,835	5,462
MODELO 2	FORÇA (kN)	18,34	18,29	17,00	16,40
	$\epsilon_{teo}$ (‰)	6,600	6,500	6,100	5,850
	$\epsilon_{exp}$ (‰)	5,828	5,997	8,317	5,118

Tab.6.6 - Força e deformação nas cordoalhas antes da liberação.

## 6.8.2. ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

### 6.8.2.1. MOMENTO FLETOR DE FISSURAÇÃO

No cálculo do valor teórico do momento fletor de fissuração foram utilizados os valores de resistência média à tração obtidos com os corpos-de-prova referentes ao dia do ensaio. No momento fletor de fissuração teórico total, ou seja, considerando a influência da força de protensão, empregou-se a força de protensão experimental no dia do ensaio. A tabela 6.7 mostra os valores dos momentos teóricos e experimentais, além da posição da linha neutra.

MOMENTO FLETOR DE FISSURAÇÃO (kN.m)					
MODELO	$x_{r,exp}$ (cm)	$x_{r,teo}$ (cm)	$M_{r,exp}$ (kNm)	$M_{r,teo}$ (kNm)	exp/teo
1	10,4	8,9	1425	1415	1,007
2	10,3	8,9	1300	1310	0,992

Tab.6.7 - Momento fletor de fissuração

Para o momento fletor de fissuração experimental, os gráficos força-deslocamento e força-deformação permitem apenas indicar o intervalo de força em que surge a primeira fissura. O valor exato foi calculado tomando-se o valor indicado no aparelho durante o ensaio, no instante em que a peça perdeu a rigidez. Os gráficos força-deformação correspondentes à execução do ensaio apresentados no item 6.7, permitem uma caracterização nítida do instante da transferência da força da argamassa às cordoalhas, através do aumento brusco das deformações nesta armadura. O início da fissuração também pode ser observado pela análise dos gráficos força-deslocamento. Neste caso, a variação dos deslocamentos não é tão acentuada, já que a peça como um todo absorve esta perda imediata de rigidez.

A posição da linha neutra correspondente ao surgimento da primeira fissura no ensaio, foi calculada com as deformações médias indicadas nos extensômetros elétricos nas cordoalhas e na argamassa comprimida, por compatibilidade de deformações:

$$x_{r,exp} = \frac{\varepsilon_{c,exp}}{\varepsilon_{c,exp} + \varepsilon_{s,exp}} \cdot d$$

Se forem utilizados os valores das deformações medidos pelos extensômetros mecânicos, a posição da linha neutra talvez seja mais representativa, pois toma-se a deformação na argamassa tracionada e não nas cordoalhas, que conforme já citado forneceu valores menores que os reais. Neste caso, os novos valores estão na tabela 6.8, calculados com:

$$x_{r,exp} = \frac{\varepsilon_{c,exp}}{\varepsilon_{c,exp} + \varepsilon_{ct,exp}} \cdot h \quad \text{são:}$$

MODELO	$x_{r,teo}$ (cm)	$x_{r,exp}$ (cm)
1	8,9	7,9
2	8,9	8,8

Tab.6.8 - Posição da linha neutra calculada com as deformações nos extensômetros mecânicos

#### 6.8.2.2. DESLOCAMENTOS

Para o cálculo dos deslocamentos transversais teóricos, a expressão que determina a flecha central de uma viga bi-apoiada submetida a cargas iguais e concentradas, equidistantes dos apoios é:

$$a = F.b (3\ell^2 - 4b^2) / (24.E_c.I) \text{ com}$$

F = força aplicada;

b = distância dos apoios ao ponto de aplicação de força;

$\ell$  = vão livre entre os apoios;

$E_c$  = módulo de deformação longitudinal da argamassa;

I = momento de inércia da seção.

Para o valor de  $E_c$  adotou-se o resultado obtido nos ensaios dos corpos-de-prova, correspondente ao módulo tangente enquanto a peça teve comportamento característico de estágio I. Após a fissuração, aplicou-se o fator de 0,85, correspondente ao módulo de deformação longitudinal secante, quando a argamassa já está submetida a tensões mais elevadas.

Para o momento de inércia, enquanto a argamassa esteve íntegra, adotou-se o momento de inércia calculado em estágio I. Após a fissuração, considerou-se o momento de inércia equivalente ( $I_{eq}$ ), conforme indicado no capítulo 2, sendo que os valores do momento de inércia correspondente ao estágio II ( $I_{II}$ ) são  $1450 \text{ cm}^4$  e  $1320 \text{ cm}^4$  para os modelos 1 e 2 respectivamente.

Dos resultados apresentados no item 6.7, observa-se que os deslocamentos foram maiores no modelo 2, ainda que ele apresentasse um maior módulo de deformação longitudinal. Daí conclui-se que o momento de inércia é maior para o modelo 1, pois a tela soldada utilizada proporcionou maior rigidez à peça do que a tela expandida.

### 6.8.2.3. FISSURAÇÃO

Em relação à abertura e desenvolvimento das fissuras, os modelos tiveram um comportamento bem diferenciado. O modelo 1 (armado com tela soldada), apresentou as primeiras fissuras visíveis com aberturas próximas de 0,07mm, localizadas no tramo central, na mesa tracionada. As fissuras se desenvolveram progressivamente em número e abertura maiores, sendo que, na etapa próxima à ruptura, elas tinham abertura da ordem de 0,25 mm, e espaçamento médio igual ao espaçamento dos fios transversais da tela (50mm), conforme mostram as fotos 6.13 e 6.14.

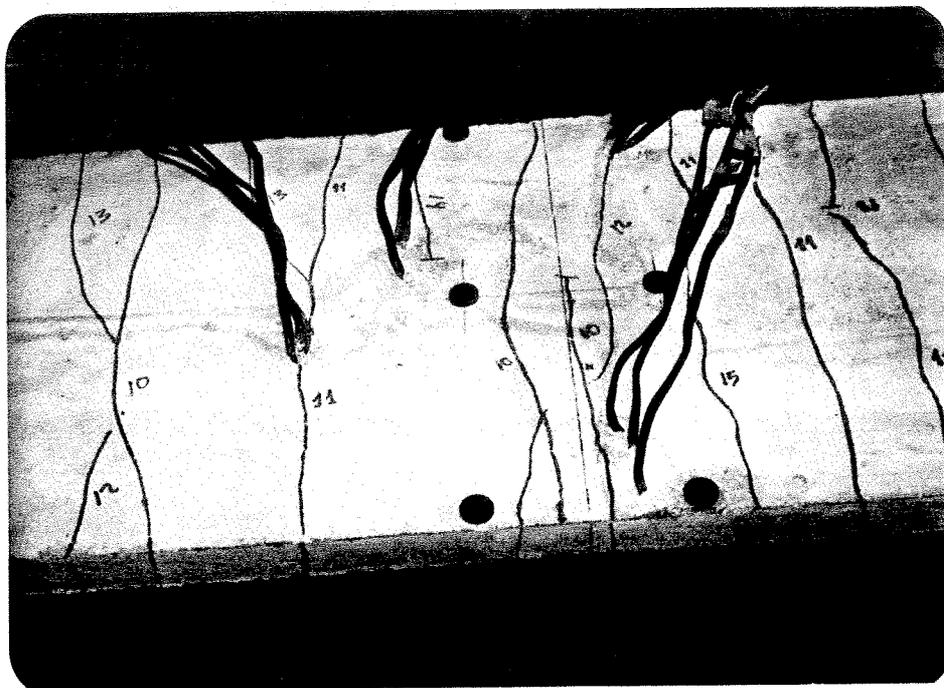


Foto 6.13 - Detalhe da fissuração na mesa tracionada do modelo 1 após o ensaio

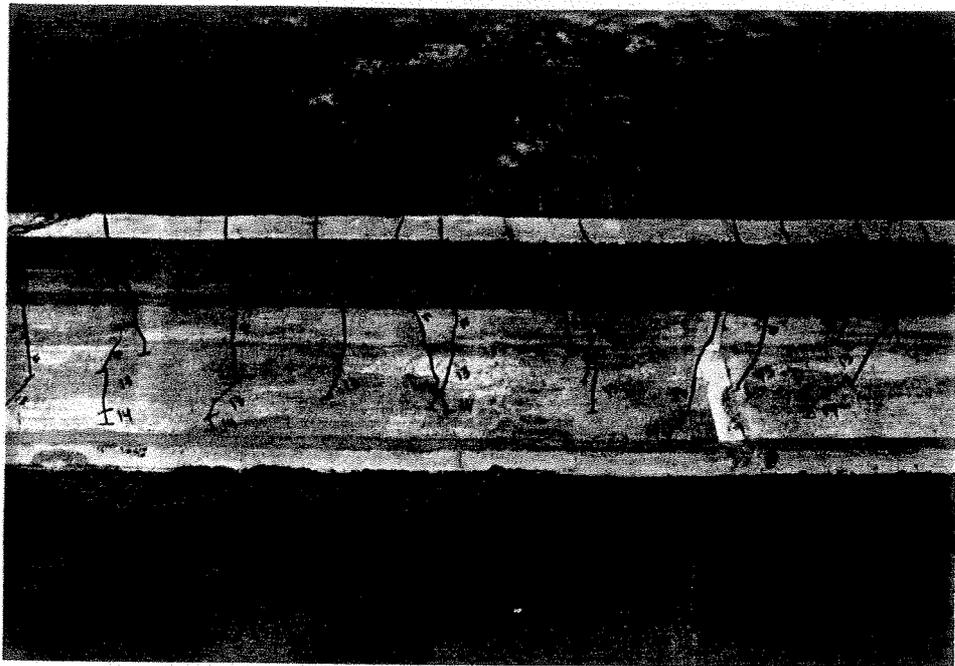


Foto 6.14 - Aspecto da fissuração na alma do modelo 1

O modelo 2 (armado com tela de chapa expandida) não se comportou satisfatoriamente após o início de fissuração. As primeiras fissuras surgidas na mesa tracionada no tramo central tinham abertura média de 0,10mm, e algumas delas aumentaram excessivamente até a ruptura, chegando a valores máximos de 0,70mm. A utilização de apenas uma tela, posicionada na direção de menor eficiência mecânica, parece não ter sido suficiente para absorver os esforços transferidos pela argamassa. A foto 6.15 mostra a configuração das fissuras no modelo 2.

Nas tabelas apresentadas neste item, consideram-se as deformações na face comprimida ( $\epsilon_{c,exp}$ ) e nas cordoalhas ( $\epsilon_{s,exp}$ ), com os valores médios indicados nos extensômetros elétricos. A posição da linha neutra é calculada analogamente ao item anterior.

As taxas de armadura foram calculadas segundo o Anexo da NBR-7197, com:

$$\alpha_s = \frac{A_s}{A_{cr}} \quad \text{com}$$

$A_s$  = área total de armadura posicionada abaixo da linha neutra na seção fissurada (estádio II).

$A_{cr}$  = área fissurada (conforme o anexo citado).

Para as aberturas de fissuras, são apresentados na tabela 6.9 e 6.10, os valores relativos às fissuras acompanhadas, desde o seu aparecimento até a etapa anterior à ruína. Para comparação, foram calculados os valores teóricos médios, conforme indica a NBR-11173 no caso de tela de aço soldada.

O cálculo teórico da tensão na armadura é feito em estágio II:

$$\sigma_s = \alpha \cdot (M - M_{prot}) \cdot (d - x_{II}) / I_{II}$$

O valor da tensão observada nos ensaios foi calculado a partir dos valores médios das deformações nas cordoalhas nas etapas correspondentes, aplicadas ao gráfico tensão x deformação da armadura complementar apresentado no item 6.4.

ETAPA	FORÇA (kN)	w <sub>exp</sub> (mm)	w <sub>m,teo</sub> (mm)	$\sigma_{s,teo}$ (MPa)	$\sigma_{s,exp}$ (MPa)	M / M <sub>u</sub>
10	10,0	0,07	0,05	400	156	0,67
11	11,0	0,13	0,08	495	233	0,73
12	12,0	0,17	0,10	590	252	0,80
13	13,0	0,18	0,12	695	579	0,87
14	14,0	0,22	0,15	790	-	0,93

Tab.6.9 - Tensão na armadura e fissuras no modelo 1

ETAPA	FORÇA (KN)	w <sub>exp</sub> (mm)	$\sigma_{s,teo}$ (MPa)	$\sigma_{s,exp}$ (MPa)	M / M <sub>u</sub>
9	9,0	0,10	340	150	0,67
10	10,0	0,15	430	332	0,74
11	11,0	0,17	520	493	0,82
12	12,0	0,20	620	620	0,89
13	13,5	0,40	770	830	1,00

Tab 6.10 - Tensão na armadura e fissuras no modelo 2

A comparação destes resultados com os obtidos nos trabalhos anteriores citados<sup>4,5</sup> revela que, neste caso, as aberturas de fissuras foram maiores para tensões iguais. A justificativa é direta: as taxas de armadura aqui utilizadas são inferiores.

No caso de tela de chapa expandida, parece inviável dispor apenas uma tela, principalmente se colocada na direção de menor resistência. Já para a tela soldada, o estado de fissuração apresentou-se com uma configuração razoável.

Talvez haja outro fator que justifique aberturas de fissuras elevadas nos dois modelos. O momento fletor de fissuração ficou muito próximo do momento fletor resistente último, ou seja, quando do aparecimento da primeira fissura, a peça já estava próxima da ruptura ( $M/M_u=0,65$ ). Isto significa que a força de protensão talvez tenha sido elevada em relação à armadura complementar adotada. Ou seja, o grau de protensão deve ser menor.

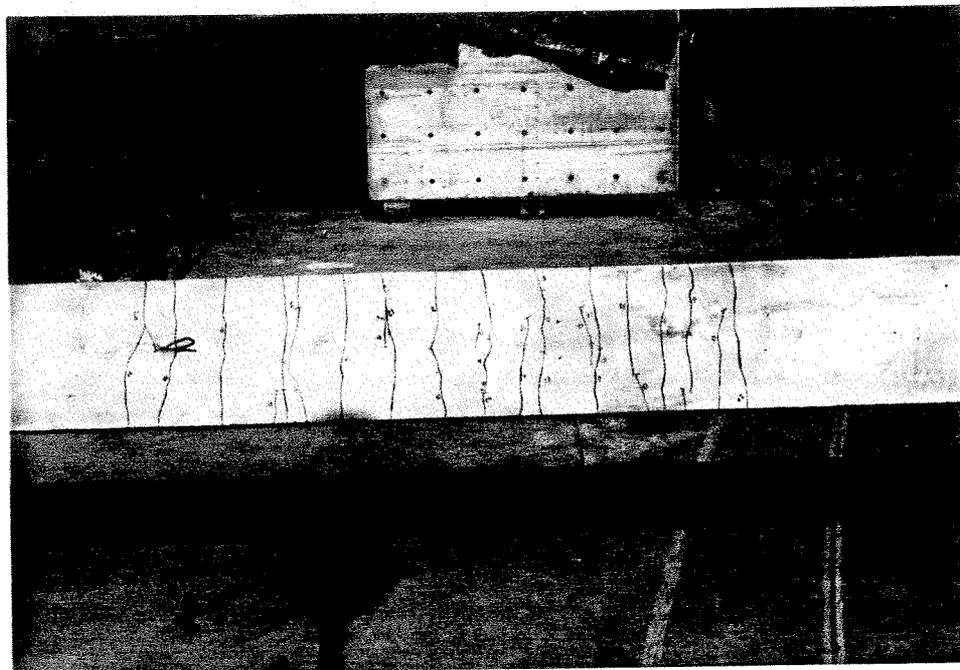


Foto 6.15 - Aspecto da fissuração na mesa tracionada do modelo 2

### 6.8.3. ESTADO LIMITE ÚLTIMO

Os resultados experimentais obtidos com os ensaios foram comparados aos teórico-experimentais, calculados utilizando-se as características conhecidas dos materiais ensaiados, aço e argamassa.

A caracterização da ruptura ficou mais evidente no modelo 1. No modelo 2 a argamassa não rompeu e, para efeito dos cálculos, a força última foi adotada como a última etapa de carga ( $f_u=13,5\text{kN}$ ), em que as fissuras e deslocamentos eram tais que a peça estava completamente comprometida, além das deformações obtidas com os extensômetros mecânicos indicarem claramente a deformação plástica excessiva da armadura.

A tabela 6.11 mostra os valores teóricos e experimentais do momento fletor resistente, as deformações no concreto (borda comprimida) e na armadura (borda tracionada), além da posição da linha neutra. Os valores experimentais correspondem à etapa imediatamente anterior à ruína.

MODELO	$\varepsilon_c$ (‰)	$\varepsilon_s$ (‰)	x (cm)	$M_u$ (kN.m)	$M_{exp} / M_{teo}$
1	teo = -2,2	teo = 10,0	teo = 3,4	teo = 21,2	1,06
	exp = -2,3	exp = 4,0	exp = 6,9	exp = 22,5	
2	teo = -1,8	teo = 10,0	teo = 2,9	teo = 20,2	0,97
	exp = -2,5	exp = 5,5	exp = 5,9	exp = 19,5	

Obs: para o modelo 2 os valores de  $\varepsilon_{exp}$  referem-se à força de 13,0kN , quando os aparelhos foram desligados.

Tab.6.11 - Deformações na ruptura e momento resistente

As rupturas deveriam ocorrer no domínio 2, conforme indicava o cálculo teórico. Os valores experimentais indicam uma ruptura provável no domínio 3. Relembra-se novamente que as deformações nas cordoalhas podem não representar os valores reais, conforme já argumentado. Se estes cálculos forem efetuados com os valores indicados nos extensômetros mecânicos, os resultados são os indicados na tabela 6.12.

MODELO	$\epsilon_{c,exp}$	$\epsilon_{s,exp}$	$x_{exp}$
1	-2,2	5,8	5,1
2	-3,3	11,6	4,2

Tab.6.12 - Deformações e posição da linha neutra na ruptura - extensômetros mecânicos.

Deve ser ressaltado que em todos os cálculos efetuados referentes aos valores experimentais, quando se utilizou a deformação indicada nos extensômetros elétricos posicionados nas cordoalhas, estes valores devem ser inferiores ao real. A comparação com os valores obtidos nos extensômetros mecânicos na argamassa sinalizam para a mesma conclusão. Assim, os resultados devem ter um caráter geral, que indicam tendências de comportamento. Conclusões muito específicas devem ser obtidas com mais ensaios, instrumentando-se inclusive as armaduras complementares, de modo a ratificar esta diferença nas deformações medidas nas cordoalhas.

Observações:

- nas páginas 7 e 8 do modelo 1, nos gráficos *oxc* indicados pelos extensômetros posicionados nas cordoalhas, constam apenas os resultados de dois extensômetros. Isto se deve a problemas que prejudicaram o funcionamento de um deles nas cordoalhas 1 e 2 deste modelo.

- na página 1 do modelo 2, a leitura das forças nas células de carga das cordoalhas 3 e 4 indica a ocorrência de problemas nos equipamentos de leitura ou nos respectivos extensômetros. Para os cálculos, as forças nestas cordoalhas foram consideradas como as correspondentes à etapa 9, quando todas as cordoalhas estão ancoradas.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho, os elementos protendidos de seção transversal constituída por paredes delgadas foram caracterizados a partir da análise da interface das tecnologias da argamassa armada e do concreto protendido. Foram incorporadas as características desses dois materiais, adaptando-as às exigências requeridas pelo material estudado, provisoriamente denominado argamassa armada protendida. Conforme já foi explicitado, este estudo teve um caráter global, exploratório, o que não impede o registro de algumas conclusões parciais, direcionando as pesquisas futuras, que devem esclarecer e substanciar melhor as hipóteses assumidas.

Quando se fez nos capítulos 2 e 3 uma conceituação teórica da argamassa armada e do concreto protendido, imaginou-se que as características e propriedades destes materiais estariam presentes na argamassa armada protendida, a menos de alguns aspectos que deveriam se adequar à fusão destes conceitos. Desta maneira, os capítulos 2 e 3, que trazem indicações para projeto e execução de peças de argamassa armada e de concreto protendido, e o capítulo 4, que reúne e adapta algumas destas indicações para a argamassa armada protendida, embasaram todas as análises posteriores: de potencialidades, de critérios de projeto e da experimentação. Neste momento, ao término desta etapa de estudo, os resultados reforçam a validade das hipóteses assumidas e indicam a possibilidade de um vasto campo de estudos e de utilização.

O cálculo das peças componentes de um galpão leve pré-moldado, efetuado como exemplo prático, permite algumas observações para o projeto das peças delgadas protendidas.

Deve-se priorizar as seções com mesa de compressão, já que em virtude da pequena espessura das paredes, há pouco volume de argamassa para equilibrar as forças de tração no caso de solicitações elevadas, de maneira a prescindir de armadura

suplementar em quantidade maior que a construtiva na região de compressão.

A força de protensão necessária para satisfazer às exigências dos estados limites de utilização, pode ser facilmente obtida com cordoalhas de diâmetro até 10,0mm, convenientemente dispostas na seção transversal. Ressalva-se a hipótese adotada em casos de protensão parcial, de limitar a tensão máxima de tração para as combinações quase-permanentes de ações (ao invés de obedecer ao estado limite de descompressão).

O nível de protensão, resultado das condições estabelecidas pelos estados limites de utilização, não trouxe problemas de contra-flecha excessiva e nem de tensões de tração muito elevadas na etapa de fabricação. Reafirma-se a conveniência de formas com centro geométrico que proporcione excentricidade adequada da força de protensão.

Com relação ao tipo de tela e principalmente à abertura das malhas, um trabalho experimental específico deve indicar as mais adequadas e os limites máximos. O espaçamento dos fios longitudinais deve ser limitado pela segurança à ruptura no estado limite último, de maneira a ter arranjos de armadura convenientes, com número de fios complementares compatível com a execução da peça. Para o espaçamento dos fios transversais, a limitação advém dos esforços tangenciais que devem ser absorvidos por eles, e da configuração das fissuras, inclusive para controle da retração.

Dos exemplos de cálculo, observa-se que valores de 100mm para estes espaçamentos são interessantes, prevendo-se em alguns casos um engrossamento nas almas e um grau de protensão um pouco maior.

Ainda que estes valores possam ser elevados para as peças de argamassa armada, a introdução da protensão, mesmo que em níveis baixos, proporciona um aumento significativo na resistência à fissuração. Desta forma, a peça trabalha predominantemente sem fissurar. As eventuais fissuras decorrentes de uma solicitação esporádica, mantidas com aberturas pequenas, voltam a se fechar após a atuação da solicitação.

E finalmente, o controle dos deslocamentos revelou-se muito eficaz. A contra-flecha devida à protensão, e principalmente a predominância de comportamento típico de estágio I, proporcionaram um aumento de rigidez muito grande, não se observando em nenhum exemplo a ocorrência de flechas excessivas, que é uma das limitações para o uso de peças de argamassa armada fletidas.

Um aspecto muito importante é o peso próprio reduzido das peças. Mantendo praticamente a mesma relação entre o vão e a altura das peças e incorporando paredes mais delgadas do que nas tradicionais peças protendidas produzidas, elas resultaram em pesos variando de 5 a 10kN para comprimentos de 5,5 a 10m. As vantagens no transporte e na montagem podem ser significativas.

Quanto aos resultados obtidos nos ensaios, a principal constatação é a regularidade e consistência dos dados experimentais, que garantem a sua confiabilidade. A observação do comportamento das peças a partir dos diagramas tensão-deformação e carga-flecha, revela resultados muito coerentes com as hipóteses adotadas. E principalmente reforçam a eficiência dos equipamentos e procedimentos de ensaio.

Ainda que os resultados experimentais tenham sido muito próximos aos esperados, para todos os parâmetros analisados, outros estudos experimentais devem ser realizados no futuro, para obtenção de conclusões mais específicas. Uma recomendação adicional seria a colocação de extensômetros elétricos também nos fios das telas, conforme comentado no capítulo 6, para prever as diferenças das leituras de deformação nas cordoalhas, e possibilitar inclusive a verificação de outras técnicas para a instrumentação nos fios das cordoalhas.

Os resultados obtidos em todas as etapas da execução dos modelos, desde o estiramento das cordoalhas, passando pelas perdas de protensão, até a realização dos ensaios, foram próximos aos valores teórico-experimentais, e portanto atestam a viabilidade das hipóteses recomendadas de cálculo. Mesmo os valores de abertura de fissuras foram coerentes, em virtude de se utilizarem taxas de armadura menores, comparadas com as utilizadas nos trabalhos anteriores citados.

## PESQUISAS FUTURAS

Cumpridas as etapas iniciais de caracterização do material e viabilização da proposta, enquanto potencial de aplicação, critérios de projeto e método de análise experimental, as pesquisas futuras devem trabalhar com elementos de seção transversal com espessura das paredes da ordem de 2,5cm a 5,0cm, inseridas no conceito de pré-moldado leve. O valor mínimo deve garantir a durabilidade das peças, que teriam cobrimento da armadura de protensão de 10mm, o que poderia ser objeto de pesquisa específica.

Dentro deste intervalo, pode-se realizar estudos experimentais com a tela de aço de chapa expandida, partindo-se talvez de pelo menos duas telas ao longo da região tracionada, ou mesmo colocando-a na sua direção mais resistente. Para a tela de aço soldada, deve-se utilizar, preferencialmente, telas com fios de diâmetro mínimo de 2,5mm, variando-se a abertura das malhas na direção dos fios transversais e longitudinais, por exemplo em intervalos de 5,0cm a 15,0cm.

A contribuição da protensão na verificação do cisalhamento também pode ser estudada com detalhes. Nos modelos ensaiados não se observou qualquer fissura proveniente de solicitações transversais, quando se tinha tensões (convencionais) de cisalhamento da ordem de 3,4 MPa.

O grau de protensão a se adotar nas peças delgadas deve merecer um estudo experimental mais adequado, variando-se inclusive o tipo de armadura ativa, para detectar possíveis problemas com a aderência e a fissuração na região da ancoragem, além de estabelecer valores máximos que não comprometam a estabilidade da peça.

Pesquisas de caráter teórico podem definir mais claramente critérios para verificação da estabilidade das peças delgadas protendidas, já que a introdução da protensão, apesar de acrescentar uma elevada compressão (geralmente excêntrica), tem seu efeito minimizado pela tendência da armadura ativa manter-se reta.

Outro campo bastante fértil é o desenvolvimento de

sistemas construtivos que incorporem as seções típicas das peças de argamassa armada, propondo soluções para as diversas potencialidades apontadas neste trabalho.

Espera-se que este trabalho tenha cumprido os objetivos inicialmente propostos pelo autor. Principalmente, ele deve estimular uma série de outras pesquisas que estudem a protensão em peças de seção delgada, cuja viabilidade parece uma realidade a se desenvolver.

## CAPÍTULO 8

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

#### 8.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e Execução de Argamassa Armada. São Paulo, ABNT, 1990. (NBR-11173).
- 02 - HANAI, J. B. Argamassa armada: fundamentos tecnológicos para projeto e execução. São Carlos, EESC-USP, 1987. (Tese de livre-docência).
- 03 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto Protendido. Rio de Janeiro, ABNT, 1989. (NBR-7197).
- 04 - GIONGO, J. S. Argamassa armada: dimensionamento de perfis submetidos à flexão. Fundamentos e experimentação. São Carlos, EESC-USP, 1990 (Tese de doutorado).
- 05 - BARBOZA, F. L. Estudo experimental de elementos de argamassa armada com tela de chapa de aço expandida. São Carlos, EESC-USP, 1990 (Dissertação de mestrado).
- 06 - EL DEBS, M.K. Contribuição ao projeto de galerias enterradas: alternativas em argamassa armada. São Carlos, EESC-USP, 1986 (Tese de doutorado).
- 07 - MIGLIORE JR, A.R. Estruturas de contenção com elementos pré-moldados de argamassa armada. São Carlos, 1987 (Dissertação de mestrado).

- 08 - LIBÓRIO, J.B.L. Estudo patológico de construções de argamassa armada existentes no Brasil. São Carlos, EESC-USP, 1990 (Tese de doutorado).
- 09 - NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto (tradução de Salvador Eugênio Giamusso). São Paulo, PINI, 1982.
- 10 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para Concreto - Especificações. Rio de Janeiro, ABNT, 1987. (NBR-7211).
- 11 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro, ABNT, 1980. (NBR-6118).
- 12 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado. Rio de Janeiro, ABNT, 1985. (NBR-9062).
- 13 - VILAGUT, F. Pré-fabricados de hormigão. G.Gilli, 1975.
- 14 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ações e Segurança nas Estruturas. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. (NBR-8681).
- 15 - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Committee 549. Guide for design, construction and repair of ferrocement. ACI Structural Journal, 85(3): 325-351, May-June, 1988. (ACI 549.1R-88).
- 16 - BALLARIN, A.W. Propriedades mecânicas da argamassa armada com telas soldadas. São Carlos, EESC-USP, 1989 (Dissertação de mestrado).
- 17 - AMARAL, N.A. Construções de concreto. São Paulo, EPUSP, 1971. 2v.

- 18 - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Committee 318. Building Code Requirements for Reinforced Concrete. July, 1985 (ACI 318M-83).
- 19 - PFEIL, W. Concreto Protendido - Introdução. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1984.
- 20 - LEONHARDT, F. Construções de Concreto = Concreto Protendido. Rio de Janeiro, Interciência, 1983.
- 21 - HANAI, J.B. Concreto Protendido = fundamentos teóricos (notas de aula). São Carlos.
- 22 - COMITE FEDERAL DO CONSELHO DE MINISTROS DA URSS PARA ASSUNTOS DE ESTRUTURAS. Instruções para o projeto de estruturas de argamassa armada. SNT (tradução em espanhol do original russo)(SN 366-77).
- 23 - PAMA, R.P. e THANG, H.V. Pre-Tensioned Ferrocement: Behaviour in Direct Tension and Flexure. Journal of ferrocement, vol 16, July, 1986, p 239-254.
- 24 - DESAHY, P. e REDDY, V. Pretensioned Ferrocement Floor Elements of Channel Cross-Section. Ferrocement Applications and Progress: Proceedings of the Third Internatinal Symposium on Ferrocement, Ed. SK Kaushik e VK Gupta, 1988, p. 314-323.
- 25 - DESAHY, P. , RAO, K.S.N. e REDDY, V. Experimental Roofing With Pretensioned Ferrocement Elements. Ferrocement Applications and Progress: Proceedings of the Third International Symposium on Ferrocement, Ed. SK Kaushik e VK Gupta, 1988, p. 405-413.
- 26 - WANGK KAI-MING. Study on Ferrocement with Prestressed Bars. Journal of ferrocement, July, 1985, p.235-246.

- 27 - HANAI, J.B. Construções de argamassa armada: situação, perspectivas e pesquisas. São Carlos, EESC-USP, 1981. (Tese de doutorado).
- 28 - Revista A CONSTRUÇÃO. Argamassa armada: medida economica. Abril, 9/90.
- 29 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Rio de Janeiro, ABNT, 1985 (NBR-7480).
- 30 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Tela de aço soldada para armadura de concreto. Rio de Janeiro, ABNT, 1982 (NBR-7481).
- 31 - VASCONCELOS, A.C. Manual prático para a correta utilização dos aços no concreto protendido em obediência às normas atualizadas. Livros Técnicos e Científicos (Rio de Janeiro) e Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira (Belo Horizonte), 1980.
- 32 - MARCELINO, N.A., BARBOZA, F.L., FURLAN JR, S. e MONTANARI, O.J. Estudo de um galpão leve. São Carlos, EESC-USP, 1989.
- 33 - AGNESINI, M.V.C. Argamassas hidráulicas simples de CP-32 e areia natural quartzosa destinadas à execução de peças pré-fabricadas de argamassa armada. São Carlos, EESC-USP, 1988.
- 34 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ensaio de Cimento Portland. Rio de Janeiro, ABNT, 1982.

## 8.2. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- PFEIL, W. Concreto protendido - dimensionamento à flexão. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1983.
- CASTANHO, J.L.B.A. Flexão normal em seções transversais de peças de concreto protendido. São Paulo, Esc.técnico J.C. de Figueiredo Ferraz, 1972 (Tese de doutorado).
- BRUGGELING, A.S.G. Concreto Estrutural: a ciência na prática. (tradução do inglês de A.C.Vasconcelos). Agosto, 1986.
- PETRONI, L. Vigas de argamassa armada. São Carlos, EESC-USP, 1974 (Tese de livre-docência).
- GIONGO, J.S. Exemplo prático de dimensionamento. São Carlos, ABCP, 1988.
- PINHEIRO, L.M. Concreto armado: tabelas e ábacos. São Carlos, EESC-USP, 1986.
- SAVASSI, W. Formulações para cálculo (programável) de características de figuras geométricas planas. São Carlos, EESC-USP, 1987.