

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Estruturas

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DA
ARGAMASSA ARMADA COM TELAS SOLDADAS**

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Eng.º ADRIANO WAGNER BALLARIN

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos - USP,
para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas

COMISSÃO EXAMINADORA:

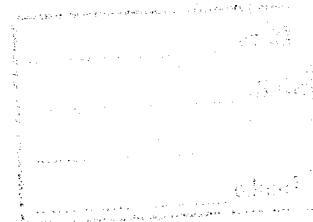
Prof. Dr. João Bento de Hanai - Orientador (EESC - USP)

Prof. Dr. Dante A. O. Martinelli (EESC - USP)

Prof. Dr. Péricles Brasiliense Fusco (EPUSP)

SÃO CARLOS
Maio de 1989

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS



PROPRIEDADES MECÂNICAS DA ARGAMASSA ARMADA
COM TELAS SOLDADAS

Adriano Wagner Ballarin

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Bento de Hanai

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".

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Bento de Hanai (EESC-USP)
Prof. Dr. Dante A.O. Martinelli (EESC-USP)
Prof. Dr. Péricles B. Fusco (EPUSP)

Maiο, 1989

A meu pai,
meu primeiro e grande professor.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento diário deste trabalho foi vivenciado por muitas pessoas que me auxiliaram com o relato de suas experiências, com sugestões - não raras vezes brilhantes - e principalmente estímulo.

Agradeço a todos, com sinceridade.

Contudo, mesmo correndo o risco do esquecimento, gostaria de manifestar meu especial apreço por algumas pessoas e meu reconhecimento por algumas instituições, que aqui representam todos os meus colaboradores:

- meu orientador, que nesses anos todos de convívio no trabalho de pesquisa e divulgação da argamassa armada tornou-se grande amigo e companheiro imprescindível;
- Profs. Dante A.O. Martinelli, Mounir K. El Debs,, Toshiaki Takeya e Arq. João F. Lima - as poucas horas de conversa truncada foram muito valiosas, e caracterizaram minha formação profissional nesses anos;
- técnicos do Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, pela dedicação;
- FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio financeiro;
- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, pelo apoio financeiro e pelo estímulo à conclusão do trabalho;
- meus familiares, em especial Maria Luisa e minha mãe, que aceitaram pacientemente "a concorrência" da argamassa armada.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o estudo das propriedades mecânicas características da argamassa armada com telas soldadas, com aberturas de malha superiores às usualmente empregadas nos demais países onde esta tecnologia vem se desenvolvendo. Foram realizados ensaios sistemáticos de tração e flexão em exemplares com espessuras variando de 15 mm a 35 mm e taxas de armadura entre 109 kg/m³ e 260 kg/m³.

Para cada tipo de solicitação a amostragem total constituiu-se de cerca de 60 exemplares reunidos em 5 grupos com espessuras e arranjos típicos de armadura distintos. Para cada grupo com mesma espessura e arranjo típico de armadura, foram executadas 3 séries de peças - armadas respectivamente com telas de malha quadrada, telas de malha retangular e sem armadura - com 4 exemplares cada.

Todos os exemplares receberam instrumentação para medição de deslocamentos e deformações da argamassa e armaduras. Observaram-se ainda a carga de fissuração, a tipologia e o desenvolvimento da fissuração (abertura e espaçamento das fissuras) e a carga de ruptura. Paralelamente a estes ensaios principais, as características da argamassa empregada na execução dos exemplares foram acompanhadas através da avaliação das resistências à tração e compressão e determinação do módulo de deformação longitudinal em corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura.

Os resultados experimentais obtidos foram analisados, dando-se tratamento estatístico pelo Critério de Aceitação ou Rejeição de Amostras de Chauvenet, e comparados com formulações teóricas diversas, pertinentes principalmente à teoria do concreto armado.

ABSTRACT

This paper presents the study of ferrocement typical mechanical properties when using welded wire meshes with larger openings than those usually employed in ferrocement. Tension and flexion tests were made. The specimens had a thickness of 15 mm to 35 mm and steel ratio of 100 kg to 250 kg per cubic meter of mortar.

Sixty specimens, gathered in five groups with different thickness and distinct reinforcement arrangement were used for each tests (tension and flexion). In each group three series were performed -- with square and rectangular openings and without reinforcement -- with four specimens each.

In all of the tests, specimen deflections and mortar and steel strains were measured at every loading stage. Also the cracking load, cracking behaviour (spacing, width and type) and failure load were noted. During these main tests the mortar characteristics were evaluated by tension, compression and deformation modulus tests in cylindrical samples with 50 mm diameter per 100 mm length.

The test results were analysed by Chauvenet's Criterion of acceptance and refusal of samples and compared with several theoretical formulations, mainly related to conventional reinforced concrete.

INDICE

		pg.
1	INTRODUCAO	01
2	OBJETIVOS	07
3	PROGRAMACAO DOS ENSAIOS	09
	3.1 Definição das Características dos Modelos .	09
	3.2 Fenômenos a Observar	17
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	18
	4.1 Ensaios de Flexão	18
	4.2 Ensaios de Tração	27
	4.3 Ensaios Complementares	37
5	RESULTADOS OBTIDOS	39
	5.1 Considerações Gerais	39
	5.2 Ensaios de Flexão e Tração	39
	5.3 Ensaios Complementares	44
6	ANALISE DOS RESULTADOS	56
	6.1 Ensaios de Flexão	56
	6.2 Ensaios de Tração	92
	6.3 Ensaios Complementares	106
7	CONCLUSOES	110
	7.1 Considerações Gerais	110
	7.2 Ensaios de Flexão	111
	7.3 Ensaios de Tração	112
	7.4 Ensaios Complementares	113
8	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	114
	ANEXO 1 - Resultados obtidos - flexão	
	ANEXO 2 - Resultados obtidos - tração	
	ANEXO 3 - Análise dos resultados	
	. deslocamentos - flexão	
	. fissuração - flexão	
	. fissuração - tração	

1 INTRODUÇÃO

Argamassa armada é um material que emprega armadura constituída por malha muito fina, de telas e fios de aço, distribuída em argamassa de cimento e areia, de alta resistência. Podendo ser vista como um tipo particular de concreto armado, é utilizada na execução de estruturas e componentes esbeltos, com espessuras variando de 15 mm a 40 mm, havendo contudo exemplos de construção de cascos de embarcações com lâminas de argamassa armada de até 4 mm de espessura.

As raízes históricas da tecnologia da argamassa armada remontam a 1848, quando Joseph Louis Lambot desenvolvia os primeiros artefatos com o "fercement", material constituído por uma rede ou conjunto de arames ou barras metálicas encaixadas ou cimentadas juntas com cimento hidráulico, conforme definição de sua própria patente.

O "fercement" de Joseph Louis Lambot, que pela primeira vez invocava a associação de uma matriz a um reforço metálico, teria ascendência direta sobre a argamassa armada - mais ainda, sobre toda a família dos concretos estruturais.

No desenvolvimento subsequente desse material, contudo, enquanto a tecnologia do concreto armado sofria consideráveis avanços, a argamassa armada ficaria restrita a exemplos esparsos de construção de pequenas embarcações e artefatos diversos de menor importância tecnológica. Conforme comentado por Hanai ⁽¹²⁾ "é possível que o concreto de cimento portland, na sua forma mais massiva - depois reforçada com elementos mais resistentes à tração, constituindo-se então o concreto armado - tenha se apresentado como material por excelência na evolução natural da arquitetura de pedra, dominada desde os primórdios da civilização".

Em 1943, quase um século depois da "criação" do "fercement", Pier Luigi Nervi, notável engenheiro italiano, retoma o seu desenvolvimento, e, apropriando-se de suas particularidades tecnológicas, realiza obras de rara beleza, expressão característica de sua genialidade e arrojo. São descritas, de forma exemplar, pelo próprio Nervi e por Hanai ^(14,17).

O ferro-cimento de Nervi tinha como importante base conceitual a sua "infissurabilidade" e grande alongabilidade, como decorrência da maior subdivisão e distribuição da armadura metálica na argamassa. Nervi empregava telas de aço doce, com peso de 0,6 kgf/m² a 1,5 kgf/m², e fios com diâmetros de 0,5 mm a 1,5 mm, formando malhas de 10 mm. A argamassa tinha consumo de cimento de 950 kg/m³ a 1200 kg/m³ e o consumo final de aço resultava da ordem de 500 kg/m³.

As grandes criações de Nervi foram acompanhadas de perto por Oberti, engenheiro professor da Escola Politécnica de Milão, que se encarregava da realização dos respectivos estudos experimentais. Motivado pela curiosidade e pelo ineditismo que o material representava para a época, Oberti

realizou também ensaios de caracterização do ferro-cimento obtendo resultados que permitiam afirmar que para taxas de armadura entre 100 kg/m^2 e 200 kg/m^2 a alongabilidade do material permanecia praticamente igual à da argamassa não armada; para taxas de armadura entre 400 kg/m^2 e 500 kg/m^2 havia um rápido incremento da deformação máxima de fissuração, chegando-se muitas vezes a quintuplicar os valores iniciais - e atingindo assim a "porcentagem espontânea do sistema", conforme suas palavras.

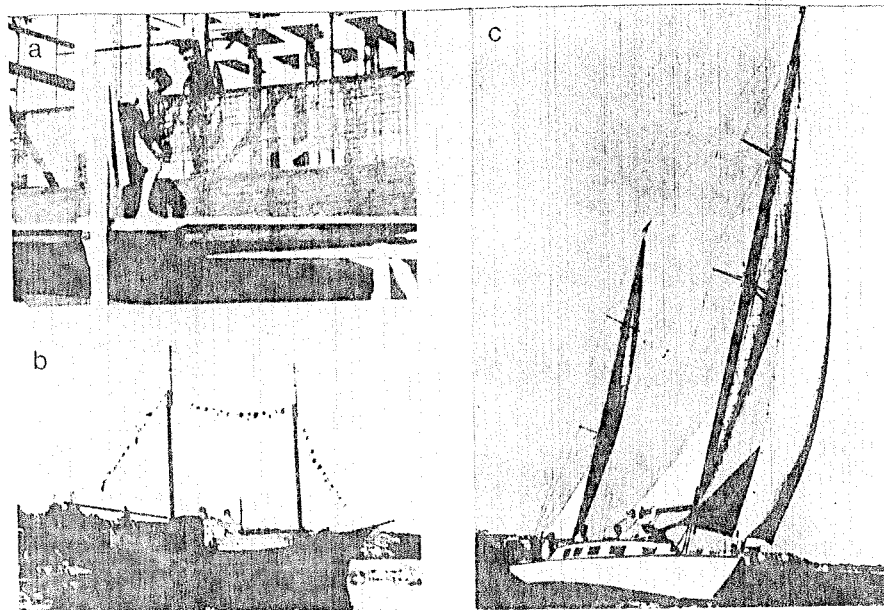


Foto 1.1 - Algumas realizações de Pier Luigi Nervi com o ferro-cimento, no campo da construção naval:

- a) Motoveleiro Irene - aspectos gerais da preparação da armadura de várias telas de aço do casco de 35 mm.
- b) Motoveleiro Irene - aspecto final da embarcação - Com projeto naval de Guido Franco e dimensionamento estrutural de Nervi, o peso da embarcação era de 165 t.
- c) Veleiro Nenelle - embarcação de 12,2 m de comprimento, com casco de 12 mm de espessura, armado com 7 malhas de tela e barras longitudinais de 6 mm de diâmetro espaçadas de 50 mm.

A partir de 1955, a divulgação do rico legado de Nervi traz como consequência a disseminação da tecnologia pelo mundo, tendo-se, hoje, notícias de aplicação do ferrocimento, ou de seus materiais originários em muitos países do sul e sudeste asiático, Europa e Américas, principalmente.

No Brasil, a argamassa armada - aqui entendida como fruto do ferro-cimento de Nervi - teve suas primeiras aplicações junto à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, em 1960. Os primeiros perfis prêmoldados analisados revelaram ótimas características de desempenho,

assinalando a formação das primeiras fissuras com deformações da ordem de 1/1000, com o emprego de taxas de armadura compreendidas entre 250 kg/m³ e 300 kg/m³ e consumo de cimento de cerca de 700 kg/m³. Utilizavam-se telas entrelaçadas do tipo "peneira", com fios de 1,25 mm de diâmetro e abertura de malha de 12,7 mm, associadas a barras de aço de 4,8 mm.

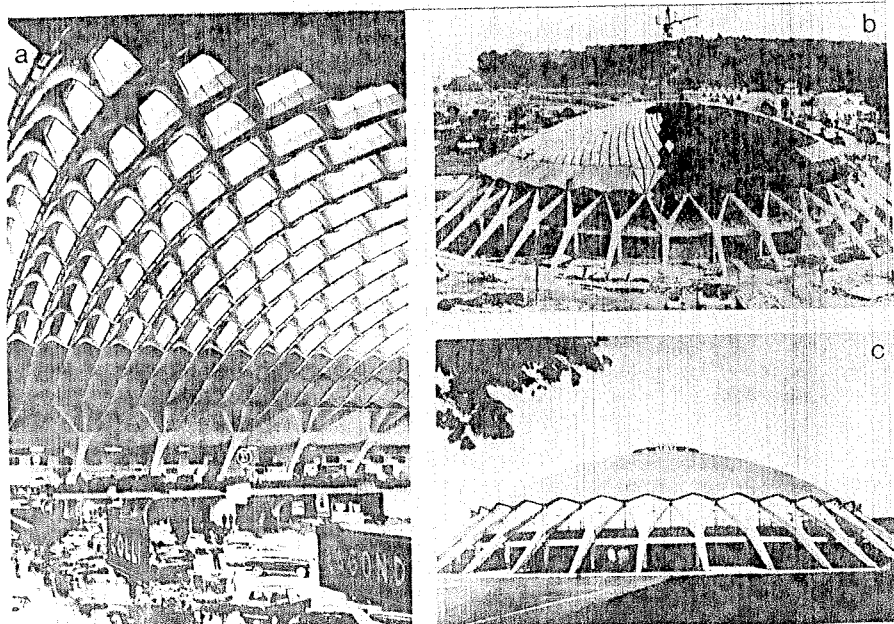


Foto 1.2 - Duas das realizações de Pier Luigi Nervi com o ferro-cimento, no campo da construção civil, onde alcançou a notoriedade:

- a) Palácio de Exposições de Turim - aplicação histórica da argamassa armada, a cobertura cilíndrica, de 95 m de vão foi executada com elementos pré-fabricados de ferro-cimento.
- b) Palacete de Esportes de Roma - aspecto da montagem dos 1620 elementos pré-fabricados de 25 mm de espessura, que compõem a cúpula esférica de cobertura.
- c) Palacete de Esportes de Roma - aspecto final da obra - cúpula esférica de 60 m de diâmetro.

A esta primeira iniciativa, que já trazia em sua essência a preocupação na reelaboração da técnica construtiva do ferro-cimento, procurando adaptá-la às necessidades brasileiras - barateamento dos custos do material, através da redução das taxas de cimento e armadura e simplificação dos sistemas construtivos - somaram-se muitas outras, com

aplicações essencialmente terrestres em coberturas, piscinas e reservatórios etc.

As telas soldadas de fios mais espaçados (diâmetro de 2,7 mm e malha de 50 mm) foram empregadas pela primeira vez nas cascas piramidais para o Centro de Pesquisas do Cacau, em Itabuna - BA (1966), resultando consumo de aço inferior a 100 kg/m². O emprego de telas com tais aberturas não era usual na tecnologia da argamassa armada. Desde as primeiras experiências de Nervi se buscava um sinergismo do material e uma relativa infissurabilidade com a utilização de telas de menores malhas e fios finos. Entretanto, nos estudos iniciais das cascas piramidais, os resultados de ensaios em modelos reduzidos revelaram a ocorrência de deformações específicas bastante baixas. Pode-se, portanto, fazer uso de uma nova idéia: buscar estruturas delgadas, leves pela reduzida quantidade de material empregado, cuja forma dispensava, pela melhor distribuição dos esforços, o alto desempenho do material como dantes.

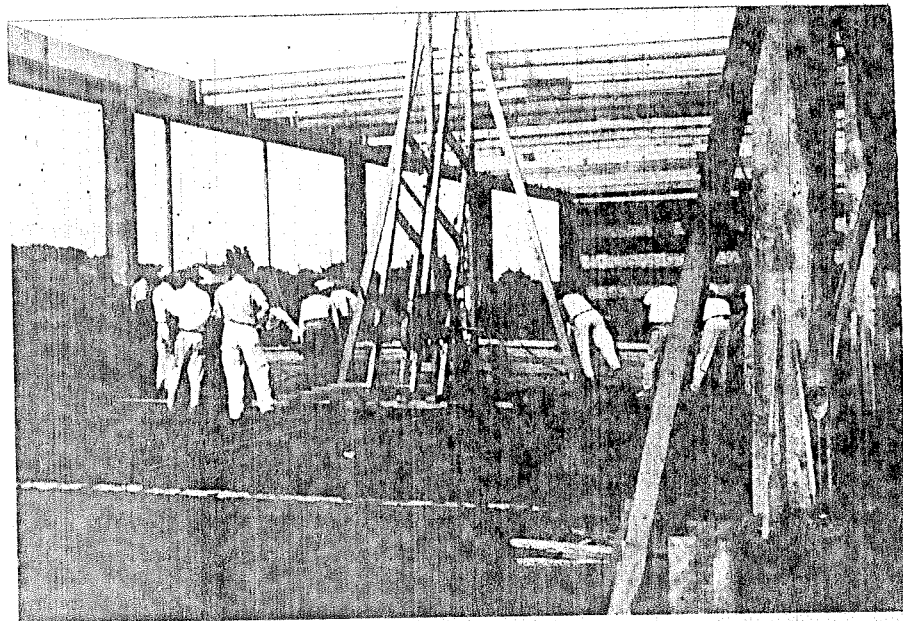


Foto 1.3 - Montagem dos primeiros perfis pré-moldados de argamassa armada, utilizados em instalações da EESC-USP.

Essa iniciativa marca uma etapa importante na evolução brasileira da tecnologia, que então caminhava para uma nova geração, afim à concepção do armocimento - ferrocimento utilizado na União Soviética - que em sua norma de 1967 já era qualificado como um concreto de granulação fina, a ser empregado em peças delgadas de até 30 mm de espessura.

São dessa geração obras importantes como a cobertura da Fábrica de Laticínios de São Carlos - SP (1975), a cobertura do Terminal Rodoviário de Florianópolis - SC (1980) e os reservatórios de Americana - SP e de São Carlos - SP (1980).

Contudo, em muitos desses casos, como por exemplo o das telhas de cobertura da Fábrica de Laticínios de São Carlos, o processo de dimensionamento do material - por conta da "homogeneidade" propiciada a ele pelas taxas e arranjos de armadura adequados - era ainda feito com critérios simples, baseados no comportamento elástico-linear do material e no método das tensões admissíveis.

Em 1980 são feitas as primeiras aplicações em larga escala da argamassa armada no Brasil. O trabalho, conduzido pelo Arq. João Filgueiras Lima (Lelé), consistia inicialmente na pré-fabricação de elementos de argamassa armada, para a urbanização de favelas em Salvador - BA. Na produção das peças de argamassa armada, utilizaram-se telas soldadas de malhas quadradas de 50 mm, por razões que, já na ocasião, julgavam-se importantes e decisivas:

- experiência do então formado Grupo de São Carlos de Pesquisa e Desenvolvimento da Tecnologia da Argamassa Armada na utilização dessas telas, desde 1966;
- possibilidade de redução de custo das telas soldadas como insumo;
- disponibilidade no mercado nacional, em quantidades adequadas à produção industrial;
- características mecânicas superiores, controladas e normalizadas;
- facilidade de adequação às técnicas industrializadas de produção, principalmente no tocante ao posicionamento das armaduras e manutenção de adequados cobrimentos.

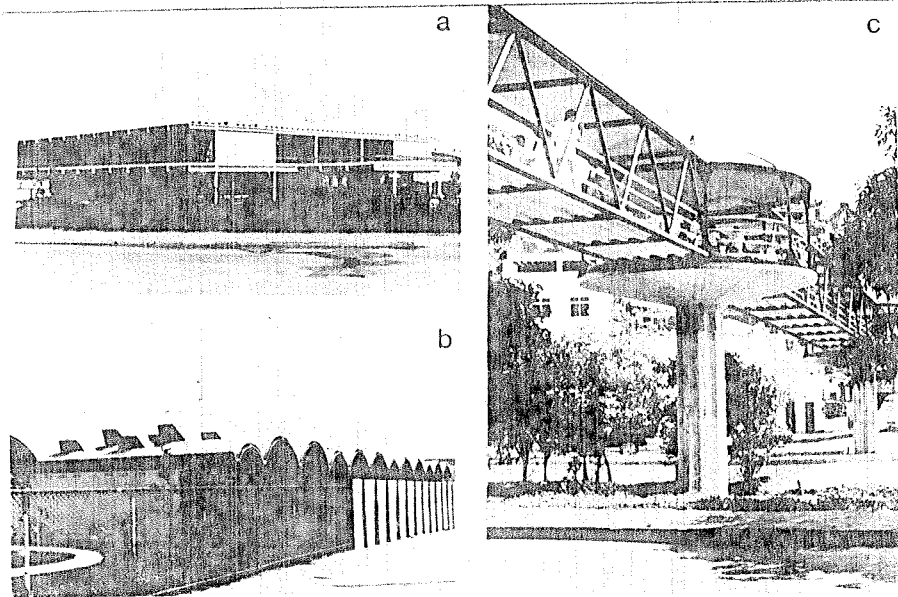


Foto 1.4 - Escola, creche e equipamento urbano executados em argamassa armada por Lelé.

O trabalho de Lelê estendeu-se, posteriormente, à construção de creches, escolas, casas-da-criança e outros equipamentos comunitários (abrigo para paradas de ônibus, passarelas etc.) tanto no Rio de Janeiro - RJ, onde criou e dirigiu a Fábrica de Escolas, quanto em Salvador - BA, onde se encontra atualmente, como consultor técnico da FAEC - Fábrica de Equipamentos Comunitários de Salvador - BA.

Lelê não só criou um valioso acervo de obras de argamassa armada - ricas em detalhes de projeto - como também imprimiu e ainda imprime ao material um desenvolvimento jamais experimentado outrora no Brasil.

Em 1986 instala-se na ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas a comissão de estudos CE 18:05.14 - Projeto e Execução de Argamassa Armada, para normalização do material e de suas técnicas construtivas. Os trabalhos da CE 18:05.14, que tiveram como documento preliminar básico o texto traduzido da norma soviética SN 366/77, já foram concluídos e o Projeto de Norma de Argamassa Armada encontra-se em estágio de votação em âmbito nacional.

Atualmente, passados 28 anos da introdução da tecnologia da argamassa armada no Brasil, nota-se que não foram poucas as modificações implementadas ao material original para sua adaptação aos nossos condicionantes. As reduções iniciais em consumos de cimento e armadura, aliadas às mudanças na tipologia das armaduras básicas e às consequências oriundas do processo de industrialização, fizeram por criar um material genuíno, que, via de regra, não mais se enquadra dentro das formulações gerais propostas para a argamassa armada no meio técnico internacional, mas sim se aproxima cada vez mais do concreto armado, pelo menos do ponto de vista de propriedades mecânicas, tornando-se difícil distinguir um material do outro.

Uma peça de argamassa armada, hoje, pode ser encarada, pura e tão somente, como aquela de pequena espessura - isto é, com espessura menor que 40 mm - composta de argamassa e armadura de telas de aço de malhas de abertura limitada, distribuída em toda a seção transversal, conforme sugere a própria definição do Projeto de Norma de Argamassa Armada.

Contudo, tendo em vista o atual estágio tecnológico vivenciado pelo material, com a finalização dos trabalhos de normalização e com a perspectiva de se ter continuidade a sua aplicação em larga escala, na solução dos mais variados problemas, é de grande urgência e necessidade o diagnóstico de suas propriedades de desempenho mecânico, com o esclarecimento exato de suas poucas particularidades em relação ao concreto armado convencional, para que se possa fazer uma extensão crítica e racional dessa teoria às peças de pequena espessura armadas com telas de abertura limitada.

Este trabalho é uma contribuição inicial na apropriação das propriedades mecânicas do material argamassa armada, quando submetido à solicitações de flexão e tração.

2 OBJETIVOS

Conforme já comentado no cap. 1, as telas soldadas com fios mais espaçados não só fazem parte da história da argamassa armada no Brasil como também se consolidaram como insumo básico no processo produtivo industrializado do material. Todas as fábricas de artefatos de argamassa armada atualmente em operação (Rio de Janeiro, Bahia, Brasília e São Paulo, principalmente) utilizam telas soldadas como armadura básica de suas produções.

Contudo, a argamassa armada, que é produzida em larga escala no Brasil e com provas incontestes de desempenho estrutural satisfatório, quase que invariavelmente não se enquadra dentro das formulações gerais até então propostas pelo meio técnico internacional.

De fato, de uma rápida análise da bibliografia disponível sobre o assunto, nota-se de pronto que existe uma lacuna de conhecimentos sobre o desempenho do material, quando armado com telas soldadas de fios mais espaçados.

O grupo de pesquisadores americanos, representado principalmente por S. P. Shah, A. E. Naaman, P. N. Balaguru, S. Somayaji e D. Logan, vem estudando desde 1970 o desempenho mecânico da argamassa armada. Tem contemplado, de maneira geral, as telas tecidas de malha quadrada ou hexagonal e, eventualmente, as telas soldadas. No caso específico dessas últimas, as telas sempre são constituídas por fios bastante finos e pouco espaçados e o consumo de armaduras invariavelmente ultrapassa os 200 kg/m³.

Em trabalho de 1979, Naaman (23), apresentando diretrizes gerais para o projeto e execução de argamassa armada, sugere os seguintes limites para as armaduras difusas - que podem ser de telas tecidas, soldadas ou de metal expandido:

- diâmetro do fio ou do cordão: de 0,5 mm a 1,5 mm
- abertura de malha: de 6 mm a 25 mm

Balaguru (11), na avaliação teórica da abertura de fissuras para a argamassa armada, encaminha o equacionamento para as telas de pequena abertura; segundo o pesquisador, isso atenderia a 95 % dos casos de aplicação do material.

Os trabalhos técnicos desenvolvidos pelo "núcleo asiático", constituído por G. V. Surya Kumar, F. C. Sharma, K. Rajagopalan, V. S. Parameswaran, R. P. Pama, M. A. Mansur, F. Paramasivam e outros, contemplam quase que exclusivamente as telas tecidas. Os fios das telas têm diâmetro máximo de 1,4 mm e as aberturas de malha variam de 8,5 mm a 12,5 mm.

Pesquisadores do Reino Unido (R. N. Swamy), Canadá (C. D. Johnston, D. N. Nowat e S. G. Mattar) e outros países têm estudado a argamassa armada com tipologia e arranjo de armaduras também distintos dos adotados no Brasil.

Portanto, para que se possa permitir um desenvolvimento consistente e continuado da tecnologia da argamassa armada no

Brasil, é de extrema importância a realização sistemática de ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do material, preenchendo-se essa lacuna de conhecimentos existente atualmente. Mais ainda, esse trabalho, com a qualidade e a responsabilidade de primigênio que detêm, deve, na medida do possível, estruturar um completo arquivo de dados a esse respeito, para servir de apoio a outras pesquisas consequentes.

Na busca desse intento, este trabalho ora apresentado tem os seguintes objetivos:

- realizar, de forma sistemática, ensaios de flexão e tração em corpos de prova de argamassa armada com telas soldadas, observando suas propriedades mecânicas principais;
- estruturar um completo arquivo de dados que possa servir de comprovação prática para outros comportamentos físico-mecânicos do material, não contemplados neste estudo e atualmente em desenvolvimento por outros pesquisadores;
- analisar os resultados experimentais obtidos, dando tratamento estatístico adequado para futuras interpretações probabilísticas de desempenho estrutural;
- comparar os resultados obtidos com a formulação geral de concreto armado e com aquelas de outros pesquisadores da área.

3 PROGRAMACAO DOS ENSAIOS

O desenvolvimento dos ensaios passou por uma etapa preliminar de programação, onde foram estudadas e fixadas as principais características dos modelos a ensaiar, bem como o número de exemplares representativos de cada modelo.

3.1 Definição das Características dos Modelos

3.1.1 Argamassa

A argamassa utilizada na execução dos modelos foi obtida pela mistura homogênea de cimento portland, agregado miúdo e água. No proporcionamento dessa mistura, seguindo a grande maioria das obras já existentes com argamassa armada no Brasil, o traço empregado foi de 1:2, em massa, com relação água/cimento igual a 0,40. Disto resultou uma argamassa com consumo de aproximadamente 680 kg de cimento por metro cúbico.

O cimento portland empregado foi do tipo comum, classe CP-32, marcas Votoran ou Itaã.

Como agregado miúdo utilizou-se areia natural, enquadrada como areia média dentro dos limites granulométricos da NBR 7211 - "Agregado para concreto" (5). Para utilização nos modelos, este agregado foi secado e "cortado" na peneira com abertura de malha de 3 mm (fig. 3.1).

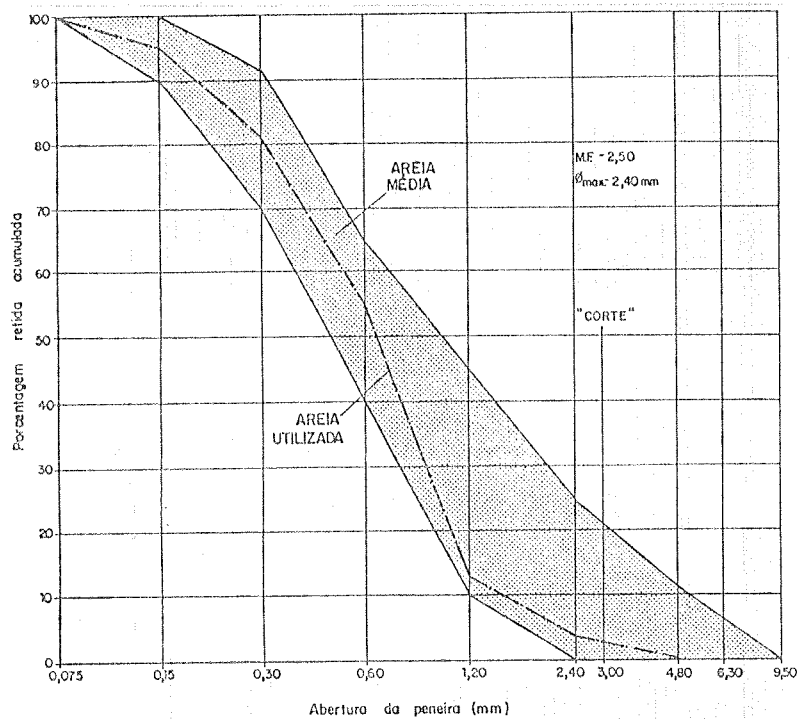


Fig. 3.1.- Curva granulométrica da areia utilizada nos ensaios e o seu enquadramento dentro dos limites granulométricos definidos pela NBR 7211 para areia média.

3.1.2 Armadura difusa: tipos e arranjos

Conforme já descrito no capítulo 2, pretendeu-se dar enfoque específico ao uso de telas soldadas como armadura difusa. Com esta opção, passou-se ao tratamento e à escolha de parâmetros relativos a elas, procurando sempre trabalhar com tipos e arranjos de telas soldadas usuais na prática da argamassa armada.

Desde sua introdução no Brasil, a argamassa armada tem invariavelmente trabalhado com armaduras difusas (telas) de fios finos e malhas de abertura limitada. Acompanhando esta tendência já consagrada e característica do material, procurou-se os tipos de telas soldadas disponíveis no mercado que apresentassem tais propriedades, que fossem técnica e economicamente viáveis e de uso específico e corrente na construção civil--pelos condicionantes impostos, a escolha acabou elegendo os tipos de tela que são utilizados em todas as centrais de pré-fabricação de argamassa armada no Brasil, fato bastante interessante.

Foram empregados dois tipos de telas soldadas com fios de aço CA-60B, fornecidas pela TELCON - Indústria e Comércio S.A.

- tela EQ 98, com fios de diâmetro igual à 2.5 mm e malhas quadradas com abertura de 50 mm x 50 mm;
- tela EL 196/98, com fios de diâmetro igual a 2.5 mm e malhas retangulares com abertura de 25 mm x 50 mm. (*)

Com essas telas foram estudados arranjos representativos das armaduras usuais de argamassa armada.

O primeiro dos arranjos, referenciado como Tipo I (fig. 3.2), compreendeu as peças de argamassa armada com uma única tela. Constituído-se no mais simples dos arranjos, representou as peças pouco armadas, utilizadas em geral em situações de baixa solicitação mecânica, como é o caso de componentes de vedação e fechamento lateral.

(*) - Nas designações de telas acima feitas, seguindo-se o preconizado pela NBR 7481 - "Tela de aço soldada para armadura de concreto" (7), faz-se a identificação como no exemplo:

TELA EL 126/63

E - tela especial, por utilizar fios de diâmetros menores que os padronizados;

L - armadura principal na direção longitudinal de fabricação da tela -- quando do uso de telas de malhas quadradas, a letra Q indica que não há distinção entre a armadura longitudinal e transversal da tela;

126 - área, em mm²/m, da seção principal da armadura;

63 - área, em mm²/m, da seção secundária da armadura.

O segundo tipo de arranjo de armaduras, referenciado como Tipo II, é também de emprego frequente nas peças de argamassa armada. Constituiu-se de duas telas soldadas, que podem estar justapostas, com as malhas desencontradas (fig. 3.3) ou dispostas em planos paralelos, com espaçamento variável entre eles, obtendo-se modelos de espessuras diversas (fig. 3.4).

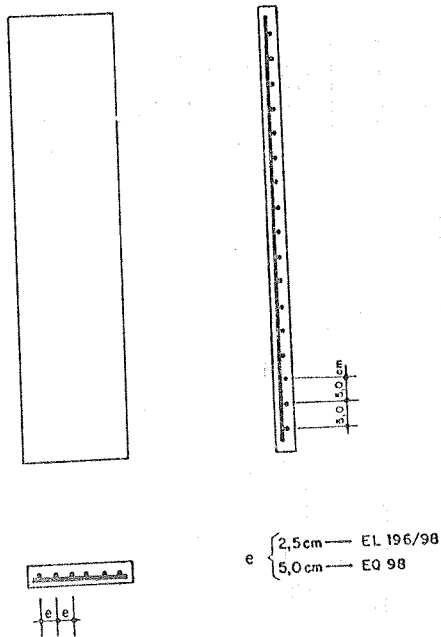


Fig. 3.2 - Arranjo de armaduras tipo I.

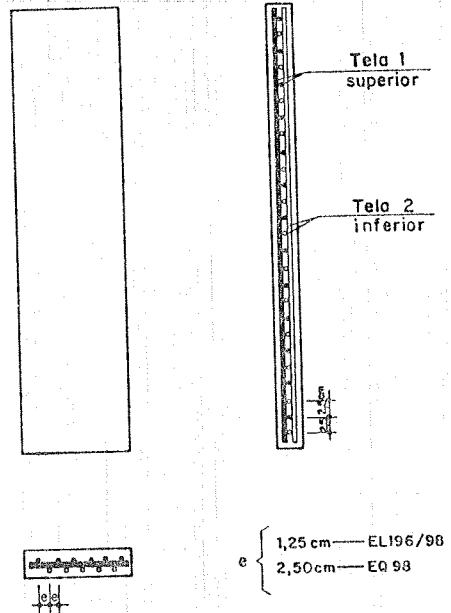
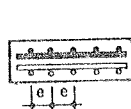
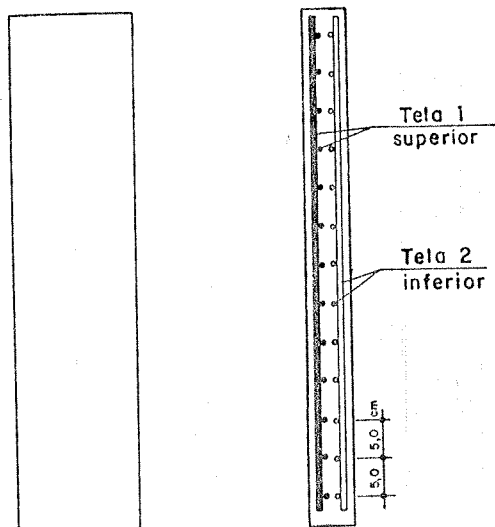
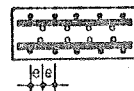
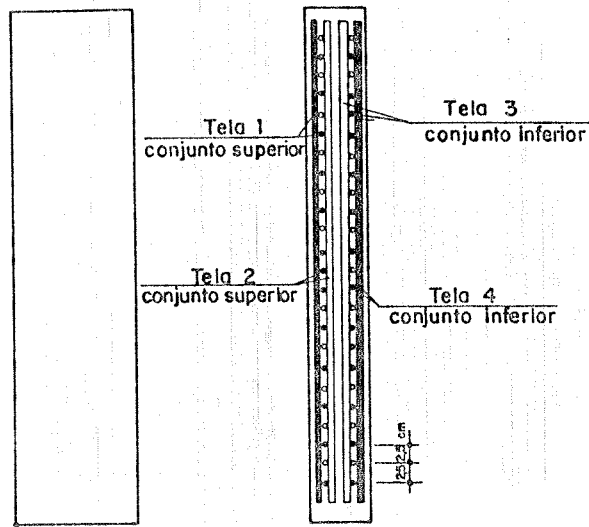


Fig. 3.3 - Arranjo de armaduras tipo II: malhas desencontradas

No arranjo Tipo III, tentou-se representar as peças de argamassa armada mais fortemente armadas. Esse arranjo pode ser indicado para elementos estruturais com solicitações elevadas e que necessitem, por razões diversas, de maior espessura. Constituiu-se de dois conjuntos, de duas telas justapostas (malhas desencontradas) cada, dispostos em planos paralelos, com espaçamento variável entre si (fig. 3.5).



e { 2,5 cm — EL 196/98
5,0 cm — EQ 98



e { 1,25 cm — EL 196/98
2,50 cm — EQ 98

Fig. 3.4 - Arranjo de armaduras tipo II:
malhas sobrepostas

Fig. 3.5 - Arranjo de armaduras tipo III.

3.1.3 Armadura difusa: posicionamento

Em todos os arranjos estudados adotou-se para as armaduras um cobrimento nominal de argamassa de 5 mm, valor considerado representativo das situações de projeto. Com relação a esse cobrimento, a Norma Soviética SN-366/77 (32) adota valores de até 4mm, admitindo ainda erros de posicionamento de mais ou menos 2mm; o documento italiano "Raccomandazioni tecniche per l'impiego del ferrocemento", elaborado pela Commissione A.I.C.A.P. "Calcestruzzi Speciali" (33), exige cobrimento mínimo de 2mm para os casos gerais, ressaltando a necessidade de se aumentar esse valor para 4mm nos casos de utilização de armadura não galvanizada em ambientes agressivos; por fim, o GRUPO DE SÃO CARLOS e a grande maioria das obras existentes no Brasil têm empregado cobrimentos nominais de 5 mm a 7 mm.

Nos arranjos de armaduras com mais de uma tela, o espaçamento "e" entre elas foi escolhido procurando-se obter espessuras finais dos modelos que encontrassem aplicabilidade prática e ao mesmo tempo conferissem variações adequadas nas taxas de armadura e outros parâmetros de avaliação das propriedades mecânicas. Fixando-se o cobrimento das

armaduras, o diâmetro dos fios das telas e o espaçamento entre as diversas telas constituintes de alguns arranjos (tipos II e III) resultaram modelos com espessuras finais de 15 mm, 17,5 mm, 25 mm, 30 mm e 35 mm.

A Tabela 3.1 resume as principais características dos modelos elaborados para os ensaios de flexão e tração. Em cada linha tem-se uma série representativa de um modelo. Assim, por exemplo, o arranjo de telas Tipo I compreende 3 séries para cada solicitação. A primeira série diz respeito ao modelo concebido com telas de malha quadrada, a segunda ao modelo com telas de malha retangular, e a terceira referencia o modelo sem armaduras para essa espessura.

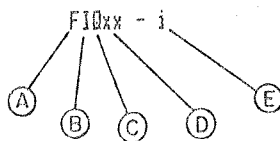
Nos gráficos 3.1 a 3.4 mostra-se, em função dos arranjos de armaduras eleitos, as dispersões obtidas nos valores de parâmetros como taxa geométrica de armadura (β), taxa superficial de armadura - ou seja, a área da superfície de armadura em contato com a argamassa - medida por unidade de volume de argamassa e considerada em termos globais (A_{m1}) - fios longitudinais e transversais - e/ou em termos parciais (A_{m11}) - somente fios longitudinais e o consumo de armadura.

Muitos pesquisadores, notadamente os internacionais, têm equacionado as propriedades mecânicas do material argamassa armada com base na avaliação desses parâmetros.

arran. tipo	tela com malha	espes. (mm)	serie	parâmetros			cons. aço (kg/m ³)	série	parâmetros			cons. aço (kg/m ³)
				ρ (%)	A_{u1} (cm ⁻¹)	A_{u21} (cm ⁻¹)			ρ (%)	A_{u1} (cm ⁻¹)	A_{u21} (cm ⁻¹)	
F L E X A O							T R A C A O					
I	quadrada		FI015	0,78	0,2492	0,1246	109	TI015	0,89	0,2856	0,1428	117
	retangular	15	FIR15	1,40	0,3366	0,2244	158	TIR15	1,49	0,3570	0,2380	163
	--		F15	--	--	--	--	T15	--	--	--	--
	quadrada		FI1017.5	1,20	0,3846	0,1923	177	TI1017.5	1,27	0,4080	0,2040	180
	retangular	17,5	FI1R17.5	2,27	0,5450	0,3633	260	TI1R17.5	2,29	0,5508	0,3672	260
	--		F17.5	--	--	--	--	T17.5	--	--	--	--
II	quadrada		FI1025	0,93	0,2992	0,1496	131	TI1025	1,07	0,3427	0,1714	140
	retangular	25	FI1R25	1,68	0,4040	0,2693	190	TI1R25	1,78	0,4284	0,2856	196
	--		F25	--	--	--	--	T25	--	--	--	--
	quadrada		FI1030	0,78	0,2492	0,1246	109	TI1030	0,89	0,2856	0,1428	117
	retangular	30	FI1R30	1,40	0,3366	0,2244	158	TI1R30	1,49	0,3570	0,2380	163
	--		F30	--	--	--	--	T30	--	--	--	--
III	quadrada		FI11035	1,20	0,3846	0,1923	177	TI11035	1,27	0,4080	0,2040	180
	retangular	35	FI1R35	2,27	0,5450	0,3633	260	TI1R35	2,29	0,5508	0,3672	260
	--		F35	--	--	--	--	T35	--	--	--	--

Nota:

Na identificação das peças adotou-se a seguinte nomenclatura:



A - TIPO DE SOLICITAÇÃO: F - flexão
T - tração

B - ARRANJO DA ARMADURA: I - arranjo tipo I
II - arranjo tipo II
III - arranjo tipo III
(* - a ausência de indicação referencia
peça não armada

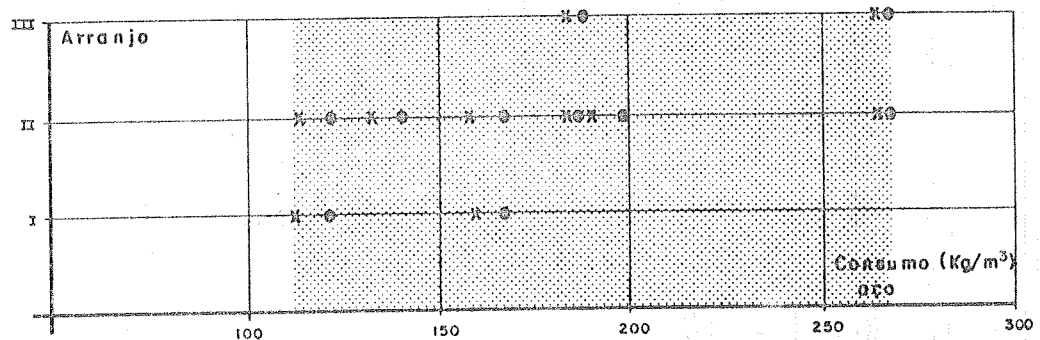
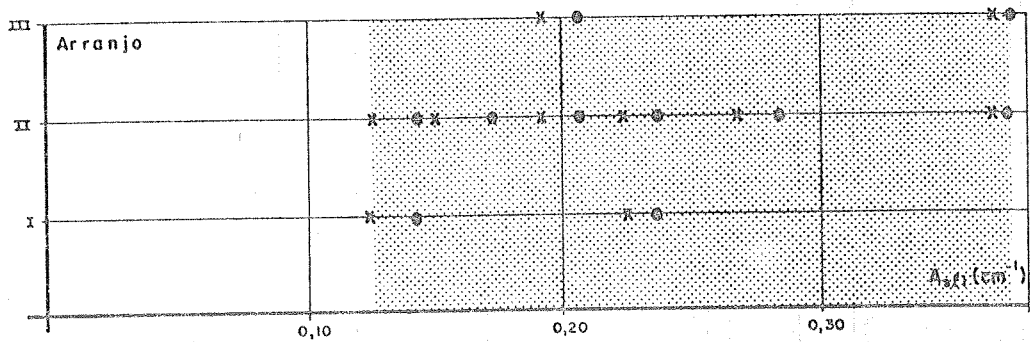
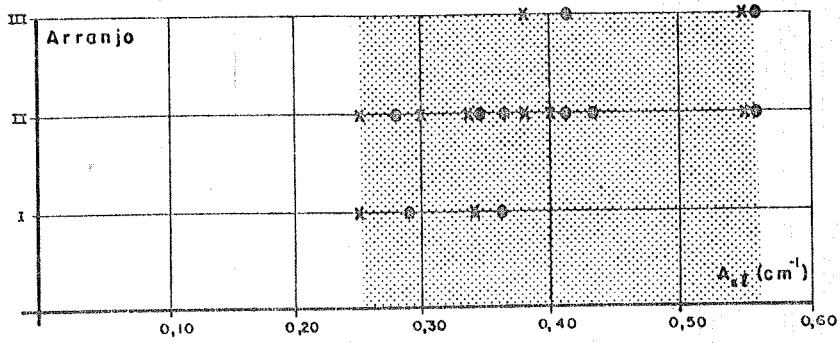
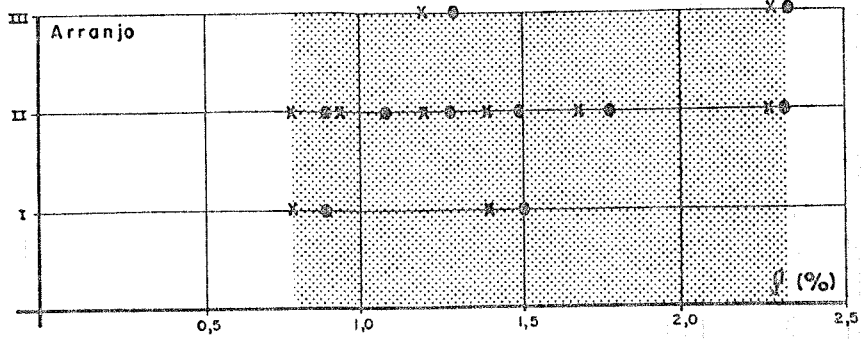
C - TIPO DE MALHA: Q - quadrada
R - retangular

D - ESPESSURA DO MODELO (em mm): 15;17,5;25;30;35

E - NUMERO DA PEÇA DENTRO DE SUA SERIE: 1, 2, 3 ou 4

Tab. 3.1 - Características dos modelos ensaiados.

X - flexão
 O - tração



Draf. 3.1 a 3.4 - Variação da taxa geométrica de armadura (ρ), taxa superficial de armadura global e parcial (A_{st} e A_{st1} , respectivamente) e consumo de aço, em função dos arranjos de armaduras eleitos.

3.1.4 Número de exemplares por modelo

O número de exemplares por modelo foi estabelecido com base em experiência adquirida em ensaios similares realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo e em orientações dadas pelo Prof. Jorge Dishi, consultor de estatística e docente do Departamento de Estatística da UFSCar - Universidade Federal de São Carlos.

Em se considerando as condições do problema (boa qualidade dos ensaios, comportamento previsível do material etc.), estabeleceu-se em quatro o número de peças a serem ensaiadas em cada série.

Sobre todos os resultados de ensaio, para efeito de obtenção da média dos comportamentos para um dado modelo, aplicou-se o critério de aceitação ou rejeição de amostras de Chauvenet, que postula:

"Se em uma série de "n" medidas a probabilidade de ocorrência de um desvio de valor "x" é menor que $1/2n$, então a medida que apresentar tal desvio deverá ser rejeitada".

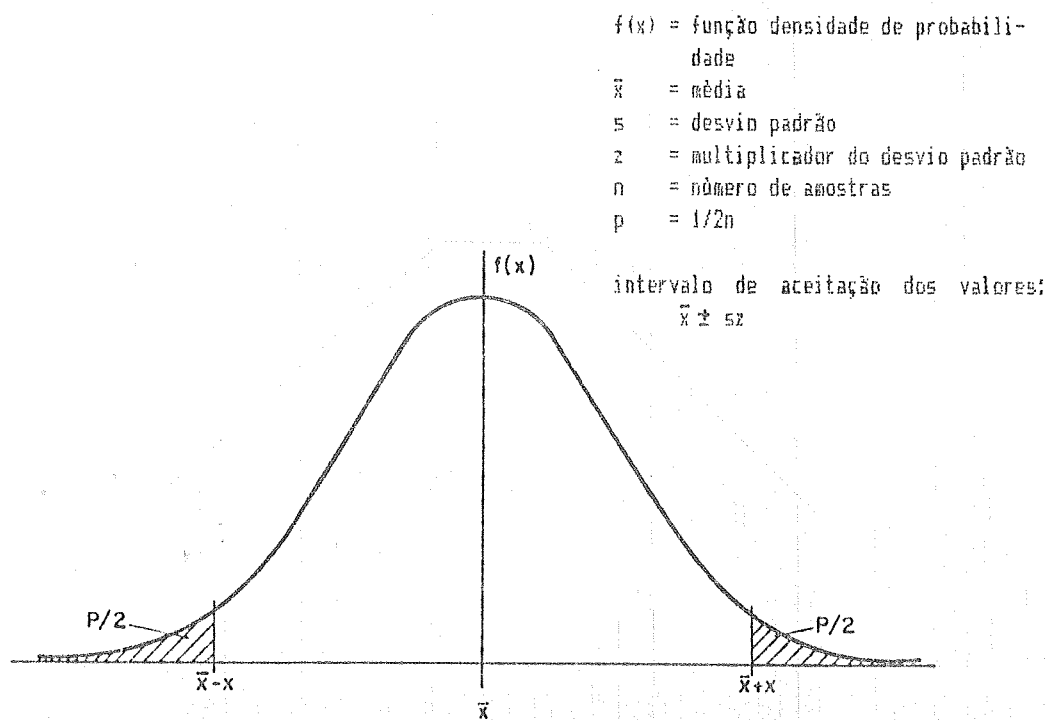


Fig. 3.6 - Aplicação do critério de Chauvenet em amostragem com distribuição normal.

3.2 Fenômenos a Observar

Nos dois tipos de ensaios realizados (flexão e tração) aplicou-se carregamento às peças até que elas atingissem a ruptura. Ao longo das etapas de carregamento compreendidas nos ensaios, foram sendo acompanhados os deslocamentos e as deformações das peças. Foram observadas a carga responsável pelo aparecimento da primeira fissura visível e a carga de ruptura das peças. A partir da carga de fissuração, ao longo das etapas seguintes de carregamento, foi feita uma avaliação sistemática da fissuração, através da medição da abertura máxima e espaçamento médio das fissuras.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 Ensaio de Flexão

4.1.1 Descrição dos ensaios

Os ensaios de flexão foram realizados com a aplicação de carga em vigas livremente apoiadas, medindo-se os deslocamentos transversais e as deformações específicas correspondentes às diversas etapas de carregamento. Foram observadas também a trajetória e a abertura de fissuras, cuja dimensão foi avaliada com auxílio de lupa comparadora Mitutoyo.

A amostragem total constituiu-se de 15 séries de peças -- particularizadas nesse ensaio com o nome de vigas -- sendo 10 séries com armaduras distintas e 5 séries sem armadura.

Conforme já ilustrado na Tabela 3.1, a escolha dos arranjos de armadura resultou em 5 diferentes espessuras. Para cada espessura da viga foram ensaiadas 2 séries armadas (uma com tela de malha quadrada - EQ 98 - e outra com tela de malha retangular - EL 196/98), e uma série não armada.

Em cada série ensaiaram-se 4 vigas, totalizando assim 60 peças (15 séries de 4 peças).

Todas as quatro vigas de cada série foram executadas com a mesma argamassa, em idênticas condições de moldagem, adensamento, desmoldagem e cura.

4.1.2 Dimensões das peças

A espessura das vigas foi variável de acordo com as disposições de armaduras nos vários arranjos adotados.

O comprimento dos exemplares de flexão foi de 1,00 m, definindo-se para ensaio um vão teórico de 0,90 m.

A largura desses exemplares (vigas) foi de 0,21 m (fig.4.1). Esta dimensão foi adotada para que as peças tivessem, ao longo de sua largura, um número razoável de malhas que permitissem a manifestação de qualquer interferência dos fios transversais (as malhas possuem, nessa direção, aberturas de 0,025 m ou 0,05 m). A folga de 0,01 m na largura final foi propositadamente deixada para que os fios transversais não facessem as laterais da peça.

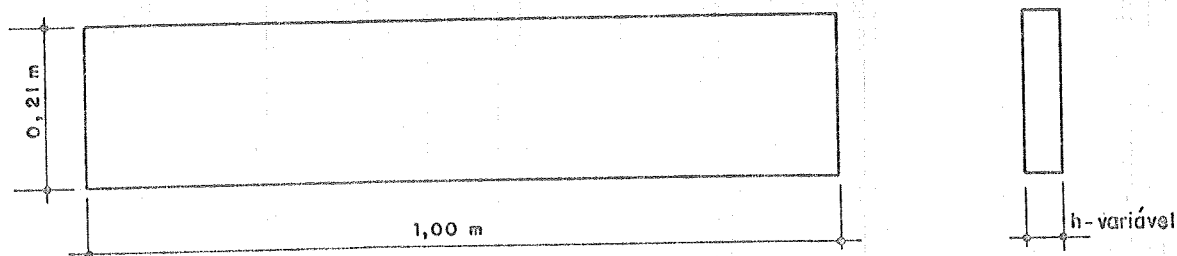


Fig. 4.1 - Dimensões das vigas.

Adotadas essas dimensões e considerando-se o encaixe de telas -- possíveis nos arranjos II e III --, o corte e a nomenclatura dos fios das telas ficaram assim definidos:

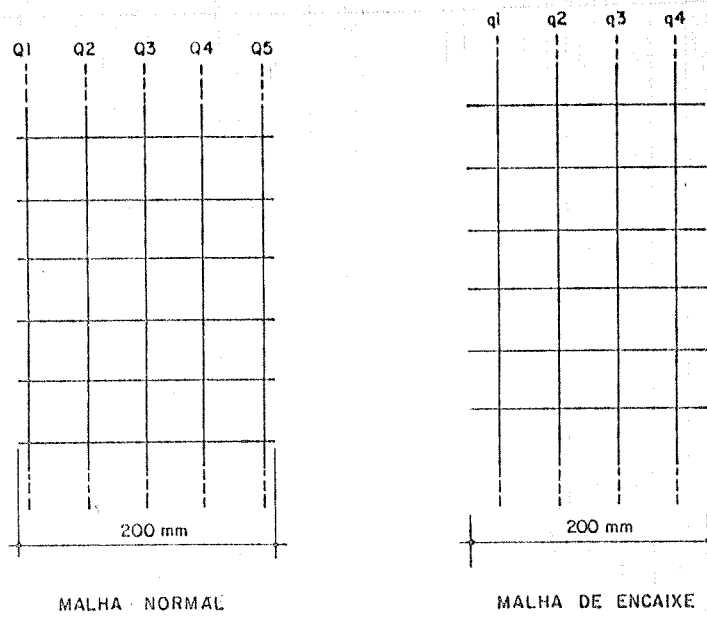


Fig. 4.2 - Corte e nomenclatura dos fios da tela de malha quadrada - EQ 98.

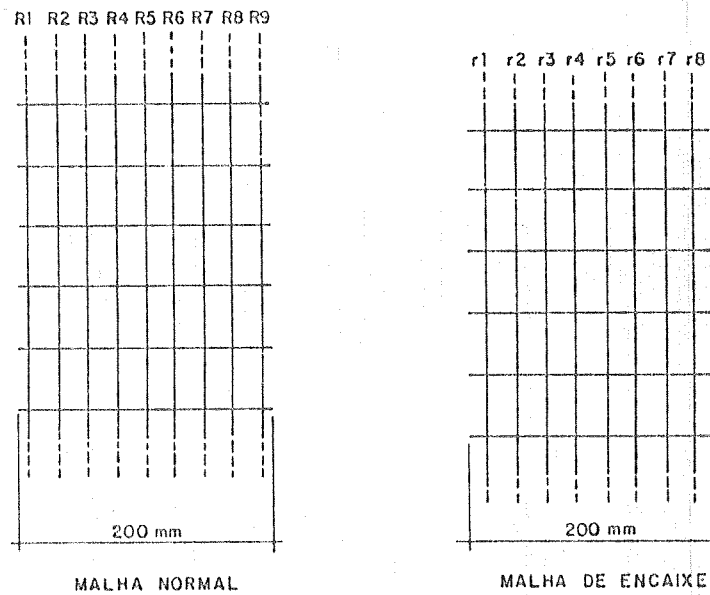


Fig. 4.3 - Corte e nomenclatura dos fios da tela de malha retangular - EL 196/98.

A fig. 4.4 sugere a posição da viga relativamente à solicitação de flexão introduzida.

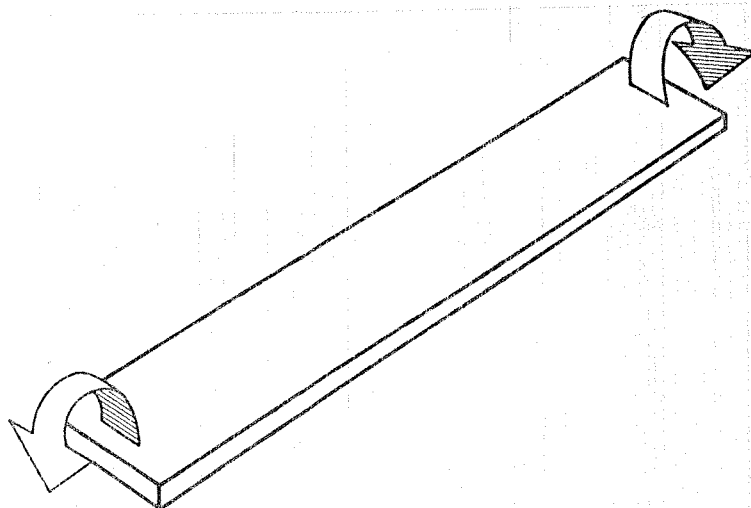


Fig. 4.4 - Solicitação de flexão na viga.

4.1.3 Esquema estático e de carregamento

O esquema estático adotado para os ensaios de flexão foi o de uma viga livremente apoiada, conforme mostra a fig. 4.5.

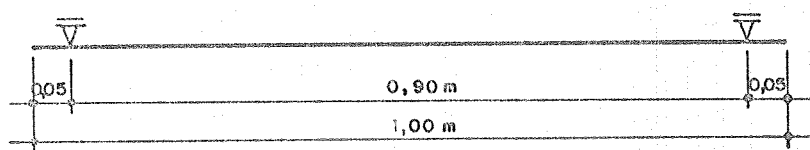


Fig. 4.5 - Esquema estático dos ensaios de flexão.

Foi resultante da concepção de um pórtico "pendular" (fig. 4.6) que em muito facilitou na execução sistemática dos ensaios, contornando uma série de problemas anteriormente enfrentados em trabalhos semelhantes (15). Devido à grande flexibilidade das vigas de argamassa armada (flechas de até 1/10 do vão teórico, próximo da ruptura), os ensaios invariavelmente acabavam precocemente, com problemas de instabilidade nos aparelhos de apoio tradicionais (roletes) que tinham tendência a sair totalmente fora da posição.

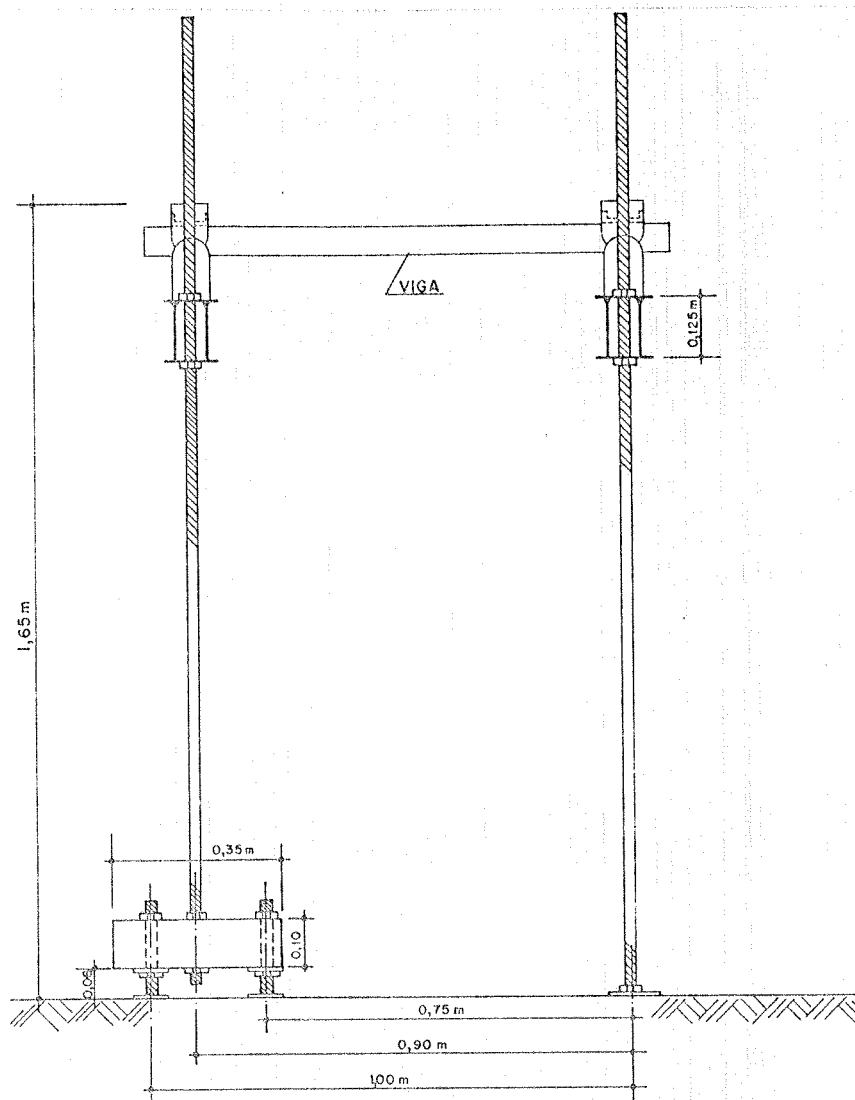


Fig. 4.6 - Pórtico "pendular" utilizado nos ensaios de flexão. Idealizado com varões de aço flexíveis, engastados em suas bases, permitiu a realização ininterrupta dos ensaios de flexão até se atingir a carga de ruptura das vigas, sem que se manifestasse qualquer perda de estabilidade dos aparelhos de apoio.

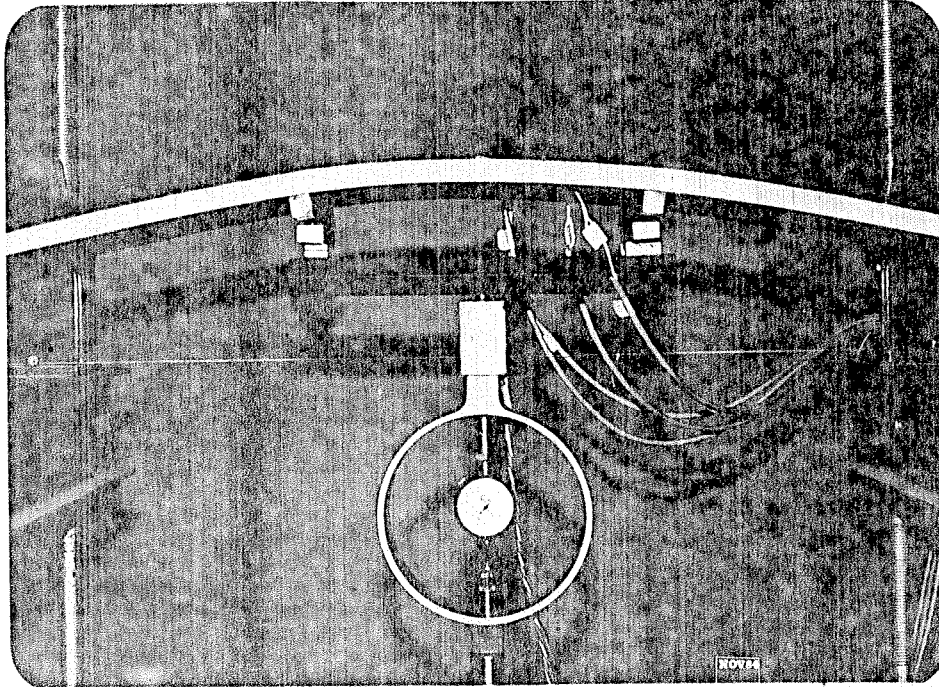


Foto 4.1 - Mostra da flexibilidade das vigas ensaiadas.

Com este dispositivo e com a utilização de pequenos calços, foi possível ainda fazer com que o centro de rotação dos apoios coincidisse com o plano médio das vigas.

O carregamento foi introduzido de baixo para cima concentrando-se cargas nos terços do vão teórico (fig. 4.7). Esta inversão no sentido do carregamento veio a facilitar a observação e acompanhamento das fissuras (foto 4.2).

Utilizou-se de um macaco hidráulico com anel dinâmico e célula elétrica de carga acoplados.

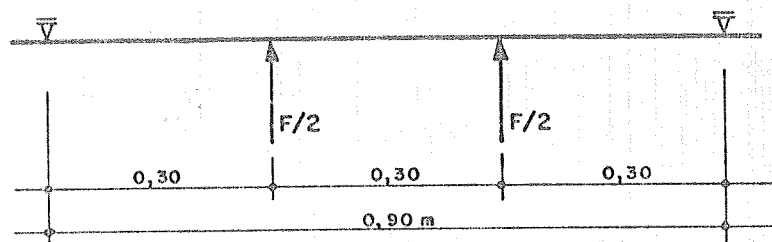


Fig. 4.7 - Esquema de carregamento dos ensaios de flexão.

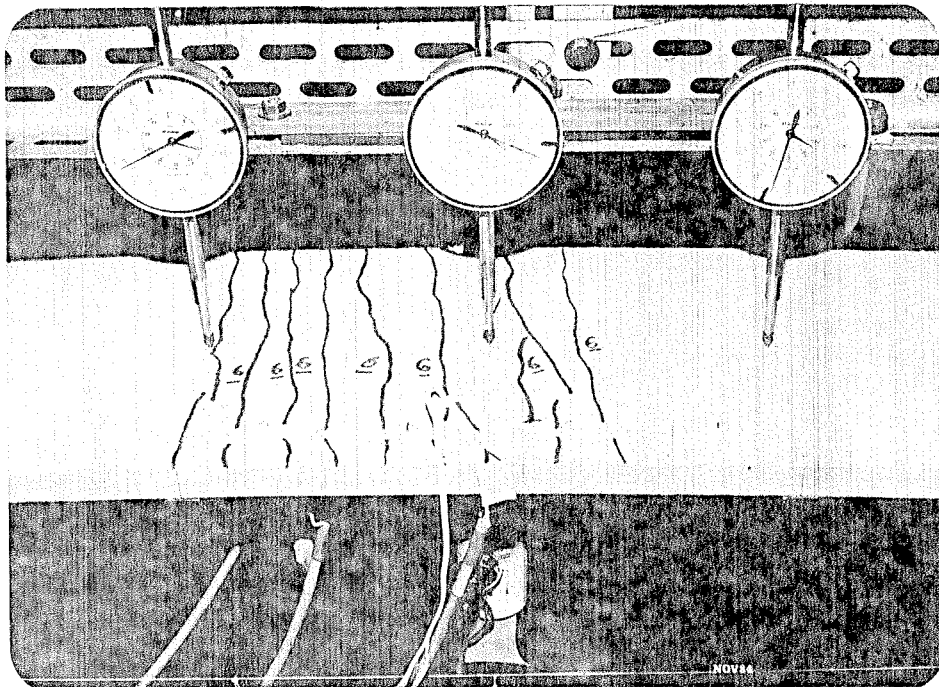


Foto 4.2 - Fissuração em desenvolvimento.

O planejamento de ensaio foi feito para um carregamento máximo assim obtido: de início, calculou-se teoricamente a carga de ruptura da série, seguindo as hipóteses adotadas pela NBR 6118 - "Projeto e execução de obras de concreto armado" (3), para o cálculo no estado limite último de peça equivalente em concreto armado; a seguir, adotou-se como carga máxima planejada de ensaio 1,5 vezes esse valor, que deveria ser atingido em 15 etapas de carregamento.

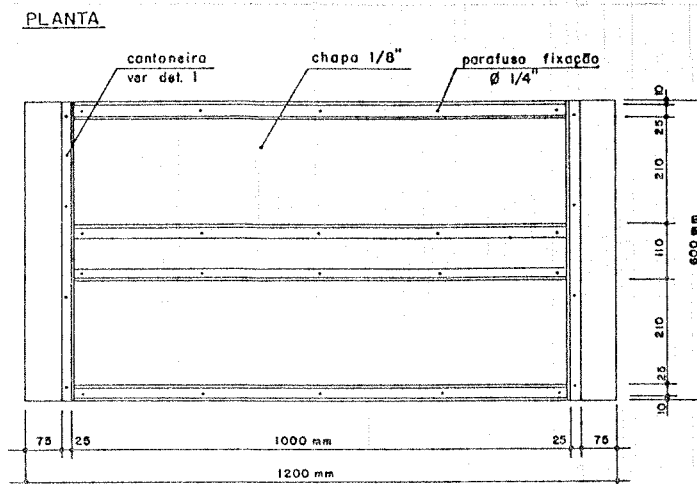
Nos casos em que a carga máxima planejada de ensaio fosse inferior à carga real de ruptura do exemplar, esta última seria atingida em uma etapa única e final de carregamento.

Em todos os ensaios, para acomodação e escorvamento das vigas e do pórtico de reação, foi inicialmente aplicada uma carga, equivalente a aproximadamente 15% da carga máxima planejada, seguindo-se posterior descarga. A partir de então, o ensaio era reiniciado, seguindo-se as etapas crescentes de carregamento.

4.1.4 Fôrmas

Na execução das peças para ensaio, utilizou-se de fôrmas metálicas. As quatro vigas de uma mesma série eram executadas concomitantemente, através de dois conjuntos de fôrmas.

As principais características de um conjunto de fôrmas estão ilustradas na fig. 4.8.



DETALHE 1

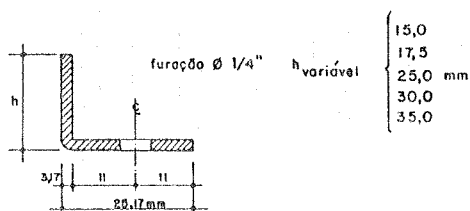


Fig. 4.8 - Fôrmas para execução das vigas.

4.1.5 Moldagem, adensamento e cura

Para a moldagem das vigas, as várias telas que compunham os arranjos de armadura foram amarradas, formando um conjunto único. O cobrimento das armaduras foi obtido com o uso de pequenos discos de borracha, confeccionadas no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

No adensamento da argamassa utilizou-se uma mesa vibratória. O tempo total de vibração de cada conjunto de fôrmas foi de aproximadamente 1min30s.

A cura até o terceiro dia de idade das peças foi feita colocando-se uma manta de espuma úmida sobre as fôrmas. Após três dias, as peças foram desmoldadas e colocadas num tanque d'água, onde permaneceram submersas até 21 dias de idade, quando eram retiradas para instrumentação. Procurou-se, sempre que possível, realizar os ensaio das peças aos 28 dias de idade.

4.1.6 Instrumentação

a) medição dos deslocamentos

Os deslocamentos transversais das vigas foram medidos com defletômetros mecânicos Mitutoyo, de sensibilidade de 0,01 mm e fundo de escala de 50 mm. Os defletômetros foram posicionados conforme mostra a fig. 4.9. A partir de uma certa etapa de carregamento, quando os deslocamentos observados ultrapassavam o fundo de escala dos defletômetros, estes eram retirados e a avaliação dos deslocamentos transversais passava a ser feita com o uso de uma escala graduada.

DESLOCAMENTOS - Instrumentação

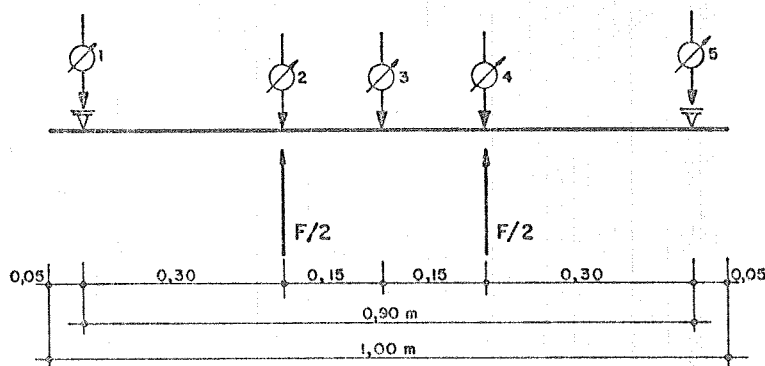


Fig. 4.9 - Posicionamento dos defletômetros para medição dos deslocamentos transversais.

Na medição dos deslocamentos, utilizou-se também um defletômetro elétrico indutivo no meio do vão, o qual foi acoplado, juntamente com a célula elétrica de carga, a um registrador X-Y para obtenção de diagrama carga-flecha. Este dispositivo permitiu determinar com exatidão a carga de fissuração das vigas.

b) medição das deformações

A medição de deformações das vigas, na face tracionada, foi efetuada por meio de 2 extensômetros mecânicos, dispostos um em cada lado da peça, no meio do vão.

Para medição das deformações na face comprimida e nas armaduras, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência. Na armadura foram dispostos 2 extensômetros na tela 1 (tela mais tracionada no ensaio), no meio do vão, nos fios 02 e 04 -- no caso de malha quadrada -- e R3 e R7 -- no caso de malha retangular (ver figs. 4.2 e 4.3). Na face comprimida foram utilizados 2 extensômetros no meio do vão, dispostos a 5 cm de cada um dos lados da peça.

DEFORMAÇÕES - Instrumentação

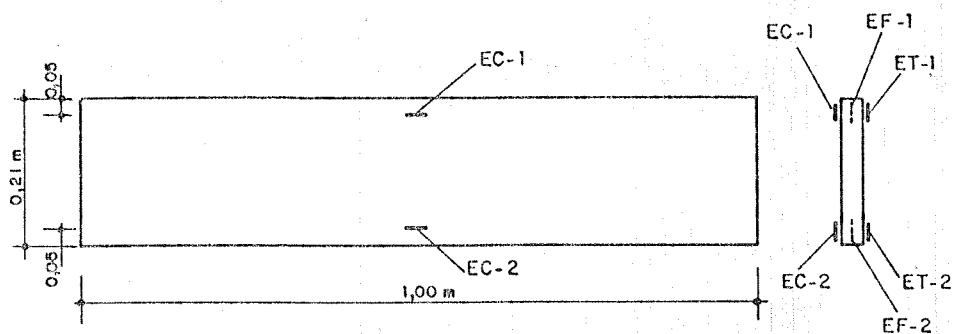


Fig. 4.10 - Posicionamento dos extensômetros elétricos e mecânicos para medição das deformações:

ET-1 e ET-2 - extensômetros mecânicos - deformações na face tracionada da argamassa;

EC-1 e EC-2 - extensômetros elétricos - deformações na face comprimida da argamassa;

EF-1 e EF-2 - extensômetros elétricos - deformações na armadura tracionada

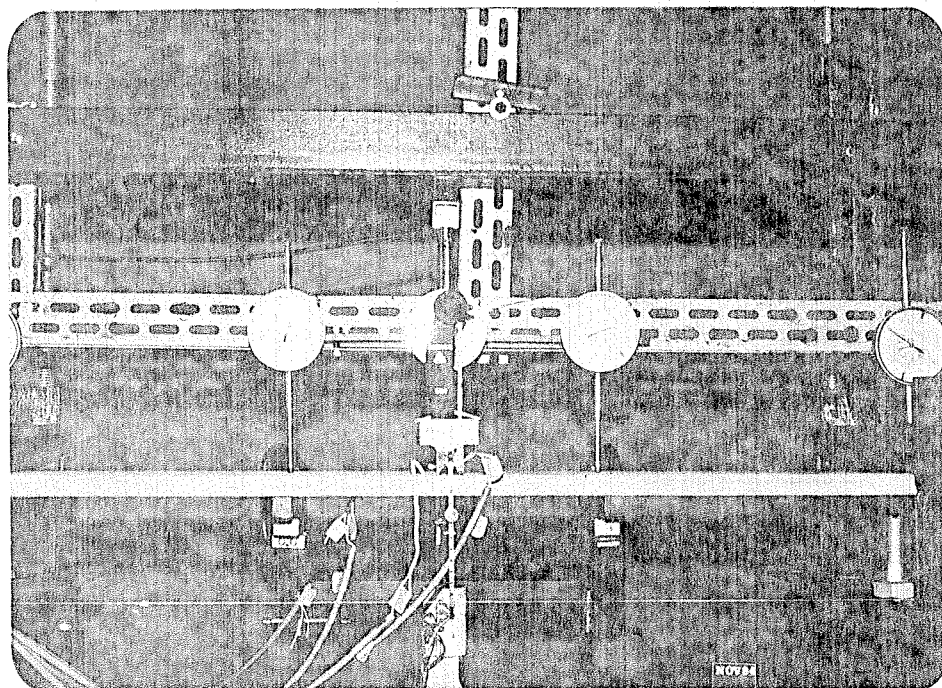


Foto 4.3 - Vista geral da instrumentação posicionada em viga a ser ensaiada à flexão. A frente do defletômetro central está posicionado o extensômetro mecânico para medição dos alongamentos da argamassa.

4.2 Ensaio de Tração

4.2.1 Descrição dos ensaios

Os ensaios de tração mereceram cuidadoso estudo.

No seu planejamento tinha-se como preocupação a obtenção de tração simples em peças -- aqui particularizadas com o nome de chapas -- através da aplicação de cargas axiais. Entretanto, reveste-se este ensaio de complicadas particularidades, principalmente no caso específico de peças de argamassa armada: sua pequena espessura faz com que seja necessária uma maior precisão no alinhamento dos dispositivos de aplicação de carga, pois qualquer desvio, da ordem de poucos milímetros, provocará deformações desiguais nas faces do modelo; tanto a literatura nacional quanto a internacional relativas ao assunto carecem de maiores detalhes das experiências realizadas com sucesso.

Além desse problema e de outros inerentes a todos ensaios de tração -- como exemplo cita-se o frequente escorregamento das garras de transmissão da carga, principalmente nas etapas finais de ensaio --, os arranjos de armadura estudados eram assimétricos ou de difícil obtenção prática da simetria projetada. Isto ocasionaria, em muitos casos, o desalinhamento entre o chamado "centro mecânico" e o centro geométrico da peça, referência maior na aplicação do carregamento, provocando por fim o empenamento da peça durante o ensaio.

Diversas soluções foram avaliadas para se evitar este problema. Pensou-se inicialmente em confinar o deslocamento lateral (flexão) das peças durante o ensaio -- manifestada quando da ocorrência de deformações desiguais nas faces do exemplar ou quando o arranjo de armaduras resultava, em análise final, assimétrico. Notou-se, contudo, que este deslocamento lateral, embora de efeito danoso para o ensaio, era de pequena ordem, portanto incontornável com os dispositivos disponíveis de ensaio. Pensou-se também em aplicar um carregamento alinhado ao "centro mecânico" da peça. Esta alternativa mostrou-se, da mesma forma, inexequível em termos práticos. Restou, por fim, a alternativa de se equacionar e interpretar matematicamente o ensaio de tração e o seu mecanismo de fissuração, e analisar, a partir daí, se o empenamento da chapa durante o ensaio não se configurava, nas situações de desalinhamento entre o centro mecânico e geométrico, como ocorrência normal. Este equacionamento foi desenvolvido no capítulo 6.

Os ensaios de tração foram por fim realizados com a aplicação de carga em chapas planas, medindo-se os deslocamentos e deformações axiais correspondentes às diversas etapas de carregamento. Também nestes ensaios foi observado o desenvolvimento da fissuração, através da medição dos espaçamentos e aberturas das fissuras.

A amostragem total planejada foi igual à dos ensaios de flexão, compondo-se de 15 séries de chapas, sendo 10 séries com armaduras distintas e 5 séries sem armadura.

Entretanto, devido à fragilidade das peças (chapas) não armadas de pequena espessura e à situação particular do ensaio, em algumas ocasiões, quando do transporte do conjunto peça-garras para o pórtico de ensaio, ocorria uma pré-fissura na peça — nestes casos, pela ausência de armadura, o acidente comprometia o ensaio.

Para se manter em quatro o número mínimo de peças por série, foi então necessária a produção de peças complementares às séries de chapas com pequenas espessuras e sem armaduras (séries T15, T17.5 e T25). Na identificação destas peças complementares, iniciou-se nova numeração dentro da série, acrescentando-se na nomenclatura as letras "C" ou "CC" depois do número da peça ("C" representou as peças da primeira série complementar e "CC" as peças da segunda série complementar, quando necessária). Assim, por exemplo, T15-1C até T15-4C seriam as quatro chapas da primeira série complementar à série original T15.

Com a criação de séries complementares, nos ensaios de tração executaram-se 71 chapas (11 peças adicionais ao conjunto inicialmente previsto).

Todas as chapas de uma mesma série básica (neste conceito, T15, T15-C e T15-CC são séries distintas, embora façam referência à um mesmo modelo concebido) foram executadas com a mesma argamassa, em idênticas condições de moldagem, adensamento, cura e desmoldagem.

4.2.2 Dimensões das peças

A espessura das chapas foi variável de acordo com os arranjos de armadura adotados.

O comprimento dos exemplares de tração foi de 0,64 m, definido a partir da idealização de um trecho mínimo de observação, na direção longitudinal, igual a 0,20 m, mais o comprimento necessário para a instalação das garras de ensaio e para a perfeita transferência da carga para a região de observação.

A largura adotada foi de 0,21 m nas regiões de instalação das garras, variando linearmente até 0,11 m, largura adotada para o trecho em observação da fissuração (fig. 4.11). Esta redução na largura das chapas foi adotada com a finalidade de se induzir a provável região de ruptura das peças (dentro da região de observação) e para que a carga de ruptura não ficasse além do limite alcançável com os equipamentos empregados. Novamente, foi deixada uma folga de 0,01 m nas larguras para que os fios transversais da tela não facessem as laterais da peça.

Em todas as peças de tração foram adotadas telas adicionais construtivas nas regiões de assentamento e fixação das garras. Este pequeno detalhe permitiu um mais efetivo controle da fissuração ocorrida ocasionalmente nessa região — quando do aperto das garras em sua instalação — evitando que essas fissuras atingissem a região de observação do ensaio.

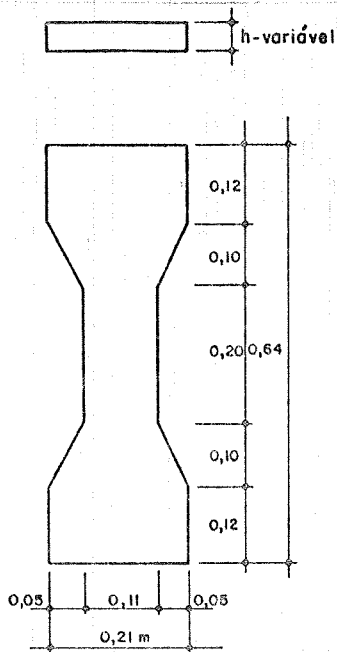


Fig. 4.11 - Dimensões das chapas.

A fig. 4.12 ilustra detalhes do sistema de fixação da garra e do mecanismo de transmissão de forças.

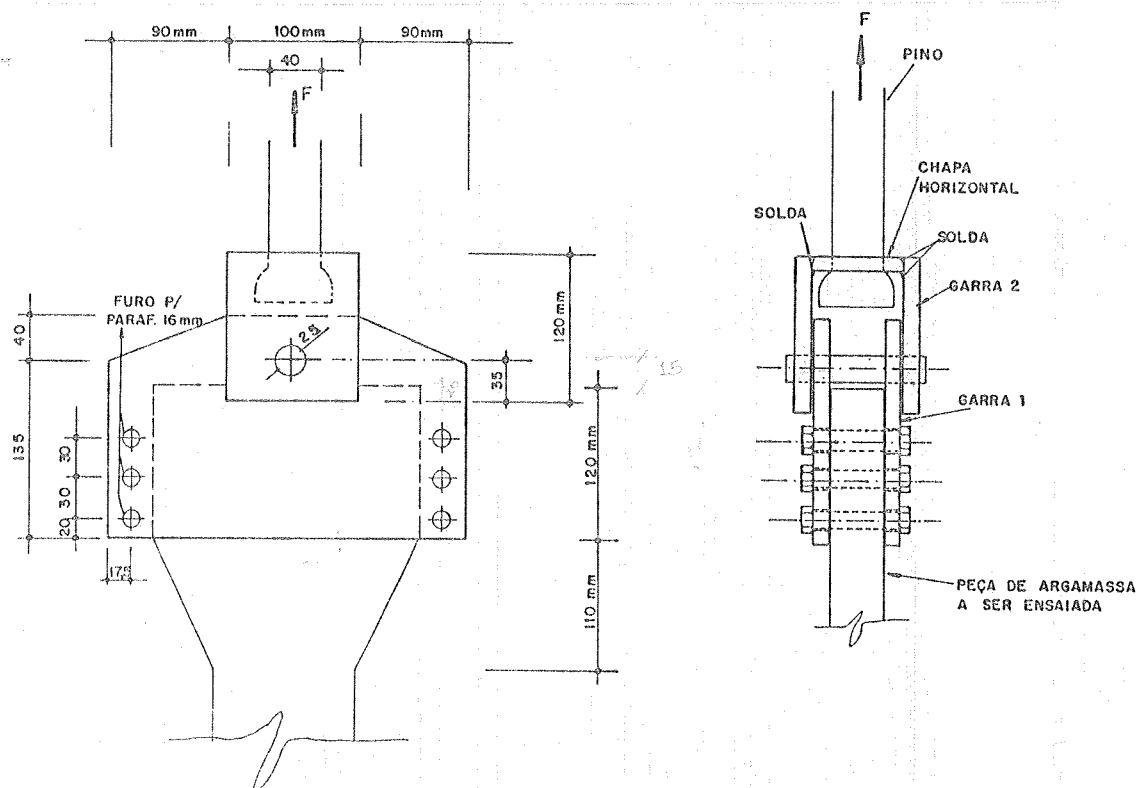


Fig. 4.12 - Garra e sistema "articulado" utilizados na transmissão de forças dos ensaios de tração.

4.2.3 Esquema estático e de carregamento

O esquema estático adotado foi o de chapa sujeita à tração pura.

Utilizou-se de um pórtico de reação construído no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Seus principais detalhes estão na fig. 4.13.

O carregamento foi introduzido através de um macaco hidráulico de dupla ação, acoplado a célula elétrica de carga com indicador digital, aparelho que veio a facilitar a obtenção precisa das cargas de fissuração nestes ensaios.

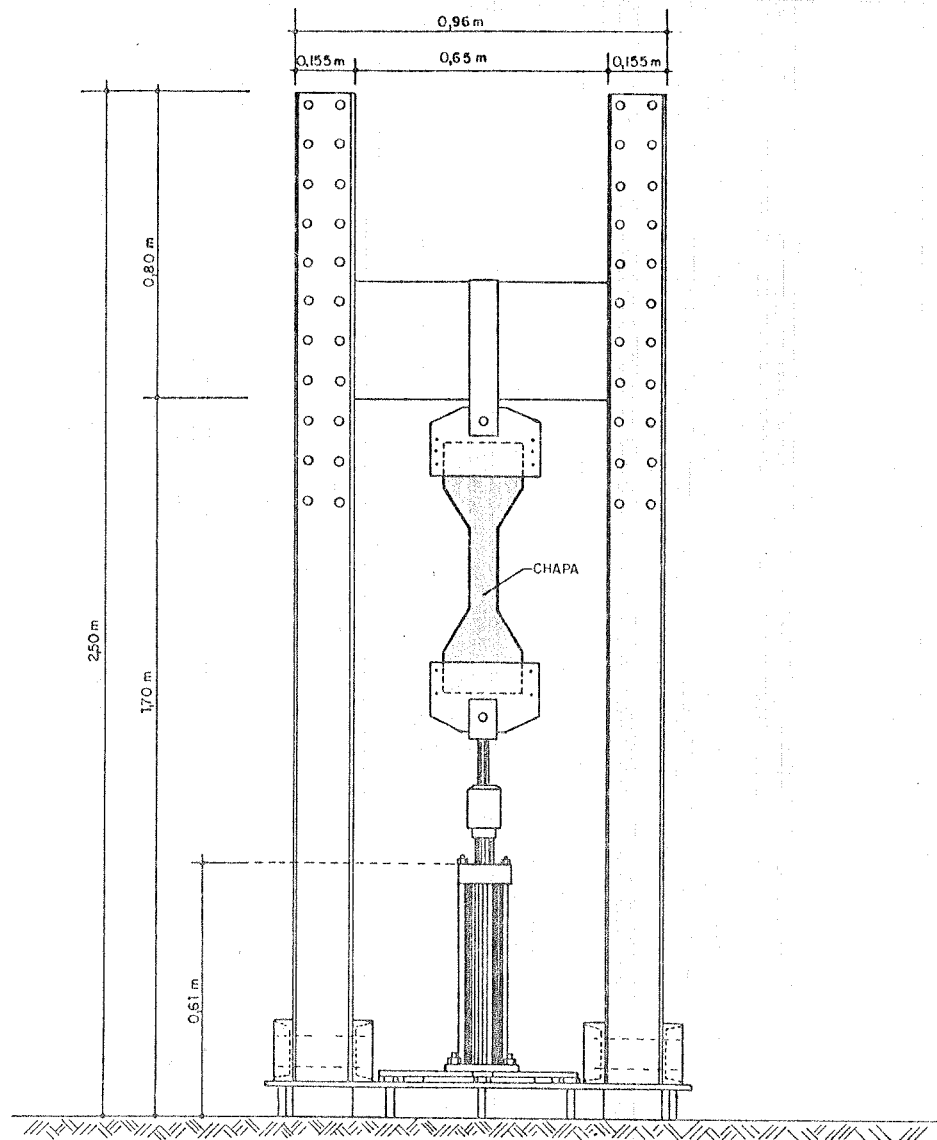


Fig. 4.13 - Pórtico de reação dos ensaios de tração.

Seguindo a mesma metodologia dos ensaios de flexão, o carregamento máximo planejado para o ensaio foi equivalente a 1,5 vezes o carregamento teórico de ruptura - aqui obtido diretamente, a partir da área de aço na seção transversal.

Esta carga máxima seria atingida em 15 etapas de carregamento, prolongando-se o ensaio através de uma única etapa adicional e final de carregamento, caso a peça assim o exigisse. Em algumas séries, depois de ensaiada a primeira chapa e estimado o comportamento real da série, fez-se, para as chapas seguintes, uma correção no incremento de carga ao longo das etapas intermediárias de ensaio, permitindo-se uma análise mais vagarosa e detalhada do aparecimento e evolução da fissuração. Esta correção no carregamento planejado se mostrou interessante e não comprometeu sobremaneira a duração do ensaio, já que era compensada nas etapas terminais, onde o aparecimento de novas fissuras era remoto.

Em todos os ensaios, para acomodação e escorvamento das chapas e do pórtico de ensaio, foi inicialmente aplicada uma carga equivalente a aproximadamente 15% da carga máxima planejada, seguindo-se posterior descarga. A partir daí, o ensaio seguia com as etapas crescentes de carregamento.

É interessante registrar que o dispositivo de transmissão de forças (garras) funcionou muito bem; tendo em vista a necessidade de execução de um número grande de ensaios, era desejável que, além da eficiência, houvesse facilidade de montagem e desmontagem das garras. Para isso, utilizou-se do seguinte procedimento:

- inicialmente, aplicava-se massa adesiva na chapa, nas extremidades de aperto das garras, conforme ilustra a foto 4.4;
- a seguir, sobre a massa adesiva, dispunha-se um filme plástico muito fino, para evitar a adesão desta massa com as garras, que seriam colocadas consecutivamente (foto 4.5);
- finalmente, quando do posicionamento e aperto das garras, a massa adesiva preenchia os rebaixos destas, conformando assim saliências e promovendo, depois do seu endurecimento, uma aderência mecânica (foto 4.6).

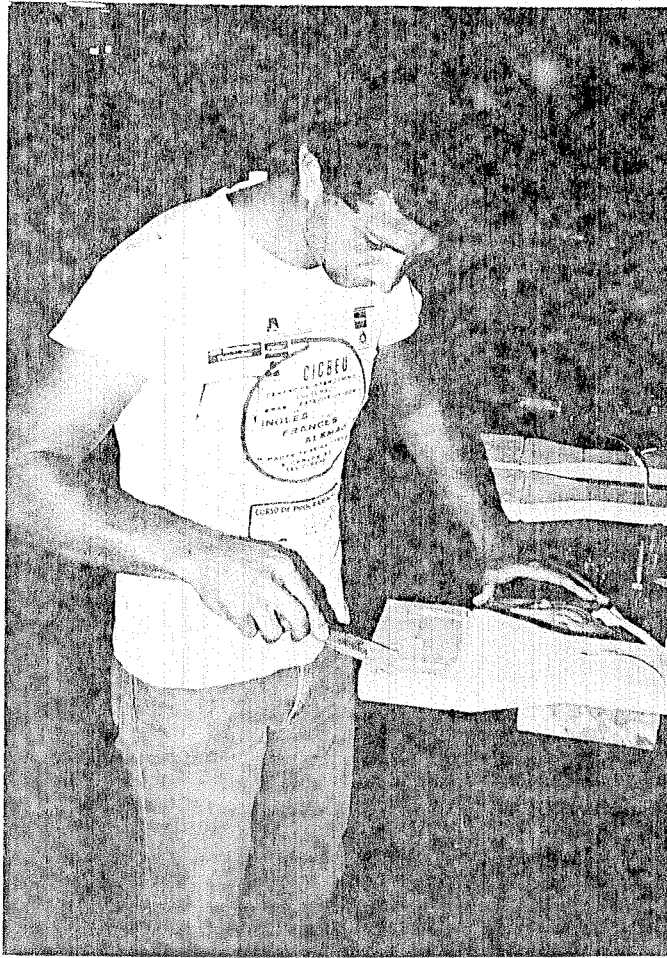


Foto 4.4 - Aplicação da massa adesiva nas extremidades das chapas.

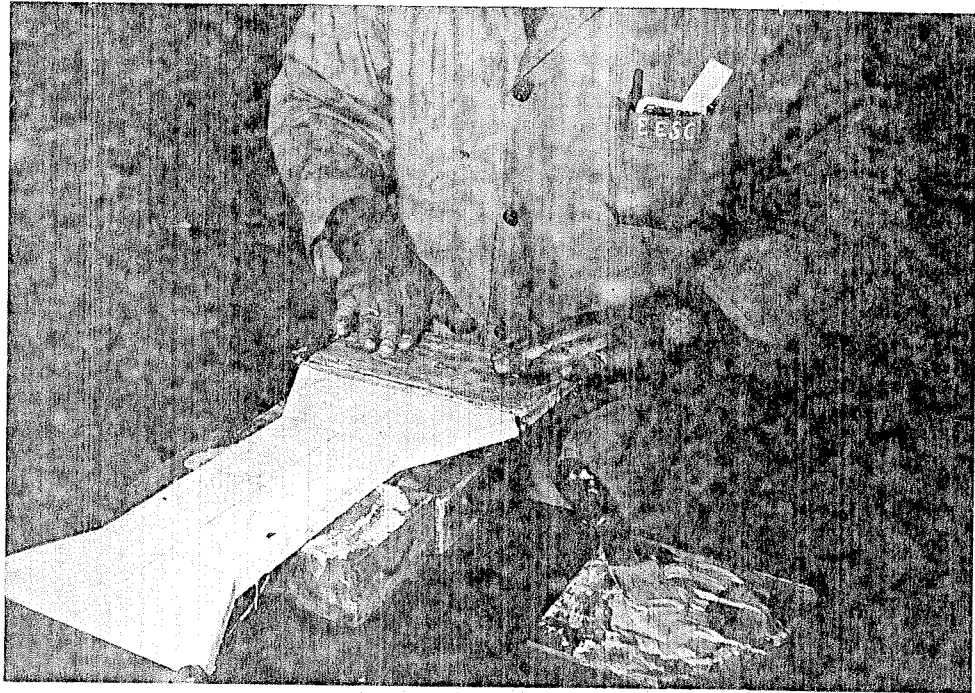


Foto 4.5 - Disposição do filme plástico sobre a massa plástica, para evitar adesão dela à garra metálica.

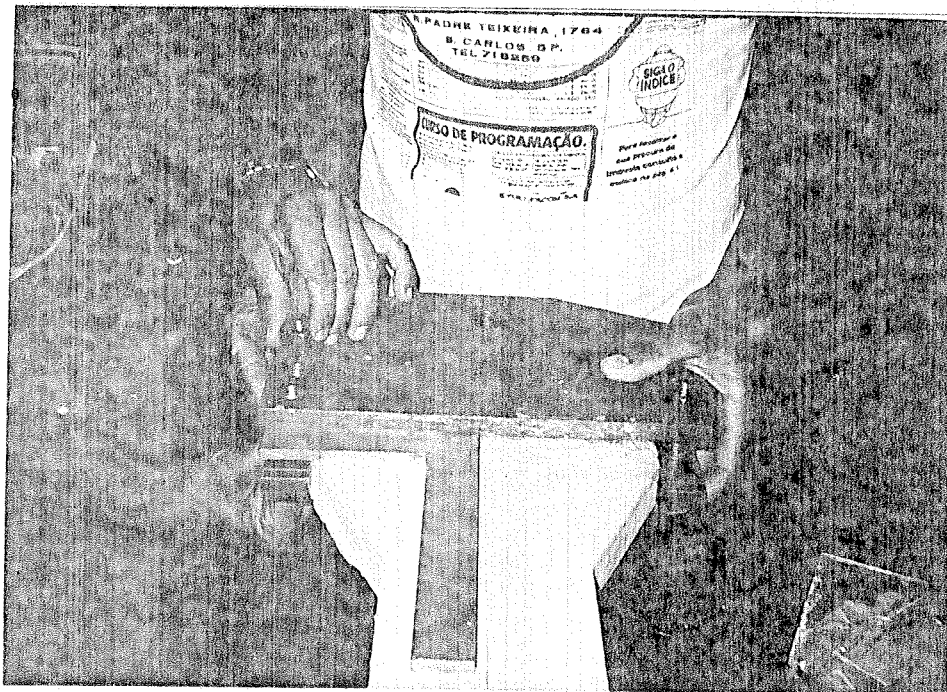


Foto 4.6 - Posicionamento da garra metálica sobre o filme plástico. Quando do aperto da garra, a massa plástica preenche os rebaixos da garra, promovendo, depois de seu endurecimento, uma aderência mecânica.

4.2.4 Fôrmas

Na execução das chapas de argamassa armada utilizaram-se as mesmas fôrmas metálicas dos ensaios de flexão, fazendo as devidas modificações para obtenção das medidas projetadas. As quatro chapas de uma mesma série eram executadas em dois conjuntos de fôrmas (foto 4.7).

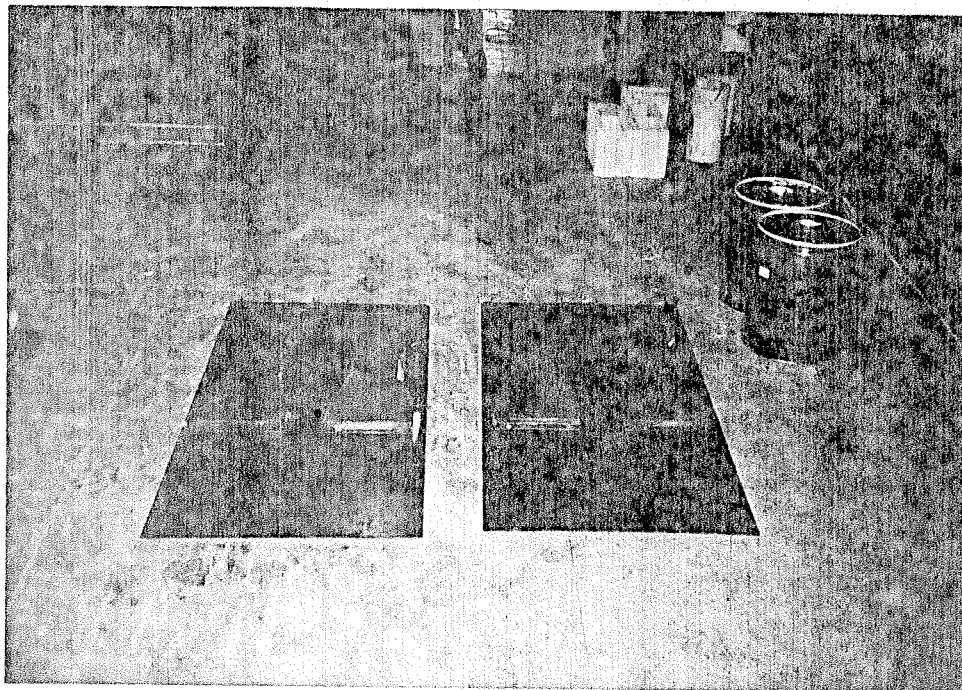


Foto 4.7 - Vista das fôrmas utilizadas na moldagem dos exemplares de tração - chapas.

4.2.5 Moldagem, adensamento e cura

Na moldagem, adensamento e cura das chapas foi empregado o mesmo procedimento descrito nos ensaios de flexão. Tomou-se cuidado adicional no adensamento da argamassa nas regiões das peças onde se instalariam as garras, por apresentarem essas regiões telas adicionais na armadura, conforme já descrito.

4.2.6 Instrumentação

a) medição dos deslocamentos

Foram instalados defletômetros mecânicos de sensibilidade de 0,001 mm e fundo de escala de 4 mm, para medição dos deslocamentos médios em ambas as faces das peças. O posicionamento dos defletômetros está ilustrado na fig. 4.14 e na foto 4.8.

DESLOCAMENTOS - Instrumentação

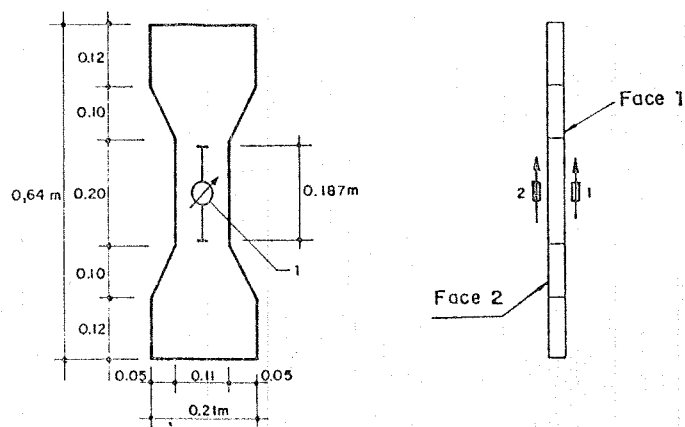


Fig. 4.14 - Posicionamento dos defletômetros para medição dos deslocamentos axiais.

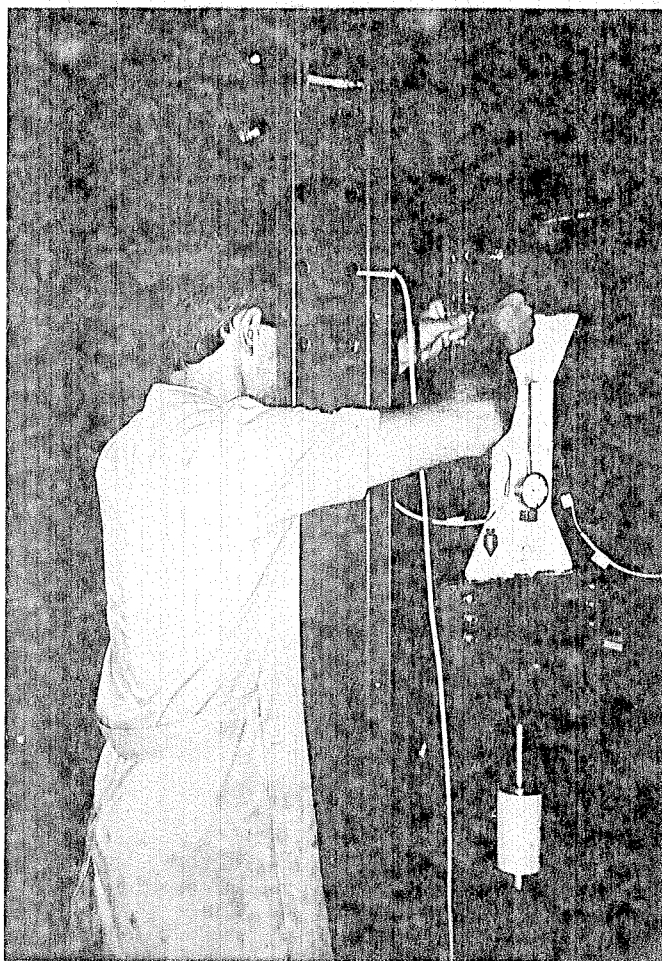


Foto 4.B - Acertos finais no posicionamento do elemento de argamassa armada no pórtico de ensaio. Nota-se o defletômetro, para avaliação dos deslocamentos nas faces do exemplar.

b) medição das deformações

A deformação média da argamassa poderia ser obtida através da medição dos deslocamentos anteriormente citada (os deslocamentos médios das faces foram avaliados em um trecho de 0,187 m).

Como instrumentação adicional para este fim, um exemplar em cada série recebeu 2 extensômetros elétricos de resistência, posicionados um em cada face.

A armadura foi instrumentada com 2 extensômetros elétricos de resistência colados nos fios Q2 e Q4 -- no caso de malha quadrada -- e R3 e R7 -- no caso de malha retangular (ver figs. 4.2 e 4.3). Nos arranjos de armadura com duas ou mais telas, a tela instrumentada era a mais próxima da face "sem o acabamento da fôrma" -- face 1. Nestes casos, um exemplar em cada série (este, distinto daquele com instrumentação adicional na argamassa) recebeu instrumentação adicional, com 2 extensômetros na tela próxima à face 2.

Todos os extensômetros elétricos de resistência foram posicionados na parte média do trecho de observação de 0,20 m, conforme mostra a fig. 4.15.

DEFORMAÇÕES - Instrumentação

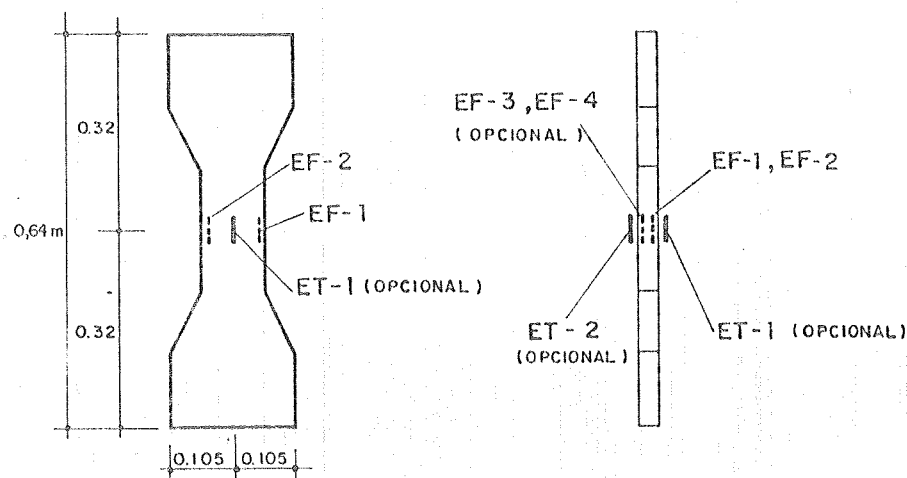


Fig. 4.15 - Posicionamento dos extensômetros elétricos para medição das deformações axiais:
ET-1 e ET-2 - extensômetros elétricos - deformações na argamassa (opcionais);
EF-1 e EF-2 - extensômetros elétricos - deformações da armadura próxima à face 1;
EF-3 e EF-4 - extensômetros elétricos - deformações da armadura próxima à face 2 (opcionais).

Na foto 4.7 ilustra-se o sistema de leitura de medidas com extensômetros elétricos de resistência.

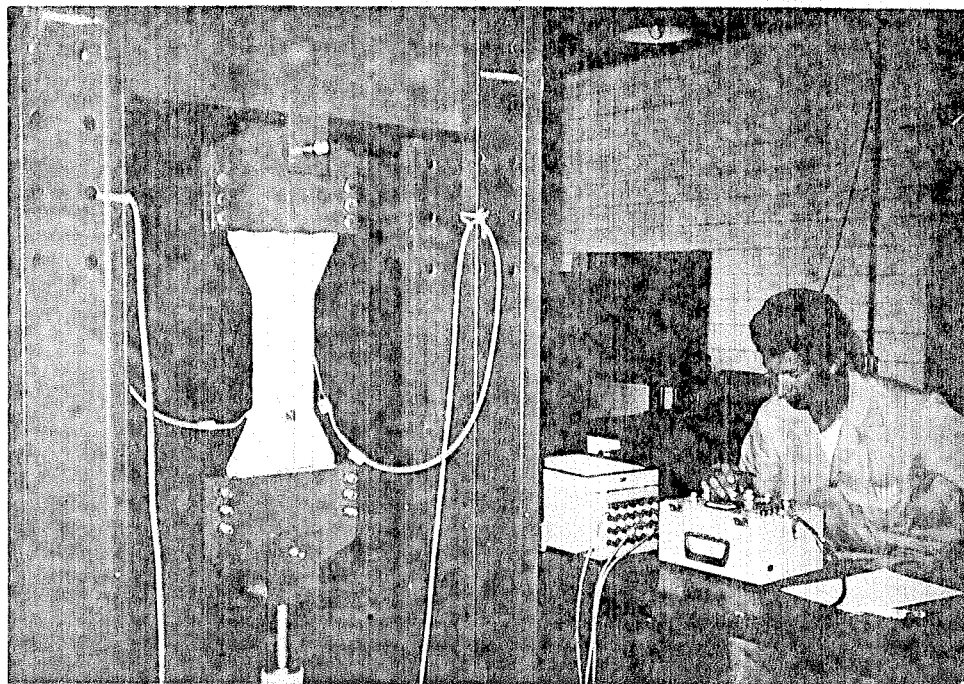


Foto 4.9 - Vista geral do aparato de ensaio de tração. O técnico está procedendo leitura de medidas com extensômetros elétricos de resistência.

4.3 Ensaaios Complementares

4.3.1 Ensaaios dos cimentos

Para efeitos de documentação, foram feitos ensaios físicos de caracterização dos cimentos empregados na execução das peças.

Estes ensaios foram executados na ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland seguindo-se metodologia normalizada e os relatórios finais encontram-se no capítulo 5.

4.3.2 Ensaios de caracterização do agregado miúdo

Tiveram como objetivo determinar os principais índices físicos e a distribuição granulométrica da areia empregada na produção da argamassa.

Foram realizados junto ao Laboratório de Materiais do Departamento de Arquitetura da Escola de Engenharia de São

Carlos - USP e os resultados finais estão transcritos no capítulo 5.

4.3.3 Ensaio de caracterização das telas de aço

Esta caracterização foi feita por ensaio à tração de fios das telas de aço. Nestes ensaios determinaram-se os principais parâmetros dos fios, quais sejam: LR - limite de resistência à tração; $LE_{0,2}$ - limite convencional de escoamento; E - módulo de elasticidade.

Os ensaios foram realizados em máquina INSTRON do Departamento de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Este equipamento, dispondo de um registrador, permitiu a obtenção direta dos diagramas carga-deslocamento da garra para as amostras ensaiadas. Nos ensaios em que se pretendia obter o módulo de elasticidade, utilizou-se de um extensômetro elétrico indutivo para a medição dos deslocamentos.

Ensaíram-se fios das telas de malha quadrada -- EQ 98 -- e das telas de malha retangular -- EL 196/98 -- sendo que para cada tipo de tela foram extraídos 4 fios longitudinais e 2 fios transversais, totalizando assim 12 amostras. O seu preparo e o método de ensaio seguiram o prescrito nas NBR 6207 - "Arame de aço - Ensaio de tração" <4> e NBR 7481 - "Tela de aço soldada para armadura de concreto" <7>.

Os resultados obtidos estão expostos no capítulo 5.

4.3.4 Ensaio de caracterização das argamassas empregadas em cada uma das séries

O controle da argamassa empregada na execução de cada uma das séries de flexão e tração foi feito através de ensaio de ruptura de 18 corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. A moldagem e ensaio atenderam ao prescrito pela NBR 7215 - "Ensaio de Cimento Portland" <4>, considerando-se a seguinte distribuição de corpos de prova por ensaio:

- 4 corpos de prova para compressão axial a 3 dias de idade;
- 4 corpos de prova para compressão axial a 7 dias de idade;
- 4 corpos de prova para compressão axial à mesma idade de ensaio dos exemplares da série considerada;
- 4 corpos de prova para compressão diametral à mesma idade de ensaio dos exemplares da série considerada;
- 2 corpos de prova para compressão axial instrumentada à mesma idade de ensaio dos exemplares da série considerada.

Os resultados destes ensaios são explicados no capítulo 5.

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Considerações Gerais

Desde o início do planejamento do trabalho, atendendo aos objetivos firmados, teve-se grande preocupação e especial cuidado na estruturação de um arquivo de dados o mais completo possível, de modo que, para cada ensaio realizado, correspondesse uma planilha minuciosa que permitisse resgatar as mais variadas informações qualitativas e quantitativas sobre o seu andamento e desfecho.

Essa busca se justificou, a princípio e em partes, pela simples oportunidade que se descortinava - realização sistemática de numerosos ensaios de flexão e tração em peças de argamassa armada.

Além disso, pensou-se sempre que os resultados desses ensaios poderiam paralela ou posteriormente servir de confirmação prática para muitos outros comportamentos físico-mecânicos do material, não contemplados neste estudo e atualmente em desenvolvimento por outros pesquisadores. Dessa forma, o desprezo de qualquer tipo de informação poderia ser crucial e, ainda mais, a apresentação de todos os resultados deveria ser feita de forma detalhada, lógica e ordenada, para se facilitar o seu acesso e compreensão.

Foi com este espírito que se encaminhou a apresentação dos resultados.

5.2 Ensaios de Flexão e Tração

Os resultados dos ensaios de flexão e tração foram anotados em planilhas e posteriormente transferidos para arquivos em discos magnéticos para processamento em microcomputador.

Utilizaram-se alguns programas específicos para manipulação e apresentação dos resultados:

- programa DESLOCTRANSVFLEXAO
empregado nos ensaios de flexão para arquivar as leituras dos deslocamentos das vigas e calcular os deslocamentos transversais finais, levando em conta a possível deslocabilidade dos apoios idealizados.
- programa DESLOCLONGTRACAO
com a mesma finalidade do anterior, relativamente aos deslocamentos longitudinais dos ensaios de tração.

- programas DEFLONGFLEXAO e DEFLONGTRACAO empregado para arquivar as leituras das deformações longitudinais das vigas e das chapas e calcular as deformações finais, considerando-se a existência de extensômetros elétricos e mecânicos com diferentes constantes.

- programa DADOSGERAIS empregado em todos os ensaios para arquivar informações qualitativas e quantitativas importantes como: duração do ensaio, estado inicial da peça, tipo de instrumentação utilizada, carga de fissuração e carga de ruptura, espaçamento médio e abertura das fissuras. Este programa também mostrava, em sua parte final, uma lista dos resultados complementares apresentados para cada um dos ensaios.

- programa RESIST empregado no controle da resistência das argamassas utilizadas na execução das peças. Foram calculadas e controladas estatisticamente - através do critério de aceitação de amostras de Chauvenet - as resistências à compressão axial e diametral à diferentes idades e o módulo de deformação longitudinal da argamassa.

Os resultados dos ensaios de flexão e tração estão apresentados nos Anexos 1 e 2, respectivamente.

Sendo grande a quantidade de amostras envolvidas e a diversidade de suas características, decidiu-se, visando o didático e o prático, explicar em um breve exemplo o conteúdo de cada uma das páginas que compõem a apresentação dos resultados. Estão na seguinte ordem:

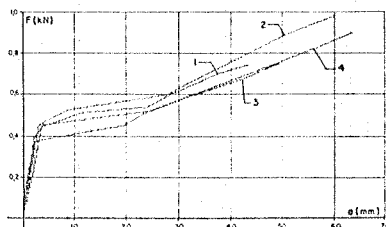
1ª. página:

E aí exposto, em caráter geral, um diagrama carga-deslocamento de todas as peças ensaiadas na série enfocada, além de uma tabela com os valores das cargas de fissuração e de ruptura de cada uma das peças.

Pode-se através deles fazer uma rápida análise da dispersão dos resultados dentro da série.

SÉRIE FIQ15

Diagrama carga-deslocamento central das peças



Peças ensaiadas	Carga de fissuração(kN)	Carga de ruptura(kN)
FIQ15-1	0,280	0,951
FIQ15-2	0,492	1,178
FIQ15-3	0,368	0,998
FIQ15-4	0,462	1,110

Fig. 5.1 - Dados da 1ª. página de apresentação - Resultados gerais da série para uma análise sucinta da dispersão de valores característicos obtidos e da constância no processo de ensaio.

2ª. página

Expõe-se, nessa página, o controle de resistência da argamassa utilizada para a execução dos exemplares da série enfocada. Nesse controle ensaiaram-se 18 corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, conforme já esclarecido no item 4.3.4.

Os valores médios finais da resistência da argamassa às diferentes idades foram obtidos através da média dos resultados envolvidos, aplicando-se o critério de Chauvenet e considerando-se ainda:

$$f_{ck} = f_{c_j} - 1,65 s_d$$

$$f_{tk} = f_{t_j} - 1,65 s_d$$

Onde:

f_{ck} = resistência característica da argamassa à compressão;

f_{c_j} = resistência média à compressão da argamassa para a idade de j dias;

f_{tk} = resistência característica da argamassa à tração;

$f_{c,j}$ = resistência média à tração da argamassa para a idade de j dias;
 s_a = desvio padrão da amostra reduzida.

Por fim, do ensaio dos dois corpos de prova instrumentados, foram extraídos pontos para elaboração de curvas tensão-deformação. Foram executadas através da interpolação dos valores por parábolas do 2º grau. O módulo de deformação longitudinal de cada um dos corpos de prova foi obtido como tangente à respectiva curva, na origem - módulo de deformação longitudinal tangente na origem.

PROPRIEDADES MECÂNICAS DA ARGAMASSA ARMADA COM TELAS SOLDADAS
 CONTROLE DA RESISTÊNCIA DA ARGAMASSA

ARGAMASSAGEM: I
 MALDAGEN-10/09/04
 SÉRIE CORRESPONDENTE: F1013

C.P.	ENSAIO	IDADE (DIAS)	TIPO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)
1	21/09/04	3	AXIAL	29.6
2	25/09/04	7	AXIAL	31.1
3	19/10/04	31	AXIAL	46.6
4	19/10/04	31	DIAMETRAL	4.3
5	21/09/04	3	AXIAL	30.4
6	19/10/04	31	AXIAL INSTR.	47.7
7	25/09/04	7	AXIAL	32.5
8	19/10/04	31	AXIAL	42.6
9	19/10/04	31	DIAMETRAL	4.3
10	21/09/04	3	AXIAL	26.1
11	25/09/04	7	AXIAL	36.9
12	19/10/04	31	AXIAL INSTR.	47.8
13	19/10/04	31	AXIAL	53.4
14	19/10/04	31	DIAMETRAL	5.1
15	21/09/04	3	AXIAL	31.7
16	25/09/04	7	AXIAL	34.0
17	19/10/04	31	AXIAL	48.3
18	19/10/04	31	DIAMETRAL	5.0

VALORES MÉDIOS FINAIS DA ARGAMASSAGEM (MPa)					
f _{c3}	f _{c7}	f _{c31}	f _{cj}	f _{ck}	f _{tk}
29.2	33.8	47.7	4.7	42	4.1

DIAGRAMAS TENSÃO - DEFORMAÇÃO DOS C.P. INSTRUMENTADOS

C.P. 6 E C.P. 12

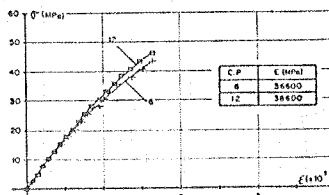


Fig. 5.2 - Dados da 2ª página de apresentação - Controle da resistência da argamassa utilizada para execução dos exemplares da série.

3ª. página e demais

A partir dessa página, os resultados expostos deixam de ser gerais à série enfocada, passando para a especificidade de cada um de seus exemplares.

Ela encabeça uma sequência de, normalmente, três páginas, que dizem respeito ao primeiro dos exemplares da série. Contêm dados gerais desse ensaio, tendo sido elaborada pelo programa DADOSGERAIS. As outras duas páginas contêm tabela e diagrama carga-deslocamento e tabela e diagrama carga-deformação, respectivamente.

As qualificações de ensaio feitas nessa página foram atribuídas em função de um padrão pré-estabelecido. No estado inicial da peça foram consideradas as situações normal,

fissurada e empenada. Quanto ao carregamento e à instrumentação, as ocorrências fora do normal foram acusadas através de observações.

No desenvolvimento da fissuração, para que se pudesse dar uma idéia mais clara sobre a fase de ensaio considerada, apresentaram-se as relações F/F_c e F/F_u , sendo F a carga aplicada, F_c a carga de fissuração do exemplar e F_u a carga de ruptura.

A abertura das fissuras foi acompanhada através de seus valores máximos observados nas regiões A, B, C e D - ilustradas nas fig. 5.3 e 5.4 - seguidos da média aritmética desses máximos. O número de fissuras, para os ensaios de tração, foi separado por uma barra para distinguir a fissuração de uma face (regiões A e B) e da outra (regiões C e D). O mesmo ocorreu para o espaçamento das fissuras, que nos dois casos foi calculado como a distância entre as duas fissuras mais afastadas, dividida pelo número total de fissuras menos um.

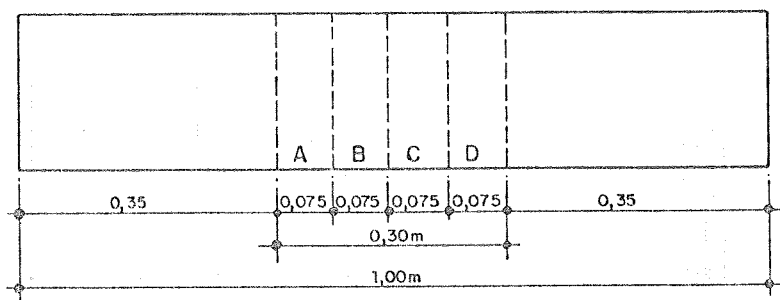


Fig. 5.3 - Regiões de observação da abertura de fissuras nos ensaios de flexão. O terço médio da viga -- 30 cm -- foi dividido em 4 regiões de 7,5 cm. O espaçamento entre fissuras foi acompanhado junto à linha média da largura da peça, acusada na figura.

Por fim, nessa página apresenta-se uma listagem dos demais resultados expostos para o exemplar em questão: diagramas carga-deslocamento e carga-deformação e tabelas de deslocamentos e deformações.

A sequência de, normalmente, três páginas se repete para os demais exemplares da série.

As fotos 5.1 a 5.12, expostas no final deste capítulo, apresentam detalhes da fissuração final das vigas e chapas ensaiadas.

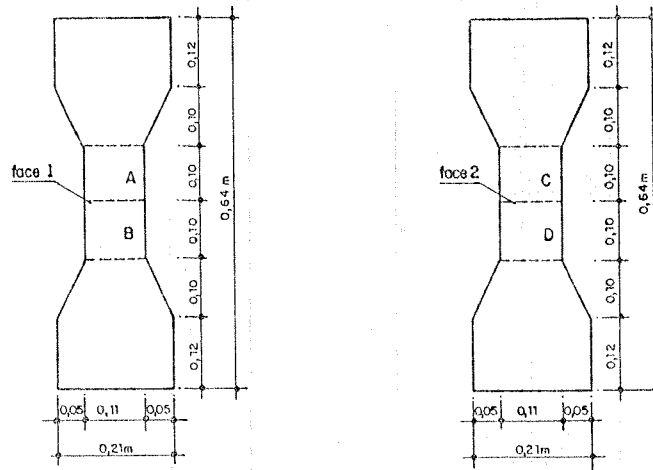


Fig. 5.4 - Regiões de observação da abertura de fissuras nos ensaios de tração. Em cada uma das faces, a faixa de observação de 20 cm foi dividida em duas regiões de 10 cm. As regiões A e B correspondem à face 1 e as regiões C e D, à face 2. O espaçamento entre fissuras foi acompanhado junto às linhas médias da largura, nas duas faces, conforme acusado na figura.

5.3 Ensaios Complementares

5.3.1 Ensaios dos cimentos

Os relatórios finais dos ensaios físicos de caracterização dos cimentos empregados na execução das peças são expostos nas tabs. 5.1 e 5.2.

5.3.2 Ensaios de caracterização do agregado miúdo

Dos ensaios com o agregado miúdo os principais índices físicos obtidos foram:

- massa específica real 2,63 g/cm³
- massa específica aparente 1,59 g/cm³
- umidade crítica 1,85 %
- inchamento na umidade crítica 28,1 %
- inchamento máximo 30,7 %
- dimensão máxima característica 2,4 mm
- módulo de finura 2,50

A distribuição granulométrica está ilustrada na Fig. 5.5.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND

SEDE: Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347 - SÃO PAULO/SP - Fone 268-5111 - Telex (011) 39185 ASSD BR

DIVISÃO DE TECNOLOGIA DO CIMENTO

CONFIDENCIAL

DEPARTAMENTO DE CIMENTO

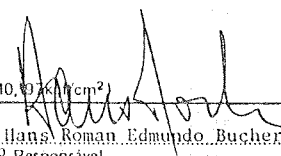
CERTIFICADO Nº 42333

Trabalho nº: 702/87	Amostra nº: 24070	Data de registro: 23.07.87
Interessado: DEAST - Departamento de Assistência Técnica		
Referência: DEAST/GRATE 075/87, de 22.07.87		

Material: Cimento portland comum	Marca: "Votoran"
Procedência: -	Classe: 32 Tipo: CP
Amostra coletada em: -	por: -

Finura (NBR 7215)	Índice de finura2,9..... %	Água de pasta de consistência normal24,2..... %
Finura (NBR 7224)	Área específica340..... m ² kg ⁻¹	Tempos de pega (NBR 7215)
Massa específica (NBR 6474)	Massa específica3,12..... Mg m ⁻³	Início de pega2.....h.....10..... min
		Fim de pegah.....m..... min
		Expansibilidade (NBR 7215)
		A friomm
		A quente0,5..... mm

Ensaio de compressão realizado em máquina da classeI..... segundo verificação realizada em28.07.86..... pela norma (NBR 6156)	Corpo de prova nº	Resistência à compressão (NBR 7215) em MPa ⁸ aos			Calor de hidratação, em Jg ⁻¹ pelo método de:	
		3 dias	7 dias	28 dias	Dissolução (NBR 8809)	Langavant (AFNOR P 15-436)
1	1	20,8	25,6	33,4		
2	2	21,0	25,4	33,8		
3	3	21,1	25,2	33,1		
4	4	20,8	25,0	34,3		
5	5	20,7	25,2	34,6		
6	6	20,8	25,4	34,2		
	Média	20,9	25,3	33,9	a..... dias:.....	a..... horas:.....
	Desvio relativo máximo (%)	1,0	1,2	2,4	a..... dias:.....	a..... horas:.....

Observações relativas à amostra:	Observações relativas aos ensaios e seus resultados:
	<p>* (1 MPa = 10,0 kgf/cm²)</p>  Hans Roman Edmundo Bucher p/ Eng ^o Responsável

São Paulo, 10 de dezembro de 1987

Tab. 5.1 - Certificado final do ensaio físico do cimento marca Votoran classe 32.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND

SEDE: Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347 - SÃO PAULO/SP - Fone 268-5111 - Telex (011) 39185 ASSD BR

DIVISÃO DE TECNOLOGIA DO CIMENTO

CONFIDENCIAL

DEPARTAMENTO DE CIMENTO

CERTIFICADO Nº 42332

Trabalho nº: 703/87	Amostra nº: 24071	Data de registro: 23.07.87
Interessado: DEAST - Departamento de Assistência Técnica		
Referência: DEAST/GRATE 075/87, de 22.07.87		

Material: Cimento portland comum	Marca: "Itaú"
Procedência: -	Classe: 32 Tipo: CP
Amostra coletada em: -	por: -

Finura (NBR 7215)	Índice de finura ...1,9... %	Água de pasta de consistência normal	...26,3... %
Finura (NBR 7224)	Área específica ...368... m ² kg ⁻¹	Tempos de pega (NBR 7215)	Início de pega ...3...h...05... min Fim de pega ...h...min
Massa específica (NBR 6474)	Massa específica ...3,12... Mg m ⁻³	Expansibilidade (NBR 7215)	A frio mm A quente ...0,0... mm

Ensaio de compressão realizado em máquina da classe I segundo verificação realizada em 28.07.86 pela norma (NBR 6156)	Corpo de prova nº	Resistência à compressão (NBR 7215) em MPa ^a aos			Calor de hidratação, em Jg ⁻¹ pelo método de:	
		3 dias	7 dias	28 dias	Dissolução (NBR 8809)	Langavant (AFNOR P 15-436)
	1	28,4	32,0	41,2		a.....horas:..... a.....horas:..... a.....dias:..... a.....horas:..... a.....dias:..... a.....horas:..... a.....dias:..... a.....horas:.....
	2	28,2	31,9	40,8		
	3	27,2	31,6	38,8		
	4	27,4	32,5	41,2		
	5	26,2	31,6	40,2		
	6	27,2	30,9	40,2		
	Média	27,4	31,8	40,4		
Desvio relativo máximo (%)	4,4	2,8	4,0			

Observações relativas à amostra:	Observações relativas aos ensaios e seus resultados:
	<p style="text-align: center;">* (1 MPa = 10,000 kgf/cm²)</p> <p style="text-align: center;"><i>[Signature]</i> Hans Roman Edmundo Bucher p/ Eng^o Responsável</p>

São Paulo,10 dedezembro de 19 87.....
avaa

Hans Roman Edmundo Bucher
p/ Eng^o Responsável

Tab. 5.2 - Certificado final do ensaio físico do cimento marca Itaú classe 32.

CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO

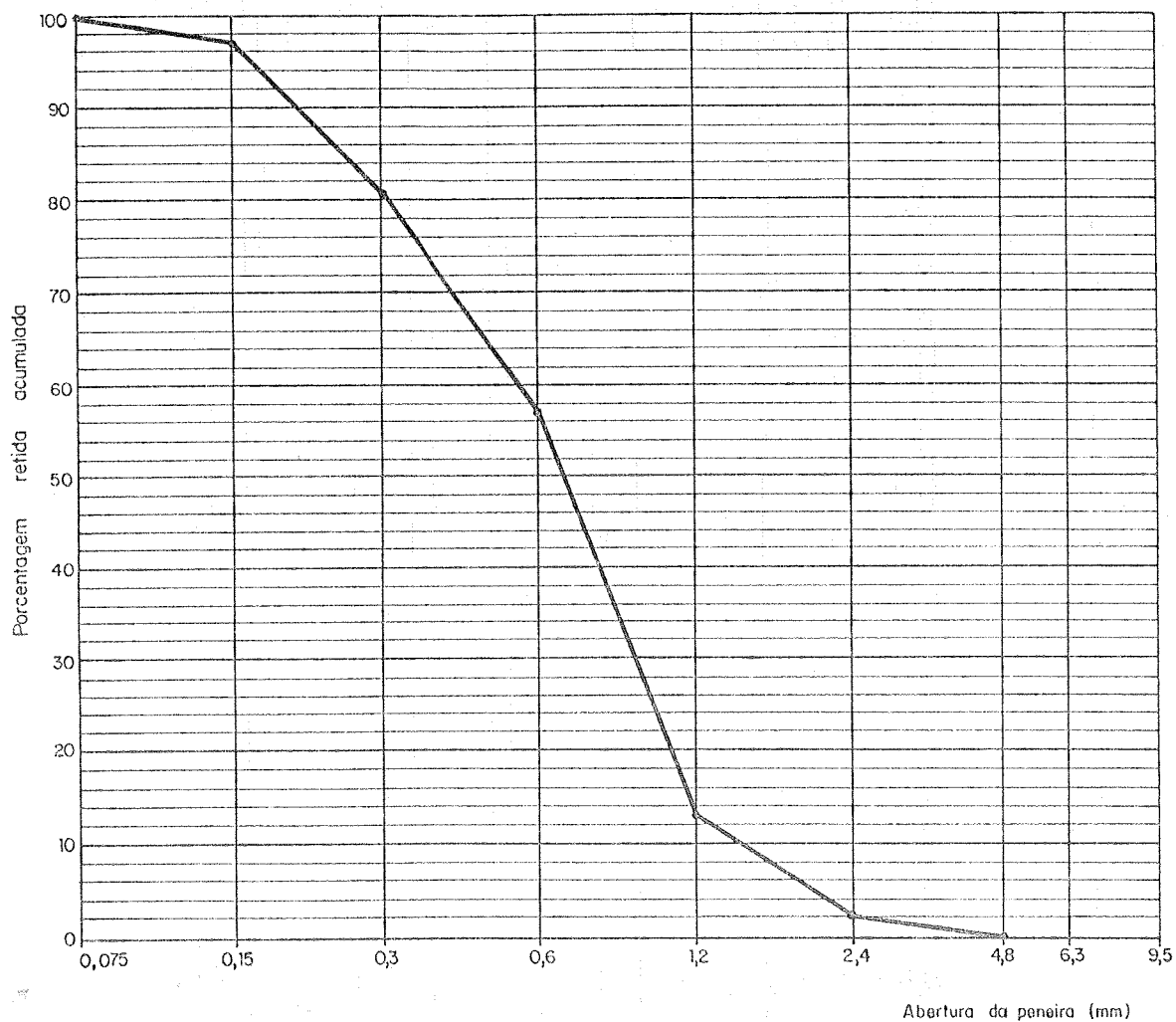


Fig. 5.5 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado na execução das peças dos ensaios de flexão e tração.

5.3.3 Ensaio de caracterização das telas de aço

A tabela 5.3 resume os principais resultados obtidos do ensaio de tração das 12 amostras dos fios das telas de aço soldadas.

Amostra nº	Instrumentação	Tela	Fio	Ø (mm)	A ₀ (mm ²)	P _r (kN)	LR (MPa)	LE _{0,2} (MPa)	E (MPa)	Observações
01	normal	EQ-98	transversal	2,47	4,79	4,150	866,4	751,6	--	
02	normal	EQ-98	transversal	2,48	4,83	4,100	848,9	776,4	--	
03	normal	EL-196/98	transversal	2,48	4,83	3,925	812,6	--	--	
04	normal	EL-196/98	transversal	2,49	4,87	4,250	872,7	831,6	--	
05	exters.indutivo	EQ-98	longitudinal	2,48	4,83	4,200	869,6	823,0	189 000	
06	exters.indutivo	EQ-98	longitudinal	2,49	4,87	4,125	847,0	831,6	202 500	
07	normal	EQ-98	longitudinal	2,50	4,91	4,050	824,8	758,6	--	
08	normal	EQ-98	longitudinal	2,49	4,87	4,050	831,6	764,9	--	
09	normal	EL-196/98	longitudinal	2,48	4,83	--	--	735,0	--	a amostra rompeu sob a garra
10	normal	EL-196/98	longitudinal	2,48	4,83	4,050	838,5	755,7	--	
11	exters.indutivo	EL 196/98	longitudinal	2,48	4,83	3,950	817,8	755,7	217 500	
12	exters.indutivo	EL 196/98	longitudinal	2,50	4,91	4,175	850,3	789,2	179 000	

P_r - carga de ruptura LR - limite de resistência à tração
E - módulo de elasticidade LE_{0,2} - Limite convencional de escoamento

Tab. 5.3 - Resultados parciais do ensaio de caracterização das telas de aço soldadas.

Para efeitos de análise dos resultados -- capítulo 6 -- foram assumidos como representativos das telas de aço soldadas o diagrama da fig. 5.6 e os valores da tab. 5.4.

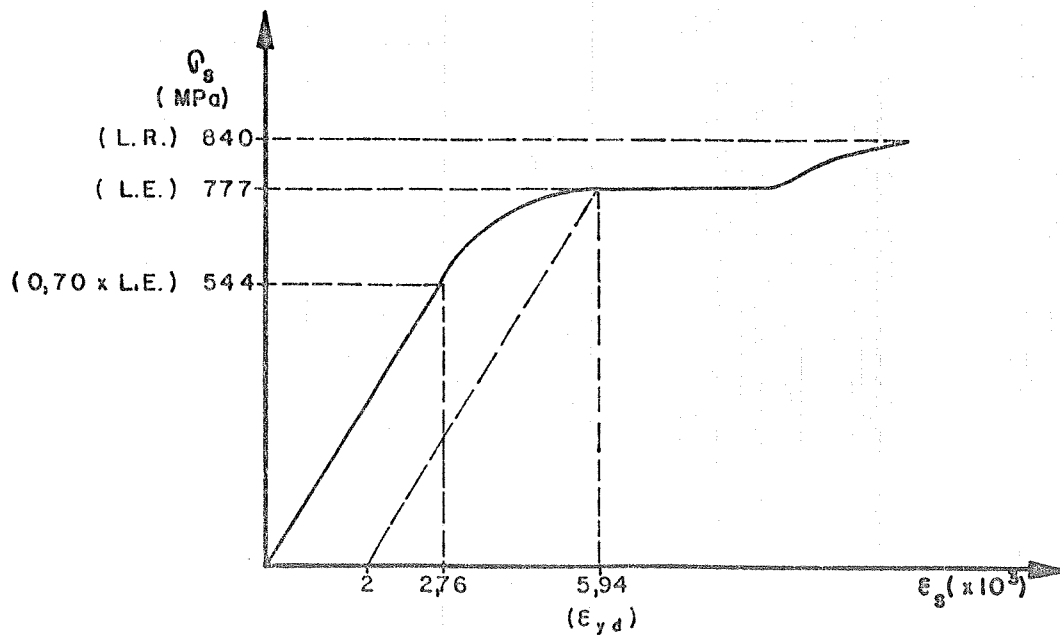


Fig. 5.6 - Diagrama $\sigma - \epsilon$ das telas de aço soldadas - fios longitudinais

FIOS LONGITUDINAIS		FIOS TRANSVERSAIS	
L.R.	= 840,0 MPa	L.R.	= 850,0 MPa
L.E. _{0,2}	= 777,0 MPa	L.E. _{0,2}	= 787,0 MPa
E	= 197 000 MPa	E	= 197 000 MPa

Tab. 5.4 - Resumo dos valores assumidos como representativos das telas de aço soldadas utilizadas.

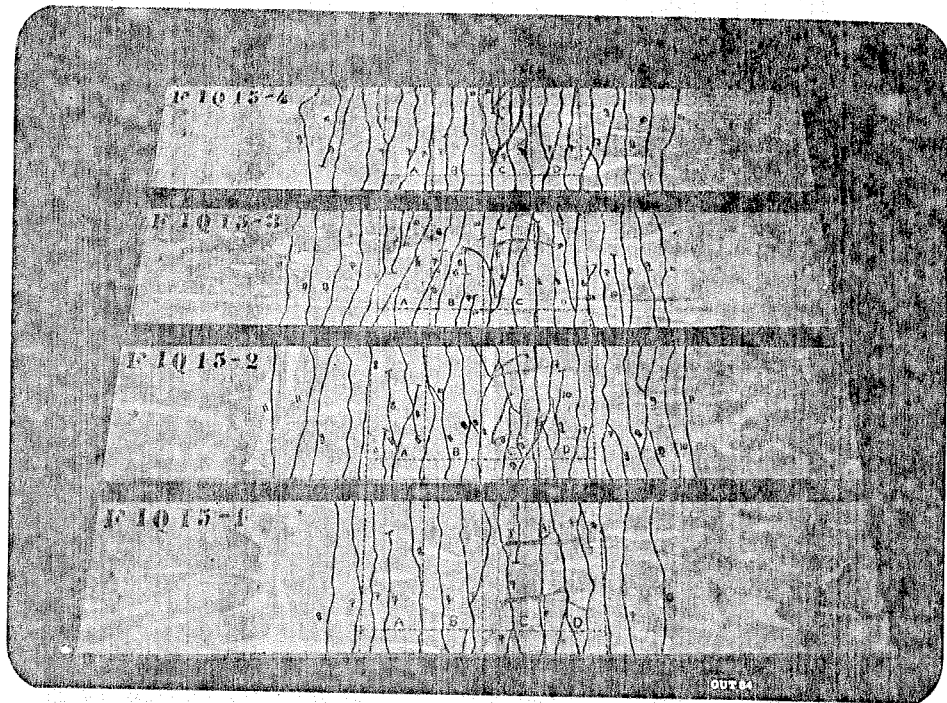


Foto 5.1 - Fissuração final - SERIE F1015

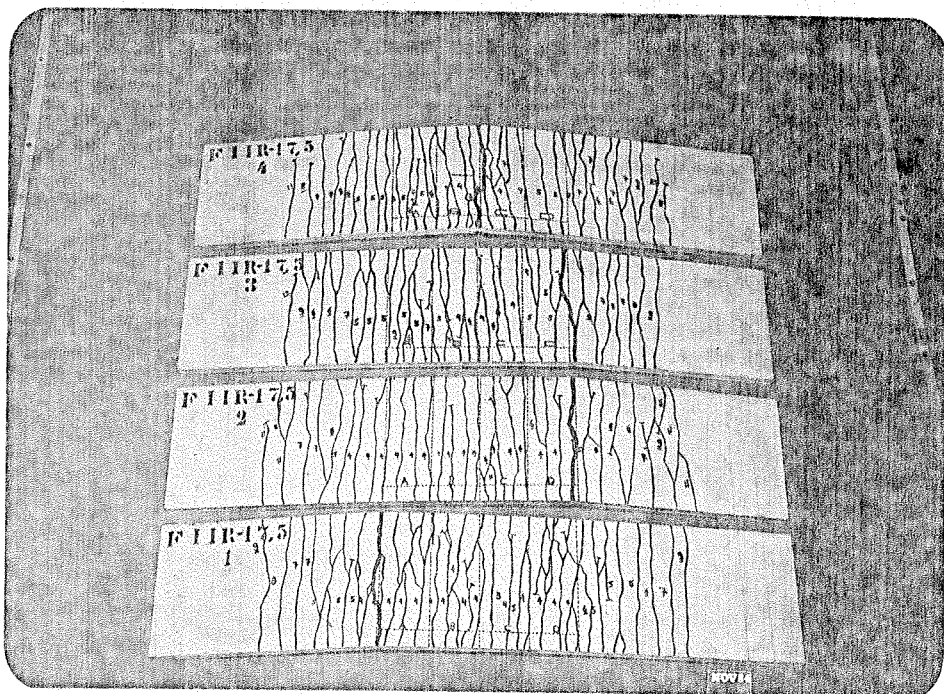


Foto 5.2 - Fissuração final - SERIE F11R17.5

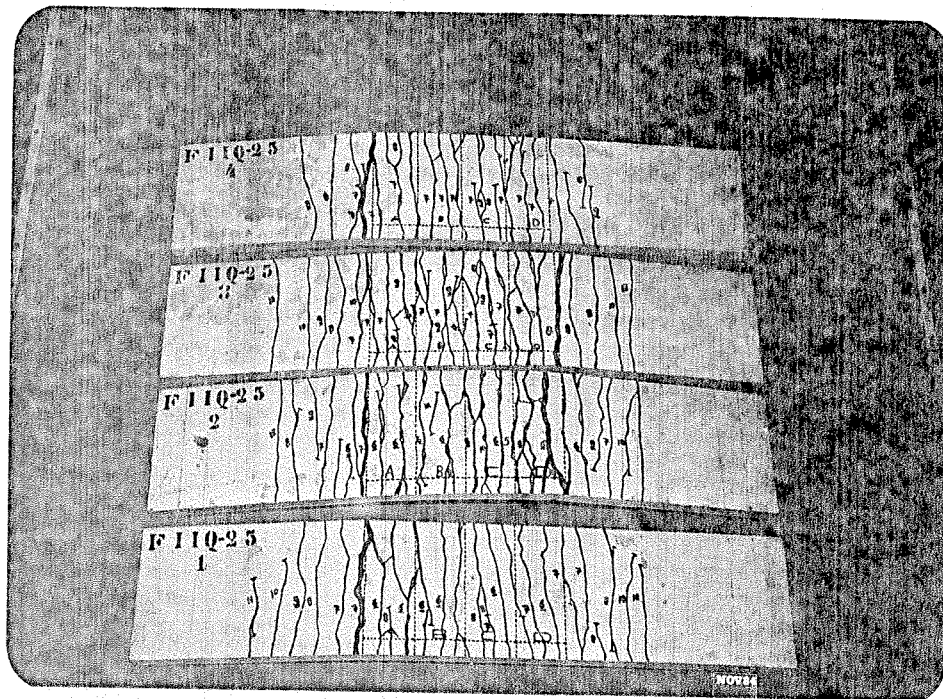


Foto 5.3 - Fissuração final - SERIE F11Q25

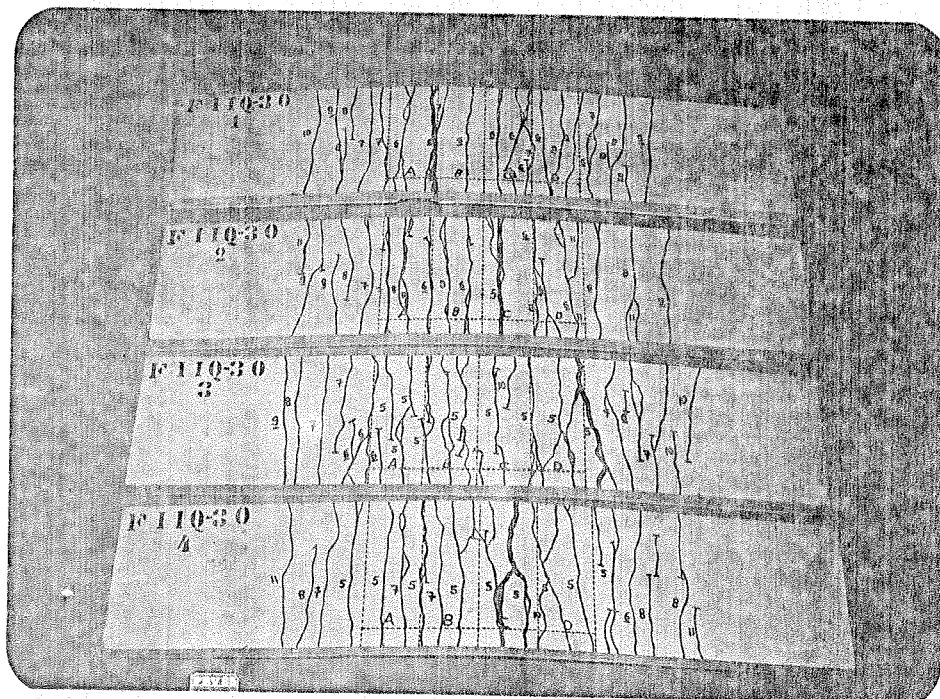


Foto 5.4 - Fissuração final - SERIE F11Q30

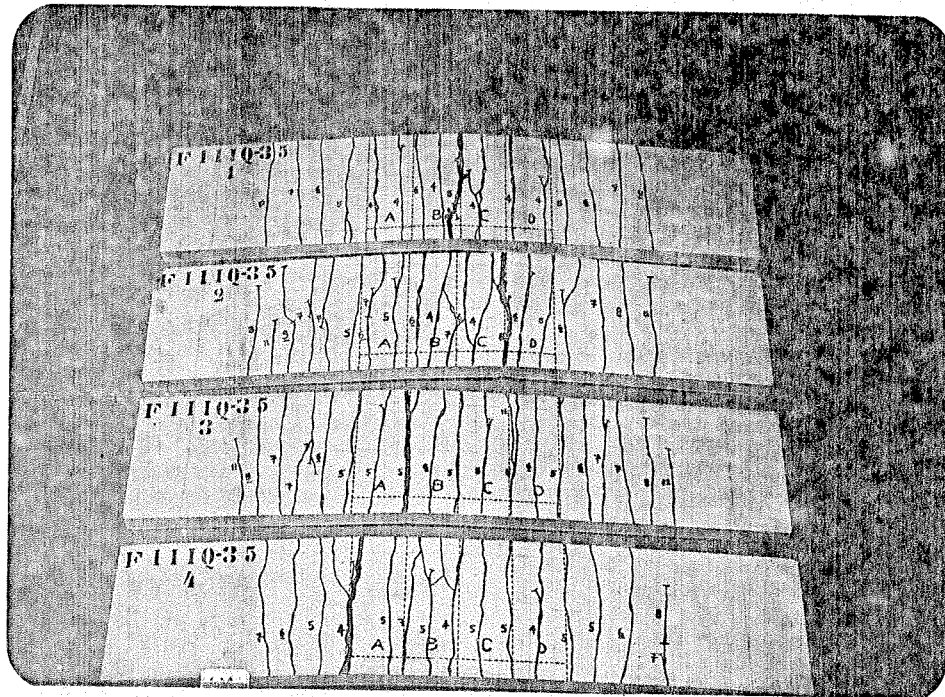


Foto 5.5 - Fissuração final - SERIE F111035

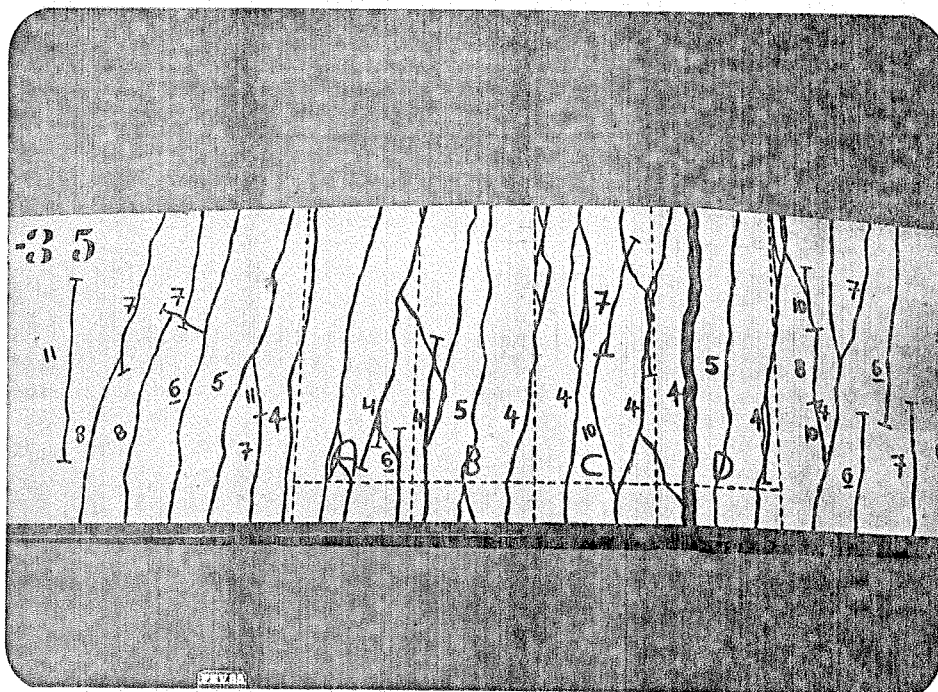


Foto 5.6 - Detalhe da fissuração final - peça F111R35-3

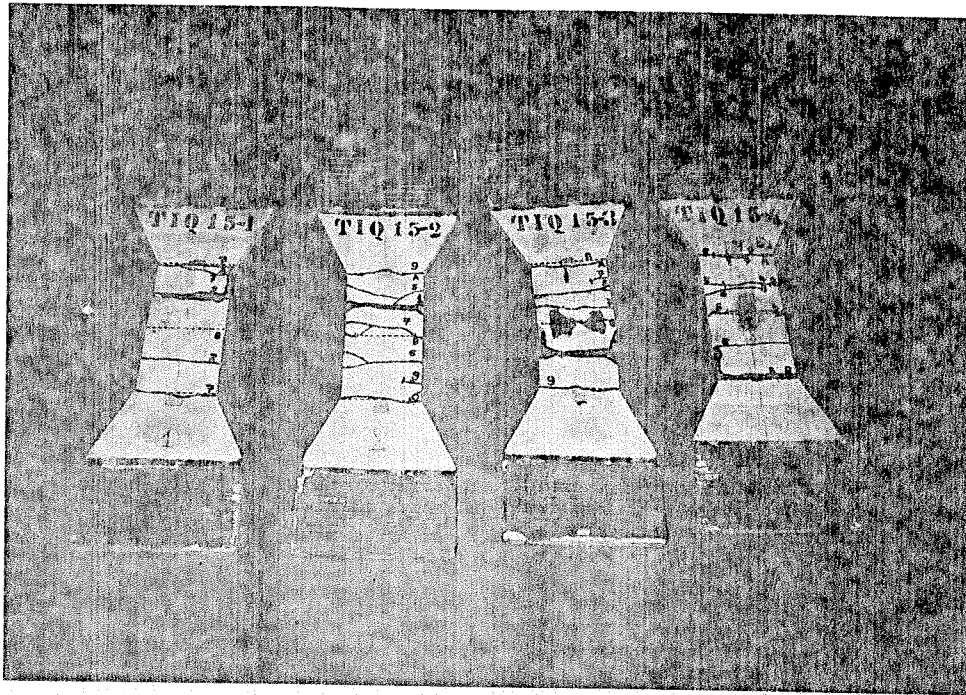


Foto 5.7 - Fissuração final - Série TIQ15 (face 1 - regiões A e B)

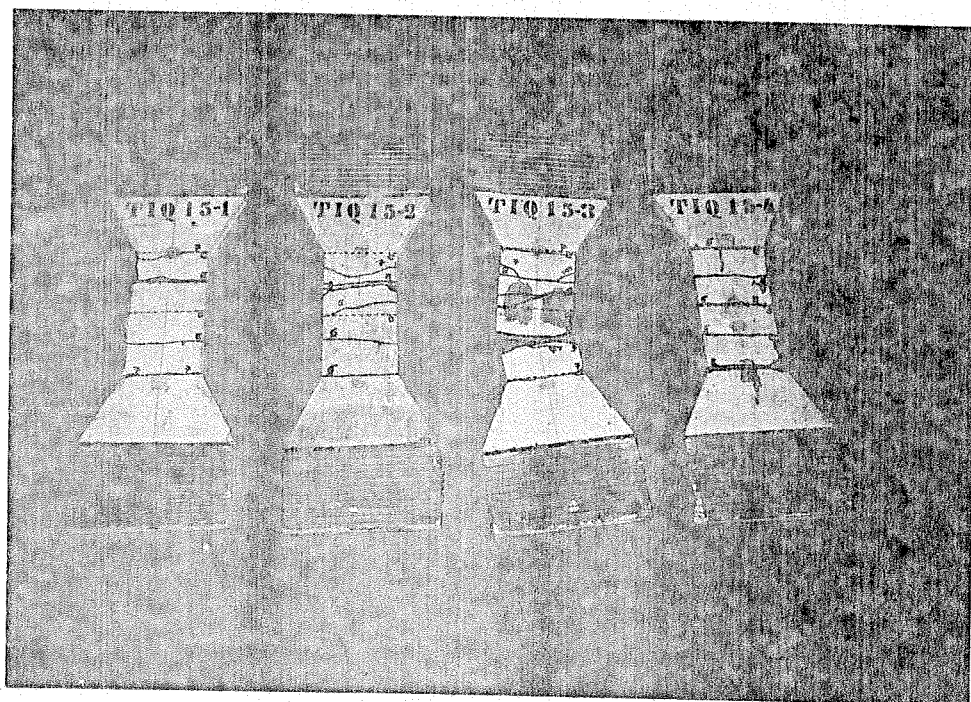


Foto 5.8 - Fissuração final - Série TIQ15 (face 2 - regiões C e D)

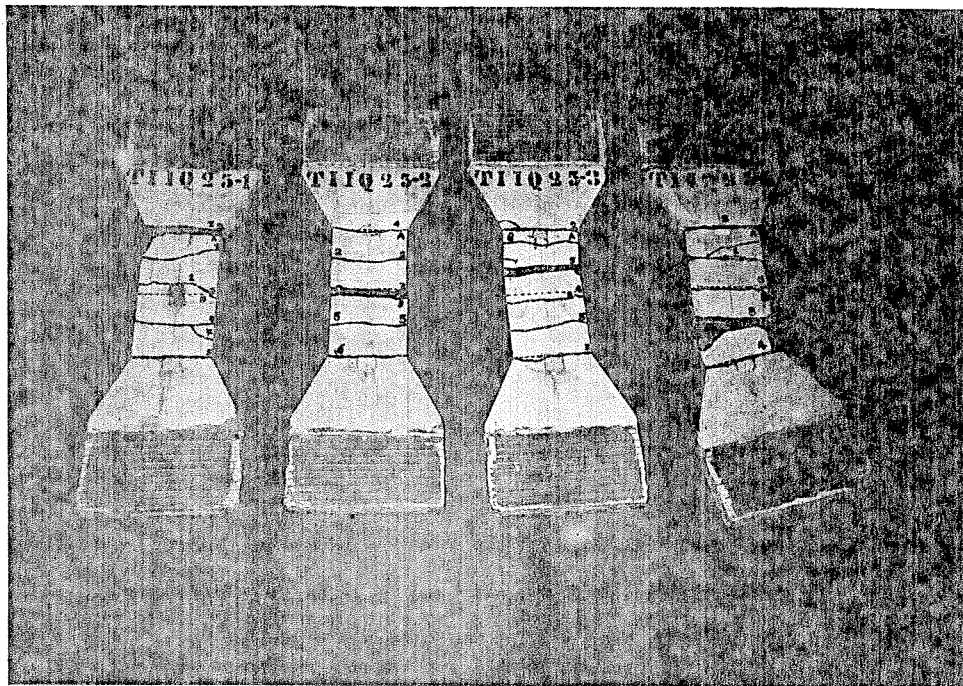


Foto 5.9 - Fissuração final - Série TI1025 (face 1 - regiões A e B)

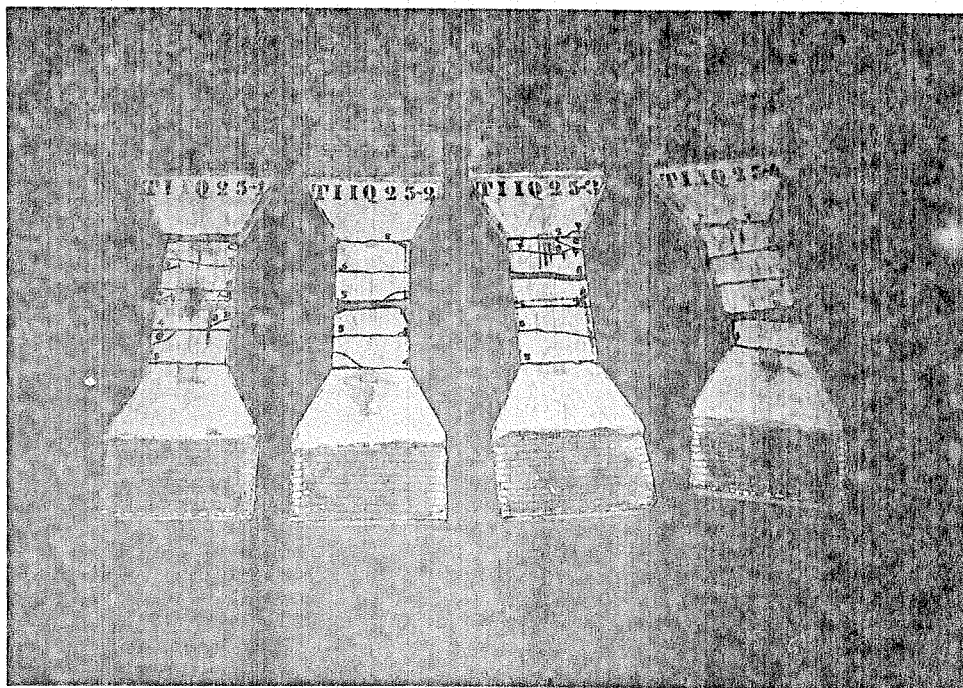


Foto 5.10 - Fissuração final - Série TI1025 (face 2 - regiões C e D)

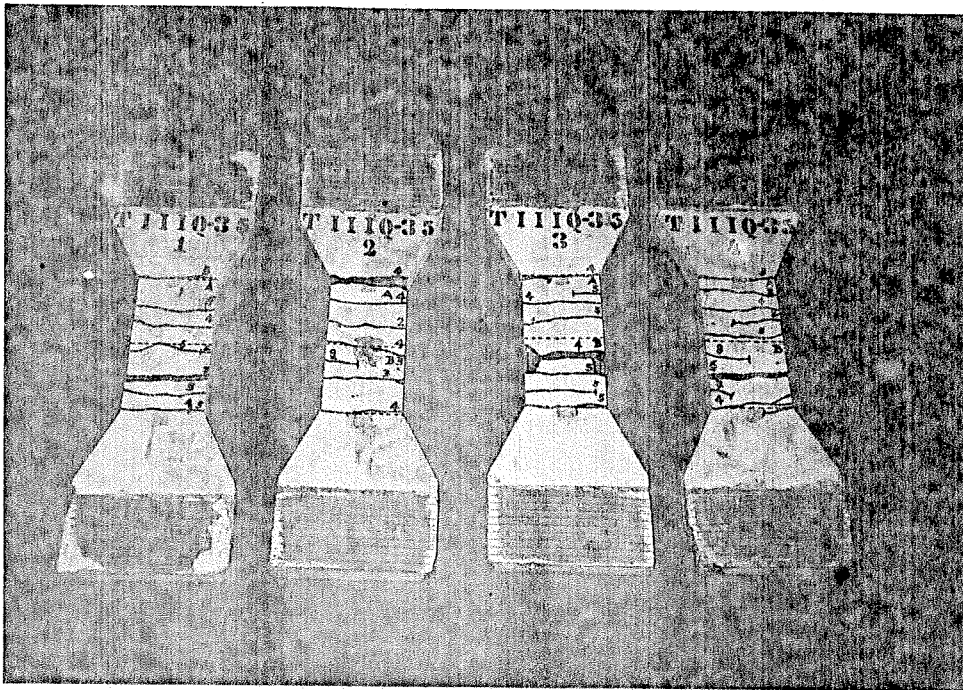


Foto 5.11 - Fissuração final - Série T111035 (face 1 - regiões A e B)

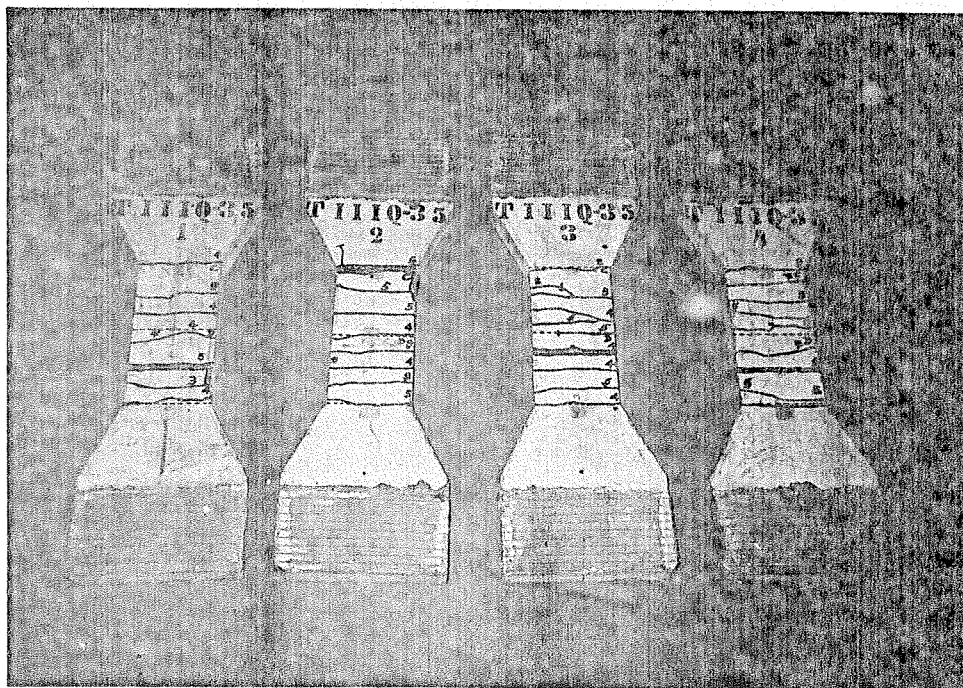


Foto 5.12 - Fissuração final - Série T111035 (face 2 - regiões C e D)

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Ensaios de Flexão

6.1.1 Comportamento geral dos ensaios

O comportamento geral do material argamassa armada submetido à flexão, pode ser visualizado facilmente pela análise dos diagramas carga-deslocamento dos ensaios. Confirmando a constatação de muitos pesquisadores internacionais, em ensaios anteriores com a argamassa armada - entre eles, Balaguru, Naaman e Shah ⁽¹⁰⁾ - verificou-se a ocorrência de 4 estágios distintos de comportamento do material:

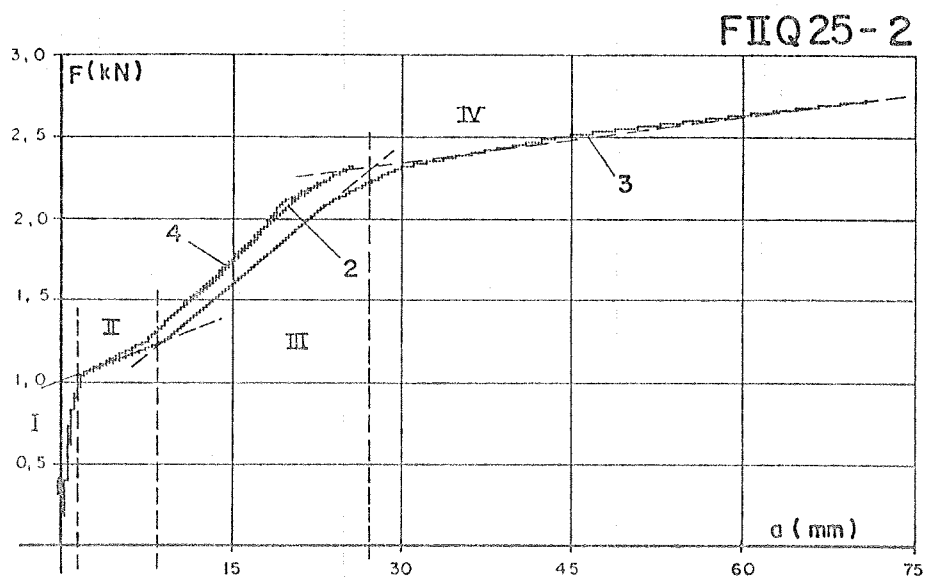


Fig. 6.1 - Diagrama carga-deslocamento de peça de argamassa armada submetida à flexão - Estágios característicos de comportamento.

- estágio I - estágio inicial de ensaio, caracterizado pelo comportamento elástico linear do material. A inclinação do diagrama carga-deslocamento em relação ao eixo das abscissas é acentuada e a argamassa ainda não apresenta fissuras;
- estágio II - o início do estágio II é detectado pela ocorrência de uma sensível redução na inclinação do trecho inicial do diagrama, em relação ao eixo das abscissas - essa "quebra" no diagrama representa a primeira perda de rigidez da peça, ocasionada pelo

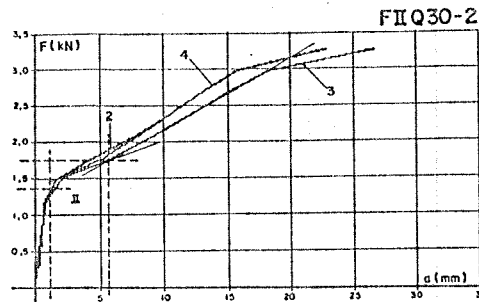
aparecimento da primeira fissura. Quando da obtenção do diagrama carga-deslocamento através de extensômetros elétricos indutivos, vê-se claramente o ponto de ocorrência da carga de fissuração - assumida aqui como a que provoca a primeira "quebra" no diagrama - e nota-se também que neste estágio a conformação exata do diagrama seria tipo "dente de serra", com sucessivos aumentos e reduções (perdas) de carga, estas últimas ocasionadas pelo aparecimento de novas fissuras. Quando o diagrama carga-deslocamento é obtido através de leituras periódicas de cargas e respectivos deslocamentos, perde-se essa sutileza, e o diagrama se configura como um trecho aproximadamente reto. No transcorrer deste estágio, as fissuras vão aumentando em número até atingir um total que se manterá praticamente constante até a finalização do ensaio (fig. 6.2). Ocorre simultaneamente a isto um pequeno aumento na abertura das fissuras. Nos ensaios de flexão realizados, esse estágio ocorreu de maneira bastante rápida, compreendendo não mais que duas etapas de carregamento.

- estágio III - neste estágio, o diagrama pode esboçar um ligeiro aumento na sua declividade, em relação ao eixo das abscissas - nem sempre esse acréscimo é perceptível, e, de qualquer forma, a declividade atingida está bem aquém da observada no estágio I. Caracteriza-se esse estágio por um aumento gradual e sensível na abertura das fissuras (fig. 6.3). Muitos pesquisadores internacionais consideram os estágios II e III como um único, caracterizado pelo aparecimento e desenvolvimento da fissuração.
- estágio IV - o último estágio do comportamento das peças submetidas à flexão poderá ser caracterizado ou não, dependendo das deformações a que está submetida a armadura nesta etapa final de ensaio. Nele ocorre o escoamento da armadura - para as telas empregadas, as deformações seriam da ordem de 4,5% a 6,0% - resultando portanto um trecho linear, praticamente paralelo ao eixo das abscissas.

PROPRIEDADES MECANICAS DA ARGAMASSA ARMADA COM TELAS SOLDADAS
DADOS GERAIS DE ENSAIO

TIPO:ensaio de flexao

PECA ENSAIADA:FIIQ30-2



DESENVOLVIMENTO DA FISSURACAO

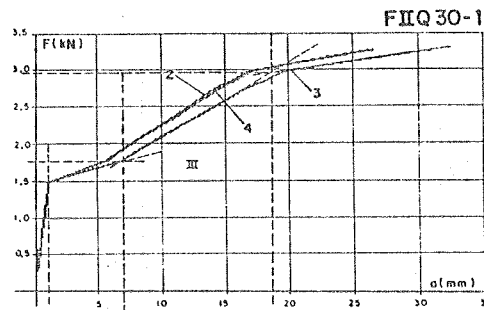
FASE	CARGA (kN)	F/FR	F/FU	FISSURACAO ABERTURAS (mm)					NUMERO	ESPAC. MEDIO (mm)
				A	B	C	D	MEDIA		
				5	1.500	1.11	0.41	---		
6	1.800	1.33	0.50	0.08	0.08	0.10	0.06	0.08	5	43
7	2.100	1.56	0.58	0.10	0.09	0.14	0.10	0.10	7	47
8	2.400	1.78	0.66	0.11	0.11	0.15	0.11	0.12	10	51
9	2.700	2.00	0.75	0.12	0.13	0.18	0.14	0.14	10	51
10	3.000	2.22	0.83	0.16	0.16	0.25	0.15	0.18	10	51
11	3.300	2.45	0.91	0.25	0.30	0.40	0.25	0.30	10	51

Fig. 6.2 - Comportamento caracteristico da peça no estágio II - Aumento considerável no número de fissuras e pequeno aumento nas suas aberturas.

PROPRIEDADES MECANICAS DA ARGAMASSA ARMADA COM TELAS SOLDADAS
DADOS GERAIS DE ENSAIO

TIPO:ensaio de flexao

PECA ENSAIADA:FIIQ30-1



DESENVOLVIMENTO DA FISSURACAO

FASE	CARGA (kN)	F/FR	F/FU	FISSURACAO ABERTURAS (mm)					NUMERO	ESPAC. MEDIO (mm)
				A	B	C	D	MEDIA		
				6	1.800	1.20	0.22	0.09		
7	2.100	1.41	0.30	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10	9	34
8	2.400	1.61	0.39	0.12	0.13	0.13	0.13	0.12	10	30
9	2.700	1.81	0.48	0.14	0.16	0.16	0.15	0.15	12	24
10	3.000	2.01	0.55	0.18	0.20	0.20	0.18	0.19	12	24
11	3.300	2.21	0.95	0.50	0.40	0.45	0.30	0.41	12	24

Fig. 6.3 - Comportamento caracteristico da peça no estágio III - Aumento gradual e sensível na abertura das fissuras.

6.1.2 Carga de fissuração

A carga de fissuração foi assumida como aquela em que ocorria a primeira "quebra" no diagrama carga-deslocamento (25). O uso de extensômetros elétricos indutivos, nestes ensaios, facilitou bastante a obtenção precisa desses valores de carregamento.

Os resultados médios obtidos para o momento de fissuração (M_f), com o cálculo de seus respectivos índices estatísticos estão mostrados na tab. 6.1

M O M E N T O D E F I S S U R A C A O					
SERIE	MEDIA (kN.cm)	DESVIO PADRAO	COEF. VAR.	INTERVALO CONFIANCA MEDIA (95%)	
FIQ15	6,008	1,442	0,24	3,361	8,655
FIR15	5,220	0,686	0,13	3,961	6,479
F15	8,483	1,334	0,16	6,034	10,932
FIIQ17.5	7,800	0,393	0,05	7,078	8,522
FIIR17.5	8,021	1,346	0,17	5,550	10,492
F17.5	9,060	0,432	0,05	8,267	9,853
FIIQ25	16,541	2,030	0,12	12,814	20,268
FIIR25	16,684	1,563	0,09	13,814	19,554
F25	17,366	3,283	0,19	11,338	23,394
FIIQ30	19,376	2,348	0,12	15,065	23,687
FIIR30	22,091	2,122	0,10	18,195	25,987
F30	27,593	0,845	0,03	26,042	29,144
FIIQ35	22,703	2,011	0,09	19,011	26,395
FIIR35	25,005	1,922	0,08	21,476	28,534
F35	17,216	0,919	0,05	15,529	18,903

Tab. 6.1 - Valores experimentais do momento de fissuração.

Existem muitas formulações teóricas que podem ser usadas para analisar os resultados experimentais do momento de fissuração. Grande parte dos pesquisadores internacionais tem sugerido uma correlação direta entre o momento de fissuração e a taxa geométrica de armadura ou a taxa superficial de armadura (17, 19, 21).

De análises anteriormente feitas (15), notou-se que, para as taxas de armadura usuais da argamassa armada no Brasil (80 kg/m³ a 250 kg/m³), essas formulações internacionais não têm grande validade.

A tendência atual de trato do material, no tocante à carga de fissuração, é encará-lo como um concreto armado de pequena espessura, onde a resistência à fissuração fica predominantemente ligada à qualidade da argamassa e às

características geométricas do elemento. Tal conceito já foi estudado teórica e experimentalmente para vigas de concreto armado ⁽¹²⁾ e está atualmente sendo estendido ao Projeto de Norma de Argamassa Armada ⁽¹³⁾.

A formulação teórica do fenômeno - seguindo as proposições da NBR 6118 ⁽³⁾ - tem as seguintes hipóteses:

- a) a deformação de ruptura à tração da argamassa é igual a $1,5 \times 2,7 f_{t,3}/E_c$;
- b) o diagrama de tensões de compressão na argamassa é triangular; a tensão na zona tracionada é uniforme e igual a $f_{t,3}$;
- c) seções transversais planas permanecem planas.

O efeito da retração deve sempre ser levado em conta e pode ser considerado, de maneira simplificada e somente nas condições correntes de utilização do material, supondo-se a tensão de tração igual a $0,75 f_{t,3}$ e desprezando-se a armadura.

Com base nestas hipóteses, os diagramas de tensões e deformações na seção transversal ficam como ilustrado na fig. 6.4 e o desdobramento das equações, com a consideração dos valores obtidos em ensaios - e não os valores característicos ou de cálculo - está feito a seguir.

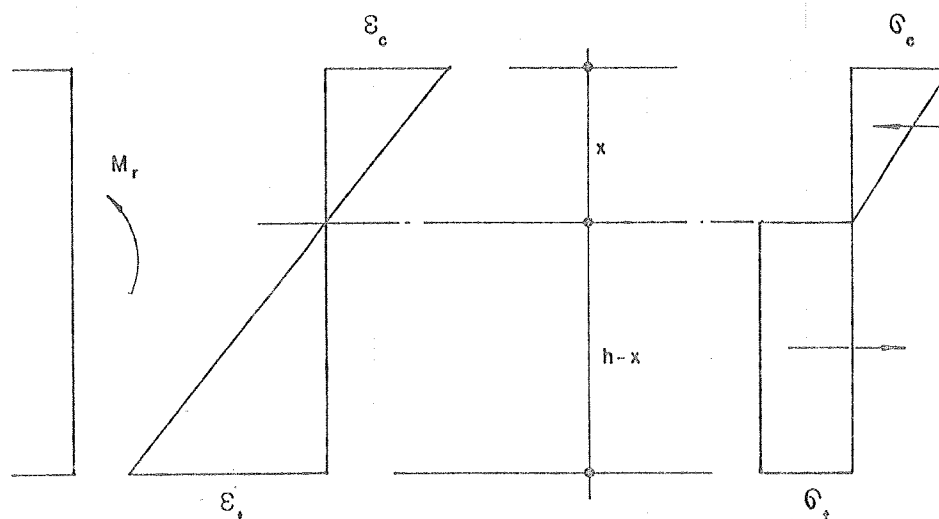


Fig. 6.4 - Momento de fissuração da argamassa - Formulação teórica de acordo com a NBR 6118.

$$\epsilon_c = 1,5 \times 2,7 f_{t,3}/E_c = 4,05 f_{t,3}/E_c \quad (6.1)$$

$$\sigma_t = f_{t,3} \text{ (sem consideração da retração), ou} \quad (6.2)$$

$$\sigma_c = 0,75 f_{t3} \text{ (com consideração da retração),} \quad (6.3)$$

onde:

- ϵ_t = deformação específica da argamassa por tração;
 f_{t3} = resistência média à tração dos corpos de prova à idade de ensaio;
 E_c = módulo de deformação longitudinal da argamassa.

No caso de seção retangular, sujeita à flexão normal simples tem-se:

- equação de compatibilidade de deformações

$$\epsilon_c/x = \epsilon_t/(h-x) = 4,05 f_{t3}/[E_c(h-x)] \quad (6.4)$$

- equações de equilíbrio

$$\sum N = 0 \quad \sigma_c \cdot b \cdot x/2 = \sigma_c \cdot b(h-x) = f_{t3} \cdot b(h-x) \quad (6.5)$$

$$\sum M = M_r \quad \sigma_c \cdot b \cdot x/2 \left[2 \cdot x/3 + (h-x)/2 \right] = M_r \quad (6.6)$$

sendo:

- ϵ_c = deformação específica da argamassa por compressão
 x = distância da linha neutra ao ponto de maior encurtamento, na seção transversal geométrica de uma peça fletida
 h = altura total da seção transversal
 b = largura da seção transversal
 σ_c = tensão normal de compressão na argamassa
 M_r = momento de fissuração

Tem-se ainda que, para este estágio de comportamento, pode-se escrever:

$$\sigma_c = E_c \cdot \epsilon_c \quad (6.7)$$

Combinando-se as equações (6.5) e (6.7):

$$E_c \cdot \epsilon_c \cdot b \cdot x/2 = f_{t3} \cdot b(h-x) \text{ , ou, admitindo-se } b \neq 0: \quad (6.8)$$

$$\epsilon_c = 2 \cdot f_{t3} (h-x) / (E_c \cdot x) \quad (6.9)$$

Substituindo-se, então, (6.9) em (6.4) tem-se:

$$2 \cdot f_{t3} (h-x) / (E_c \cdot x^2) = 4,05 \cdot f_{t3} / E_c (h-x) \quad (6.10)$$

Considerando-se $f_{t3} \neq 0$ e $E_c \neq 0$, e rearranjando-se (6.10) obtêm-se:

$$x = 0,4127 \cdot h \quad (6.11)$$

De (6.5) e (6.6):

$$\sigma_c = 2,8461 f_{tj} \quad (6.12)$$

$$M_r = 0,3340 \cdot f_{tj} \cdot bh^2 \quad (6.13)$$

O termo $0,3340 \cdot bh^2$ pode ser considerado como um módulo de resistência plástica (W_p) do material, fazendo com que a expressão (6.13) possa ser escrita:

$$M_r = f_{tj} \cdot W_p \quad (6.14)$$

A utilização de um valor de referência (W_p) para o cálculo do momento de fissuração é também indicada pela norma soviética (32).

Nota: Conforme já explicitado, considerando-se simplificada-mente a retração, os valores obtidos pelas equações (6.12) e (6.13) deverão ser multiplicados por 0,75.

De posse da equação (6.13) e substituindo-se os valores de f_{tj} das argamassagens de cada uma das séries - a consideração simplificada da retração está sendo feita somente para as séries com armaduras - pode-se obter a tabela 6.2, onde se compara os valores experimentais de ensaio com a formulação de concreto armado - eq. 6.13 - e a proposta por Surya Kumar e Sharma (10).

Na busca de uma consideração mais precisa para o efeito da retração da argamassa no momento de fissuração de peças armadas - fato de urgente necessidade, conforme já explicitado por Hanai (14) - apresenta-se a seguir equacionamento desse fenômeno, de acordo com Nilo Andrade Amaral (1). O estudo é feito separadamente para os casos de armaduras simétricas e não simétricas.

Caso 1: Armaduras simétricas

A fig. 6.5 ilustra uma peça de argamassa de comprimento unitário. Devido à retração, ela sofre um encurtamento ϵ_{cm} . Se a peça tiver armaduras longitudinais simetricamente dispostas - e de iguais áreas - ela se submeterá a uma deformação ϵ_m , menor que ϵ_{cm} . Analisando de outra maneira, seria o equivalente a dizer que a peça sofre inicialmente um encurtamento ϵ_{cm} , seguido de um estiramento ϵ_m , causado pela armadura que se opõe a esse efeito.

MOMENTO DE FISSURACAO - Comparação experimental-teórico

SERIE	M_r (kN.cm) exper.	M_r (kN.cm) eq. 6.13	$\frac{\text{exp.}}{\text{teor.}}$ eq. 6.13	M_r (kN.cm) ref. (18)	$\frac{\text{exp.}}{\text{teor.}}$ ref. (18)
FIQ15	6,008	5,563	1,08	3,906	1,54
FIR15	5,220	3,906	1,34	4,883	1,07
F15	8,483	6,313	1,34	*****	****
FIQ17.5	7,800	7,733	1,01	6,217	1,25
FIR17.5	8,021	7,089	1,13	8,511	0,94
F17.5	9,060	9,666	0,94	*****	****
FIQ25	16,541	13,480	1,23	11,506	1,44
FIR25	16,684	11,836	1,41	14,788	1,13
F25	17,366	15,782	1,10	*****	****
FIQ30	19,376	17,517	1,11	15,624	1,24
FIR30	22,091	13,256	1,67	19,530	1,13
F30	27,593	22,725	1,21	*****	****
FIQ35	22,703	16,755	1,35	24,868	0,91
FIR35	25,005	19,977	1,25	34,043	0,73
F35	17,216	27,495	0,63	*****	****

Tab. 6.2 - Comparação de valores teóricos e experimentais do momento de fissuração, com consideração simplificada da retração.

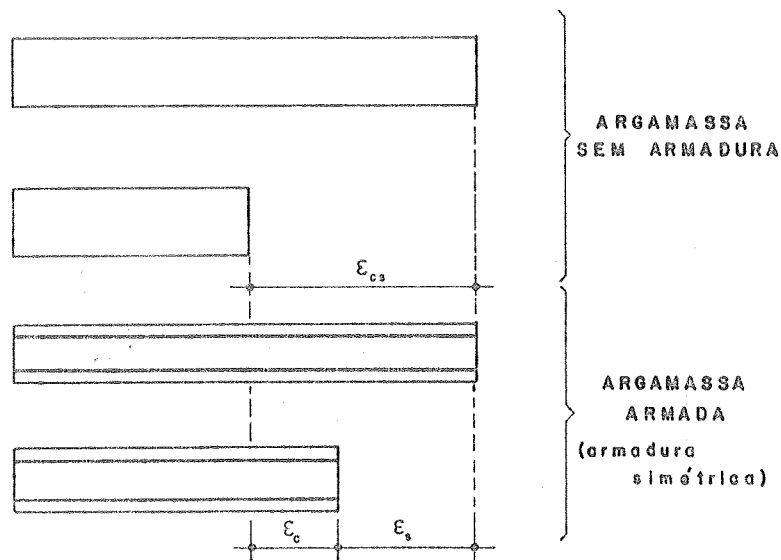


Fig. 6.5 - Efeito da retração em peças de argamassa sem armadura e argamassa com armadura simétrica.

Assim sendo, quando da ocorrência da retração, a armadura ficará comprimida por uma força Z, tal que:

$$Z = A_m \cdot E_m \cdot \epsilon_m, \text{ onde:} \quad (6.15)$$

A_m = área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada;

E_m = módulo de deformação longitudinal do aço;

ϵ_m = deformação específica do aço;

A_c = área da seção transversal de argamassa.

A força Z provocará tração na argamassa, tal que:

$$Z = (A_c - A_m) E_c \cdot \epsilon_c \quad (6.16)$$

Conforme fig. 6.5, tem-se ainda que:

$$\epsilon_{cm} = \epsilon_c + \epsilon_m \quad (6.17)$$

Igualando-se portanto as equações (6.15) e (6.16) e usando-se a equação (6.17):

$$A_m \cdot E_m \cdot \epsilon_m = (A_c - A_m) E_c (\epsilon_{cm} - \epsilon_m) \quad (6.18)$$

Tomando-se agora como $\alpha_m = E_m/E_c$ e $\beta = A_m/(A_c - A_m)$, a equação (6.18) fica:

$$\epsilon_m = \epsilon_{cm} / (1 + \alpha_m \cdot \beta) \quad (6.19)$$

Dessa forma, a expressão que fornece a pré-tração imposta à argamassa (σ_{ct}) devido à retração é:

$$\sigma_{ct} = E_c (\epsilon_{cm} \cdot \alpha_m \cdot \beta) / (1 + \alpha_m \cdot \beta) \quad (6.20)$$

O efeito da retração pode ser expresso através de uma força normal externa de tração, dada por:

$$Z = \sigma_{ct} \cdot A_c \quad (6.21)$$

Fazendo-se uso de equacionamento já desenvolvido por Castanho ⁽¹⁴⁾ para o cálculo do momento de fissuração - quando atua uma força normal externa - tem-se a formulação final:

$$M_c = f_{t3} \cdot W_p - Z \cdot h/6 \quad (6.22)$$

Caso 2: Armaduras assimétricas

Analogamente ao caso 1, tem-se na fig. 6.6 a ilustração do efeito da retração, em peças com armadura não simétrica.

Nota-se agora que a força de compressão na armadura (Z) provocará uma pré-tração desigual na seção transversal da peça.

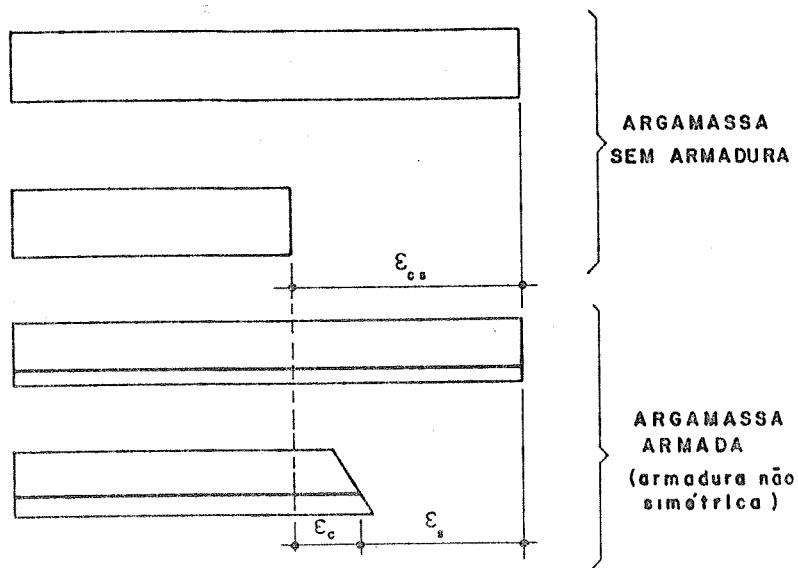


Fig. 6.6 - Efeito da retração em peças de argamassa sem armadura e argamassa com armadura não simétrica.

Admitindo-se força de compressão Z na armadura, tem-se:

$$\epsilon_m = Z / (A_m \cdot E_m) \quad (6.23)$$

A argamassa fica então solicitada por uma força excêntrica Z , que provocará tensões, em uma fibra distante y da posição da linha neutra, expressas por:

$$\sigma_c = Z/A_c \pm M/I_c \cdot y, \text{ onde:} \quad (6.24)$$

M = momento fletor provocado pela força excêntrica Z ;

I_c = momento de inércia da seção geométrica de argamassa.

Considerando-se a seção transversal da fig. 6.7 ter-se-á:

$$M = Z(y_m - x), \text{ onde:} \quad (6.25)$$

y_m = distância da armadura tracionada à borda comprimida da seção transversal de peça fletida.

Com (6.25), particularizando-se (6.24) para o caso de tensão na argamassa "próxima" à armadura:

$$\sigma_c = Z/A_c + Z(y_m - x) / [I_c (y_m - x)] \quad (6.26)$$

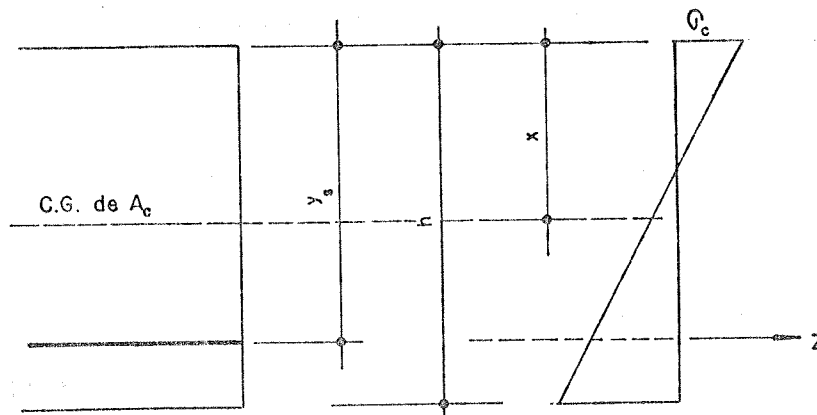


Fig. 6.7 - Diagrama de tensões na seção transversal de peça submetida à tração excêntrica

O alongamento correspondente a esta fibra será:

$$\epsilon_c = \sigma_c / E_c = Z / E_c \left[1 / A_c + (y_m - x)^2 / I_c \right] \quad (6.27)$$

Pela fig. 6.6 tem-se:

$$\epsilon_{c_m} = \epsilon_c + \epsilon_m \quad (6.28)$$

Substituindo-se (6.23) e (6.27) em (6.28):

$$\epsilon_{c_m} = Z / E_c \left[1 / A_c + (y_m - x)^2 / I_c \right] + Z / (A_m \cdot E_m) \quad (6.29)$$

Tomando-se como $\beta = A_m / A_c$ e $\alpha_m = E_m / E_c$, a expressão anterior fica:

$$Z = (\epsilon_{c_m} \cdot A_m \cdot E_m) / \left\{ 1 + \alpha_m \beta + \left[\alpha_m \cdot A_m (y_m - x)^2 \right] / I_c \right\} \quad (6.30)$$

Novamente, tomando-se o equacionamento de Castanho (14), agora particularizado para o caso de força normal excêntrica, tem-se:

$$M_c = f_{c_j} \cdot W_p - Z \left[y_m - 1/3 \cdot h \right] \quad (6.31)$$

As expressões (6.22) e (6.31) permitem fazer novas análises do momento de fissuração de peças armadas fletidas.

Para isso, alguns rápidos ensaios de avaliação de retração por secagem da argamassa foram necessários. São descritos a seguir.

Ensaios para avaliação da retração por secagem da argamassa

Consistiram na medição sistemática de variações de comprimento - para cálculo das deformações longitudinais devidas à retração - em corpos de prova de argamassa, contemplando cimentos, relações área/perímetro e tipos de cura empregados nos ensaios gerais de flexão e tração.

Os dados principais são:

- a) traço da argamassa
1 : 2 , a/c = 0,40
- b) tipos de cimento
- CP 32 - marca "Votoran"
- CP 32 - marca "Itaún"
- c) variações nas relações área/perímetro (A/P) dos elementos dos ensaios gerais e dos ensaios de retração
- ensaios gerais $0,68 \text{ cm}^{-1}$ a $1,50 \text{ cm}^{-1}$
- ensaios de retração
c.p. 1 $A/P = 1,24 \text{ cm}^{-1}$
c.p. 2 $A/P = 0,64 \text{ cm}^{-1}$
- d) tipos de cura empregados nos ensaios de retração
- Cura tipo I
. 1 dia no molde
. 22 dias em câmara úmida
. 7 dias ao ar

- Cura tipo II
. 1 dia no molde
. 24 dias em câmara úmida
. 5 dias ao ar
- e) quantidade de corpos de prova
3 exemplares, para cada série com tipo de cimento, relação área/perímetro e tipo de cura fixos.
- f) frequência das medições
- início: 23º dia (cura tipo I)
25º dia (cura tipo II)

Os resultados principais destes ensaios estão na tab. 6.3 e na fig. 6.8

DEFORMACOES MEDIAS (X 10⁴) DOS ENSAIOS DE RETRACAO

CIMENTO	A/P	CURA	23	24	25	26	27	28	29	30
CIMENTO	1,240	I	131,7	81,0	20,2			-55,8	-86,2	-111,5
		II			141,6			40,5	7,6	-30,4
	0,635	I	115,1	43,3	-52,8			-225,5	-244,7	-292,8
		II			135,5			-135,6	-174,3	-213,0
VOTORAN	1,240	I	76,1	25,3	-35,5			-147,1	-177,6	
		II			111,5			-70,9	-111,6	
	0,635	I	101,8	-63,1	-179,4			-344,3	-388,0	
		II			106,7			-228,0	-281,4	

Tab. 6.3 - Deformações médias dos corpos-de-prova dos ensaios de retração.

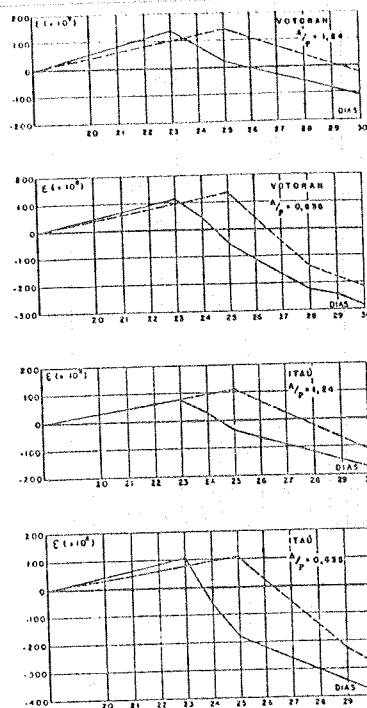


Fig. 6.8 - Evolução das deformações de corpos-de-prova ensaiados para avaliação da retração da argamassa.

Os valores de deformações, em cada linha da tabela, foram obtidos pela média aritmética dos resultados dos 3 corpos de prova ensaiados.

Nota-se rapidamente a grande variação obtida nos resultados. Analisando-se a coluna do 30º dia pode-se dizer que:

- o cimento de marca "Itaú" favoreceu relativamente a ocorrência de retração;
- para os dois tipos de cimento, é grande a diferença de retração registrada entre c.p. com relação A/P de 1,24 e c.p. com relação A/P de 0,635;
- a cura do tipo II - maior prazo com o c.p. em câmara úmida - propiciou a ocorrência de retrações bem menores.

Fica difícil, entretanto, admitir-se valores de retração como representativos das peças dos ensaios gerais.

Somente com o objetivo de se obter alguns resultados numéricos a respeito da consideração "precisa" da retração em peças submetidas à flexão, são adotados como representativos os seguintes valores de retração:

- séries com 15 e 17,5 mm de espessura:
 $\epsilon_{cm} = 250 \times 10^{-4}$ (A/P = 0,75)
- séries com 25, 30 e 35 mm de espessura:
 $\epsilon_{cm} = 100 \times 10^{-4}$ (A/P = 1,30)

Com esses valores pode-se elaborar a tab. 6.4, que apresenta uma comparação entre valores teóricos e experimentais do momento de fissuração das vigas, considerando-se o efeito da retração conforme equacionamento anterior, e não através de redução direta na resistência à tração da argamassa - sugestão da NBR 6118.

Nota: conforme já visto no cap. 3, a série com 15 mm de espessura apresenta arranjo não simétrico de armaduras, merecendo portanto consideração como tal, no cálculo.

Apesar das limitações implícitas na admissão dos valores de retração representativos das séries dos ensaios gerais, nota-se que, em se considerando detalhadamente a retração (tab. 6.4), conseguiu-se uma maior precisão na obtenção dos resultados, relativamente ao modelo teórico simplificado (tab. 6.2) proposto pela NBR 6118. As médias de relações exp./teor. - sem consideração das relações obtidas para peças não armadas, onde o fenômeno da retração não induz a ocorrência de pré-tração na argamassa - foram de 1,01 na tab. 6.4 e de 1,26 na tab. 6.2.

MOMENTO DE FISSURACAO - Comparação exp.-teor.				
SERIE	M _r (kN.cm) exper.	Z (kN) (*)	M _r (kN.cm) (**)	exp. teor.
F1015	6,008	1,1	6,984	0,86
F1R15	5,220	2,0	4,450	1,17
F15	8,483	---	6,313	1,34
F11017.5	7,800	2,2	9,667	0,81
F11R17.5	8,021	3,7	8,379	0,96
F17.5	9,060	---	9,666	0,94
F11025	16,541	1,1	17,536	0,94
F11R25	16,684	1,6	15,125	1,10
F25	17,366	---	15,782	1,10
F11030	19,376	1,3	22,727	0,85
F11R30	22,091	1,9	16,730	1,32
F30	27,593	---	22,725	1,21
F111035	22,703	1,5	21,482	1,06
F111R35	25,005	2,9	24,921	1,00
F35	17,216	---	27,495	0,63

(*) - valores obtidos de acordo com eqs. (6.21) ou (6.30), conf. disposição de armaduras
(**) - valores obtidos de acordo com eqs. (6.22) ou (6.31), conf. disposição de armaduras

Tab. 6.4 - Comparação de valores teóricos e experimentais do momento de fissuração, com consideração detalhada da retração.

6.1.3 Carga de ruptura

A carga de ruptura foi assumida como sendo aquela a partir da qual a peça não oferecia mais resistência ao carregamento. Em todos os ensaios de flexão, essa carga foi de fácil determinação, pois a situação acima descrita era atingida por ruptura de um dos dois materiais constituintes do material (argamassa ou armadura).

Os valores experimentais médios obtidos para o momento de ruptura (M_r) estão apresentados na tab. 6.5.

A resistência no estado limite último de peças fletidas de argamassa armada pode ser avaliada empregando-se os métodos consagrados no estudo da resistência do concreto armado.

M O M E N T O D E R U P T U R A

SERIE	MEDIA (kN.cm)	DESVIO PADRAO	COEF. VAR.	INTERVALO CONFIANCA	
				MEDIA	(95%)
FIQ15	15,889	1,553	0,10	13,038 --	18,740
FIR15	26,201	0,583	0,02	25,131 --	27,271
F15	8,483	1,334	0,16	6,034 --	10,932
FIQ17.5	29,445	1,992	0,07	25,788 --	33,102
FIR17.5	40,440	1,627	0,04	37,453 --	43,427
F17.5	9,060	0,432	0,05	8,267 --	9,853
FIQ25	42,229	2,905	0,07	36,895 --	47,563
FIR25	69,083	3,654	0,05	62,374 --	75,792
F25	17,366	3,283	0,19	11,338 --	23,394
FIQ30	53,475	1,703	0,03	50,348 --	56,602
FIR30	87,094	5,733	0,07	76,568 --	97,620
F30	27,593	0,845	0,03	26,042 --	29,144
FIQ35	92,760	2,221	0,02	88,682 --	96,838
FIR35	168,206	5,876	0,03	157,418 --	178,994
F35	17,216	0,919	0,05	15,529 --	18,903

Tab. 6.5 - Valores experimentais do momento de ruptura.

Muitos pesquisadores, entre eles Logan e Shah ⁽²⁰⁾, Surya Kumar e Sharma ⁽¹⁹⁾, Balaguru e Naaman ⁽⁹⁾, já confirmaram esse fato. Os modelos matemáticos por eles utilizados - em linhas gerais, todos obedecem às proposições do CEB - Comitê Eurointernacional do Concreto - têm fornecido bons resultados. Existem pequenas divergências nas hipóteses básicas assumidas nos diversos modelos. Já discutidas por Hanai ^(16, 17), essas divergências residem principalmente nos seguintes assuntos:

- encurtamento de ruptura da argamassa

Há relatos de ensaios efetuados por pesquisadores, sugerindo encurtamentos de ruptura da argamassa desde 0,30% até 0,60%; o comitê ACI - 549 ⁽²⁾ adota o valor de 0,30%. A norma brasileira de concreto assume o valor de 0,35%. Tendo em vista os bons resultados obtidos em ensaios anteriores com o modelo matemático brasileiro estabelecido para o concreto armado, fixou-se aqui o encurtamento de ruptura da argamassa em 0,35%.

- efeito da armadura na região comprimida dos elementos

Quando considerado, deverá ser feito com precauções. Hanai ⁽¹⁶⁾ comenta que em alguns casos, uma redução da resistência à compressão da argamassa é levada em conta, para compensar o possível efeito negativo da armadura comprimida -

por perda de estabilidade dos fios longitudinais - principalmente nas telas onde há ondulações dos fios, como por exemplo as telas entrelaçadas tipo "peneira".

A norma soviética ⁽³²⁾ especifica uma redução de 25% na resistência das telas na região comprimida, quando a taxa geométrica de armadura for superior a 1,5%.

No caso em questão, tendo-se em conta a utilização de telas eletrossoldadas com fios retilíneos, considerou-se o efeito dos fios longitudinais da armadura comprimida, sem nenhuma redução na resistência dos materiais constituintes (aço e argamassa). Essa consideração já foi adotada com sucesso em ensaios anteriores ⁽¹⁵⁾.

- módulo de deformação longitudinal das telas

O assunto é polêmico na medida em que o módulo de deformação longitudinal das telas nem sempre é igual ao módulo de deformação dos fios isolados. Nas telas tecidas, as ondulações e trançados dos fios acarretam, na maioria das vezes, módulo de deformação das telas menor que o do aço empregado. Alguns pesquisadores, nesse sentido, procurando interpretar o comportamento anisotrópico de algumas telas - devido principalmente a implicações diretas dos processos produtivos envolvidos - indicam coeficientes de rendimento para elas, nas várias direções consideradas.

A norma soviética ⁽³²⁾ recomenda o valor de 150 GPa para o módulo de deformação das telas. O Comitê ACI-549 ⁽²⁾ recomenda, para as telas soldadas de malha quadrada, a consideração de um módulo de deformação longitudinal aparente igual a 200 GPa.

Neste trabalho, o módulo de deformação longitudinal das telas soldadas será tomado igual ao dos fios que a constituem, ou seja, $E_m = 197$ GPa, conforme já mostrado no capítulo 3.

Com essas considerações e seguindo a NBR 6118, as hipóteses para o cálculo no estado limite último são:

- a) as seções transversais planas permanecem planas;
- b) para o encurtamento convencional de ruptura da argamassa nas seções não inteiramente comprimidas, considera-se o valor convencional de 0,35% ;
- c) o alongamento máximo permitido ao longo da armadura de tração é de 1% , a fim de prevenir a deformação plástica excessiva;
- d) a distribuição das tensões da argamassa na seção transversal se faz de acordo com o diagrama parábola-retângulo; permite-se a substituição desse diagrama pelo retângulo de altura $0,80 \cdot x$, com a tensão $0,85 \cdot f_{ca}$ ou $0,80 \cdot f_{ca}$, conforme a variação da largura da seção - analogamente ao concreto armado; despreza-se a resistência à tração da argamassa.
- e) a tensão na armadura é a correspondente à deformação determinada de acordo com as alíneas anteriores e obtida no diagrama tensão-deformação do aço.

Buscando facilitar a interpretação dessas hipóteses para o equacionamento teórico no estado limite último, são aqui reproduzidos alguns diagramas de Hanaei <14>:

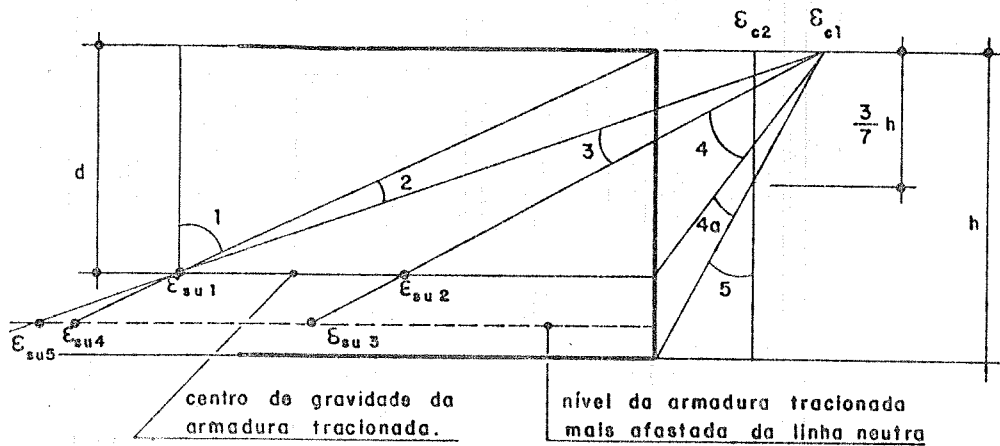


Fig. 6.9 - Casos possíveis de deformação da seção transversal no estado limite último. Devido à grande distribuição de armadura na seção transversal - aspecto característico da argamassa armada - é interessante adotar-se $\epsilon_{su5} = 1\%$ - alongamento máximo para os fios extremos - e $\epsilon_{su2} = \epsilon_{yd}$ - escoamento da parte predominante da armadura.

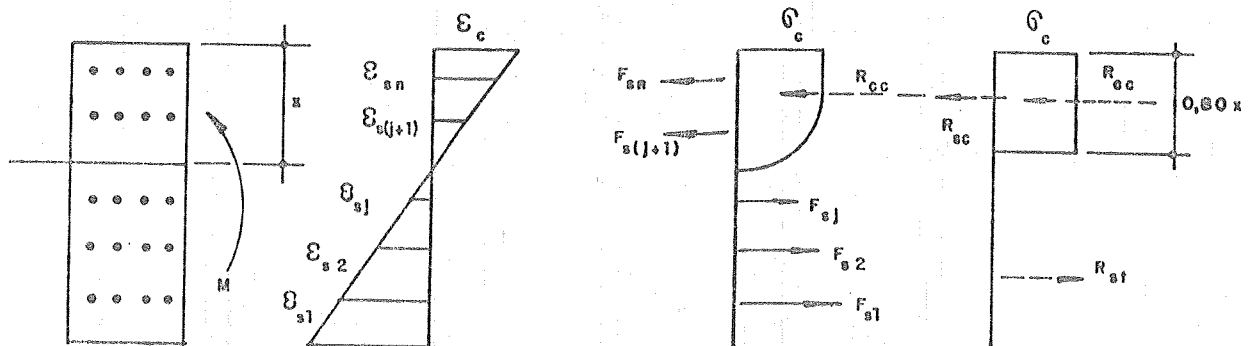


Fig. 6.10 - Distribuição de deformações e tensões ao longo da seção transversal. Consideração da simplificação ao diagrama parábola-retângulo.

Montando-se as equações de equilíbrio e de compatibilidade de deformações na seção transversal, chega-se a um

sistema de equações com 1 grau de indeterminação. Para as armaduras usuais de concreto armado, através de alguns artifícios lógicos - normalmente considera-se peça sub-armada, fixando-se $x=x_{34}$, ou seja, peça trabalhando no limite dos domínios 3 e 4 - obtêm-se sempre solução única.

Para a argamassa armada, o caso é um pouco mais complexo.

A distribuição do reforço metálico - armadura - ao longo de toda a seção geométrica faz com que a caracterização de peça sub-armada seja problemática, conforme visto na fig. 6.9. Em determinados estágios de comportamento da seção, pode-se ter parte da armadura tracionada escoando, e parte não.

Mesmo assim, se conseguíssemos determinar, através de critérios lógicos, uma das incógnitas, o sistema de equações seria de resolução trabalhosa, em face ao elevado número de equações.

Portanto, seguindo-se a opção até agora feita pela grande maioria dos calculistas de argamassa armada, procede-se nas situações usuais a um cálculo de verificação, considerando-se um determinado arranjo básico de armaduras.

O Grupo de São Carlos já possui programas que realizam esses cálculos através de um processo iterativo onde, a partir de um valor admitido da posição da linha neutra, verifica-se o equilíbrio da seção transversal.

Os resultados teóricos obtidos com uso desses programas são mostrados na tab. 6.6.

A média das relações entre resultados experimentais e teóricos foi de 1,12 (com consideração de todos resultados) ou de 1,16 (considerando-se somente os resultados de peças armadas). Desayi e Jacob, conforme mencionado por Kumar e Sharma ⁽¹⁹⁾, obtiveram relações de 1,24. Logan e Shah ⁽²⁰⁾ obtiveram relações de 1,25 a 1,30.

Nota-se que o modelo matemático proposto leva a resultados muito próximos dos reais.

MOMENTO DE RUPTURA - Comparação exp.-teor.

SERIE	M_u (kN.cm) exper.	M_u (kN.cm) teor.	$\frac{\text{exp.}}{\text{teor.}}$
FIQ15	15,889	14,663	1,08
FIR15	26,201	22,321	1,17
F15	8,483	6,313	1,34
FIIQ17.5	29,445	25,076	1,17
FIIR17.5	40,440	31,950	1,27
F17.5	9,060	9,666	0,94
FIIQ25	42,229	36,631	1,15
FIIR25	69,083	59,943	1,15
F25	17,366	15,782	1,10
FIIQ30	53,475	45,700	1,17
FIIR30	87,094	75,631	1,15
F30	27,593	22,725	1,21
FIIIQ35	92,760	96,689	1,21
FIIR35	168,206	162,904	1,03
F35	17,216	27,495	0,63

Tab. 6.6 - Comparação de valores teóricos e experimentais do momento de ruptura.

Considerando-se a posição teórica da linha neutra, fornecida pelo programa de cálculo do momento fletor último, e as hipóteses teóricas assumidas para o estado limite último, pode-se montar o provável diagrama de deformações teóricas da seção transversal, em um instante próximo da ruína (fig. 6.11 e fig. 6.12). Os diagramas de deformações experimentais dessas figuras foram obtidos a partir das médias de deformações observadas na argamassa e no aço, em instante um pouco anterior à ruína característica (normalmente, as últimas medições de deformações nos ensaios foram feitas com cargas de aproximadamente 90% da carga final).

Apesar de todas as limitações inclusas na comparação proposta nas figs. 6.11 e 6.12, pode-se ver a proximidade de resultados - a coincidência exata entre os valores teóricos e experimentais seria muito difícil de ser obtida, pois, em todas as situações de deformações contempladas com as séries estudadas, pelo menos um dos materiais (argamassa ou aço) entra em franco regime plástico.

SÉRIE	SEÇÃO TRANSVERSAL	DEFORMAÇÕES(‰)	
		EXPERIMENTAL	TEÓRICO
FIQ 15			
FIR 15			
FIQ 17,5			
FIR 17,5			
FIQ 25			

Fig. 6.11 - Distribuição de deformações na seção transversal - comparação de valores teóricos e experimentais.

SÉRIE	SEÇÃO TRANSVERSAL	DEFORMAÇÕES (%)	
		EXPERIMENTAL	TEÓRICO
F II R 25			
F II Q 30			
F II R 30			
F III Q 35			
F III R 35			

Fig. 6.12 - Distribuição de deformações na seção transversal - comparação de valores teóricos e experimentais.

6.1.4 Deslocamentos

O estudo desse fenômeno foi iniciado por sua verificação teórica.

De maneira geral, pode-se encaminhá-la com o uso da formulação tradicional da resistência dos materiais (29).

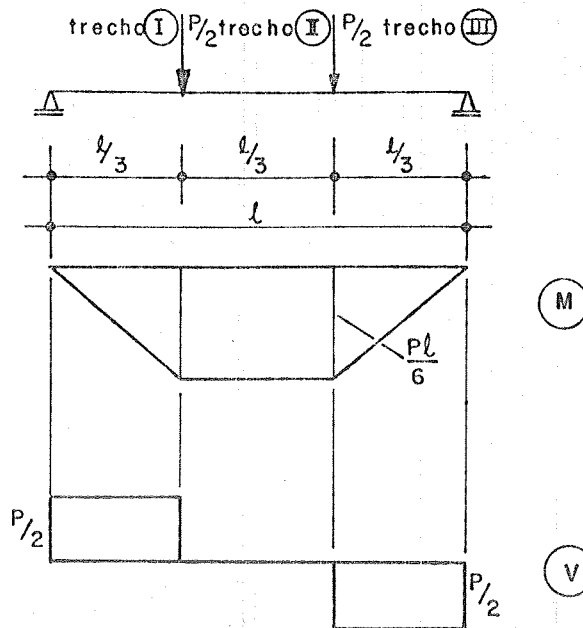


Fig. 6.13 - Esquema estático e de carregamento e diagramas de momento fleitor e força cortante para as vigas dos ensaios de flexão.

No caso em questão, a equação geral da elástica é obtida para cada um dos trechos I, II e III da fig. 6.13, fazendo-se uso da equação (6.32) e de algumas compatibilizações que a situação permite.

$$d^2y/dx^2 = -M/E.I \quad (6.32)$$

Dessa forma, tem-se:

- para o trecho I

$$E.I.y = -P.x^3/12 + C_a.x + C_b \quad (6.33)$$

- para o trecho II

$$E.I.y = -P.l.x^3/12 + C_c.x \quad (6.34)$$

- para o trecho III

$$E.I.y = -P.l.x^2/4 + P.x^3/12 + C_{22}.x + C_4 \quad (6.35)$$

As compatibilizações são as seguintes:

$$\begin{aligned} - x = 0 & \quad y = 0 \\ - x = l & \quad y = 0 \\ - x = l/3 & \quad y(\text{trecho I}) = y(\text{trecho II}) \\ - x = 2.l/3 & \quad y(\text{trecho II}) = y(\text{trecho III}) \\ - x = l/3 & \quad dy/dx(\text{trecho I}) = dy/dx(\text{trecho II}) \\ - x = 2.l/3 & \quad dy/dx(\text{trecho II}) = dy/dx(\text{trecho III}) \end{aligned}$$

Resolvendo-se o sistema de 6 equações e 6 incógnitas assim formado, obtém-se como solução as equações finais das elásticas nos diversos trechos considerados:

- para o trecho I

$$y = -P.x^3/(12.E.I) + P.l^2.x/(18.E.I) \quad (6.36)$$

- para o trecho II

$$y = -P.l.x^2/(12.E.I) + P.l^2.x/(12.E.I) - P.l^3/(324.E.I) \quad \dots \quad (6.37)$$

- para o trecho III

$$y = P.x^3/(12.E.I) - P.l.x^2/(4.E.I) + 7.P.l^2.x/(36.E.I) - P.l^3/(36.E.I) \quad \dots \quad (6.38)$$

Com isso, particularizando-se as equações para $x=l/3$ (e conseqüentemente $x=2.l/3$, devido à simetria do problema) e $x=l/2$ tem-se:

- para $x=l/3$ e $x=2.l/3$

$$y = 5.P.l^3/(324.E.I) \quad (6.39)$$

- para $x=l/2$

$$y = 23.P.l^3/(1296.E.I) \quad (6.40)$$

Na avaliação teórica dos deslocamentos, com uso das eqs. 6.39 e 6.40, foi inicialmente considerado o comportamento das peças no estágio I - momento de inércia da seção não fissurada, $I = I_1$ - até a etapa em que o carregamento correspondente ultrapassava a carga média de fissuração característica da série (tab. 6.1). A partir de então, o comportamento era assumido como correspondente ao estágio II - momento de inércia da seção fissurada, $I = I_2$. Complementarmente, para etapas com cargas superiores à carga média de fissuração, procurando considerar a rigidez variável ao longo das peças, foi analisado o comportamento teórico assumindo-se um momento de inércia equivalente - $I = I_{eq}$ - conforme introduzido por Branson ^(12,13) para o caso de

elementos de concreto armado, obedecendo-se a seguinte formulação:

$$I_{eq} = (M_c/M)^3 \cdot I_1 + [1 - (M_c/M)^3] \cdot I_2, \text{ onde:} \quad (6.41)$$

M_c = momento fletor de fissuração;
 M = momento fletor atuante;
 I_1 = momento de inércia no estágio I;
 I_2 = momento de inércia no estágio II

Essa expressão já foi utilizada por Balaguru ⁽¹¹⁾ na obtenção de curvaturas em vigas submetidas à flexão, aplicando-se a 4ª potência na relação entre momentos, quando se considerava o momento de inércia efetivo da viga na região fissurada, e a 3ª potência era utilizada na consideração desse parâmetro para a viga como um todo.

A expressão de Branson (6.41) também está sendo adotada no Projeto de Norma de Argamassa Armada ⁽¹²⁾, para avaliação dos deslocamentos.

Como módulo de deformação longitudinal da argamassa, a ser utilizado nas equações (6.39) e (6.40), foram adotados 5 valores distintos, assim obtidos:

$E_1 = E$, sendo E o módulo de deformação experimental, tangente à origem;

$E_2 = 0,85 \cdot E$, assumido aqui como um módulo de deformação experimental secante; (*)

$E_3 = 6600 \sqrt{f_{c3}}$, em MPa, conforme preconizado pela NBR 6618 para concreto armado;

$E_4 = 0,80 (6600 \sqrt{f_{c3}})$, em MPa, valor sugerido pelo Projeto de Norma de Argamassa Armada ⁽¹²⁾ para cálculo do módulo de deformação a partir da resistência à compressão da argamassa - módulo de deformação longitudinal tangente;

$E_5 = 0,85 \cdot 0,80 (6600 \sqrt{f_{c3}})$, em MPa, assumido aqui como um módulo de deformação secante (*), calculado a partir da resistência à compressão da argamassa.

(*) NOTA: A obtenção do módulo de deformação secante como 0,85 vezes o módulo de deformação tangente é sugestão do Projeto de Norma de Argamassa Armada ⁽¹²⁾.

Graficamente, os valores do módulo de deformação longitudinal adotados são os expostos na fig. 6.14 .

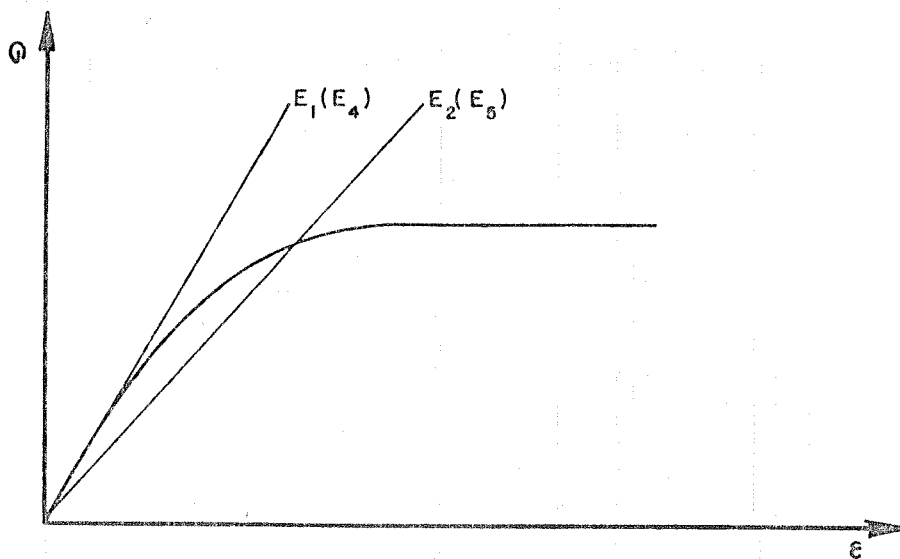


Fig. 6.14 - Esquema ilustrativo dos valores adotados para o módulo de deformação longitudinal da argamassa na avaliação teórica dos deslocamentos.

Para efeito de comparação entre os valores teóricos (eq. 6.39 e 6.40) e experimentais de deslocamentos, a média dos valores experimentais dos exemplares foi tomada como representativa do comportamento da série.

As tabelas 6.7 e 6.8 mostram os deslocamentos experimentais médios, os deslocamentos teóricos e as comparações exp./teor para uma série ensaiada à flexão, admitindo-se um dos módulos de deformação analisados. As relações exp./teor. são sempre calculadas para o ponto 3 - meio do vão.

Os resultados completos dos deslocamentos experimentais médios, dos deslocamentos teóricos - calculados para todos os 5 módulos de deformação citados - e das comparações entre valores teóricos e experimentais são apresentados no Anexo 3.

PROPRIEDADES MECANICAS DA ARGAMASSA ARMADA COM TELAS SOLDADAS
ENSAIO DE FLEXAO

DESLOCAMENTOS TRANSVERSAIS MEDIOS

SERIE:FI015

FASE	CARGA (kN)	DESLOC. TRANSV. MEDIOS (mm)		
		2	3	4
0	0.000	0.00	0.00	0.00
1	0.075	0.14	0.22	0.23
2	0.150	0.66	0.80	0.75
1	0.075	0.24	0.31	0.33
2	0.150	0.90	1.08	1.00
3	0.225	1.39	1.64	1.51
4	0.300	1.98	2.27	2.00
5	0.375	2.50	2.86	2.53
6	0.450	7.36	8.96	7.71
7	0.525	16.40	19.64	17.32
8	0.600	26.86	31.48	27.18
9	0.675	33.71	39.22	35.81
10	0.750	*****	46.02	*****
11	0.825	*****	46.00	*****
12	0.900	*****	52.00	*****

Tab. 6.7 - Deslocamentos médios de uma das séries ensaiadas à flexão. Obedecendo a convenção de pontos adotada anteriormente, os pontos 2 e 4 fazem referência aos terços do vão e o ponto 3 ao meio do vão.

PROPRIEDADES MECANICAS DA ARGAMASSA ARMADA COM TELAS SOLDADAS
ENSAIO DE FLEXAO

DESLOCAMENTOS TRANSVERSAIS TEORICOS

SERIE:FI015

E = 37600 MPa (valor experimental)

CARGA (kN)	DESLOC. TRANSVERSAIS TEORICOS (mm)						EXP/TEOR	
	pontos 2 e 4			ponto 3			EXP/	TEOR/
	aI	aII	ae	aI	aII	ae	aI(aII)	ae
0.000	0.00			0.00			0.00	
0.075	0.38			0.44			0.50	
0.150	0.74			0.87			0.91	
0.075	0.38			0.44			0.72	
0.150	0.76			0.87			1.23	
0.225	1.14			1.31			1.25	
0.300	1.52			1.75			1.29	
0.375	1.90			2.19			1.31	
0.450		22.17	3.10		25.49	3.57	0.35	2.50
0.525		25.85	5.31		29.73	6.11	0.66	3.21
0.600		29.54	8.22		33.98	9.46	0.92	3.32
0.675		33.23	11.78		38.22	13.55	1.02	2.89
0.750		36.92	15.86		42.46	18.24	1.08	2.52
EXP/aI x= 1.03 p= 0.32								
EXP/aII x= 1.05 q= 0.04								
EXP/ae x= 2.70 r= 0.26								

Tab. 6.8 - Deslocamentos teóricos de uma das séries ensaiadas à flexão e sua comparação com os valores experimentais médios. A primeira coluna das relações exp./teor. apresenta os valores experimentais comparados com os teóricos obtidos no estágio I - se a carga de ensaio ainda não ultrapassou a carga média de fissuração da série - ou no estágio II - em caso contrário. A segunda coluna apresenta comparação entre valores experimentais e teóricos obtidos com uso da formulação de Branson (eq. 6.41).

Procurando facilitar a análise comparativa das relações exp./teor., principalmente no tocante aos diversos módulos de deformação utilizados, foi elaborada a tab. 6.9.

DESLOCAMENTOS		- Médias das relações exp/teor														
SERIE	E ₁ (**)			E ₂			E ₃			E ₄			E ₅			
	(1)(***)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	
F1Q15	1,03	1,05	2,70	0,87	0,89	2,30	1,30	1,33	3,42	1,04	1,06	2,73	0,88	0,90	2,32	
F1R15	0,87	1,24	1,59	0,74	1,05	1,35	1,07	1,53	1,96	0,86	1,22	1,57	0,73	1,04	1,33	
F11Q17,5	0,86	1,17	1,79	0,73	0,99	1,52	1,25	1,69	2,60	1,00	1,35	2,08	0,85	1,15	1,76	
F11R17,5	0,91	1,57	1,76	0,77	1,33	1,50	1,17	2,02	2,27	0,94	1,61	1,82	0,80	1,37	1,54	
F11Q25	1,07	1,10	2,15	0,91	0,94	1,83	1,31	1,36	2,64	1,05	1,08	2,11	0,89	0,92	1,80	
F11R25	1,12	1,04	1,31	0,95	0,88	1,11	1,38	1,28	1,61	1,11	1,03	1,29	0,94	0,87	1,10	
F11Q30	1,11	1,01	1,79	0,94	0,86	1,52	1,30	1,18	2,10	1,04	0,95	1,68	0,88	0,80	1,43	
F11R30	0,96	0,95	1,12	0,81	0,81	0,96	1,12	1,19	1,41	0,96	0,95	1,12	0,81	0,81	0,95	
F111Q35	1,59	1,43	1,80	1,35	1,22	1,53	1,87	1,69	2,12	1,49	1,35	1,69	1,27	1,14	1,44	
F111R35	0,95	1,22	1,30	0,81	1,04	1,11	1,28	1,64	1,75	1,02	1,31	1,40	0,87	1,12	1,19	
médias das médias	1,05	1,18	1,73	0,89	1,00	1,47	1,31	1,49	2,19	1,05	1,19	1,75	0,89	1,01	1,49	

(*) - E₁, E₂, E₃, E₄ e E₅ conforme já definido

(**) - (1) = exp./a₁

(2) = exp./a₁₁

(3) = exp./a₀, onde:

a₁, a₁₁ e a₀ são os deslocamentos teóricos, no meio do vão, obtidos com I₁, I₂ e I₀, respectivamente

Tab. 6.9 - Médias das relações exp/teor, obtidas na avaliação dos deslocamentos no meio do vão, de vigas submetidas à flexão.

NOTA: No cálculo das médias das relações exp./teor. representativas de cada série, foram desconsiderados os valores correspondentes às três fases seguintes à carga de fissuração. Este tratamento se justificou em partes pelo fato de ser esta uma etapa muito particular do ensaio. Na sua análise teórica, a mudança de comportamento do estágio I para estágio II ocorre justamente na carga média de fissuração da série (ver tabelas de deslocamentos teóricos no Anexo) ao passo que a mudança de comportamento observada experimentalmente é distinta e característica a cada um dos exemplares. Assim sendo, tem-se nesta etapa de ensaio relações exp./teor. não muito precisas - imediatamente após ultrapassada a carga média de fissuração, para um determinado exemplar (viga) poderemos estar obtendo relação exp./a₁₁₁, sendo a₁₁₁ o

deslocamento teórico no estágio II, sem que o exemplar analisado tenha atingido a sua carga de fissuração.

Da análise da tab. 6.9 nota-se inicialmente que as médias exp./a_m, representadas na tabela pelas colunas (3) e obtidas com utilização da fórmula de Branson (eq. 6.41), resultaram, para todas as séries, valores pouco interessantes. Analisando-se mais detalhadamente as relações exp./teor. de cada uma das fases do ensaio de cada exemplar (Anexo 3) vê-se que a consideração de momento de inércia equivalente é interessante quase que somente no estágio de ensaio imediatamente posterior à carga de fissuração ($p_r \leq p \leq 1,80.p_r$), onde há a transição de um comportamento "puro" do estágio I para um comportamento "puro" do estágio II.

A tab. 6.9 e a fig. 6.14, quando analisadas conjuntamente, revelam que os módulos de deformação E₁ e E₂ - módulos tangentes à origem - forneceram valores teóricos de deslocamentos muito próximos dos experimentais, notadamente no estágio I - colunas (1) da tabela - onde, a princípio, mais se justifica o uso deles. Para esses casos, as médias das médias das relações exp./teor. foram iguais a 1,05 para os dois módulos, o que praticamente indica coincidência entre valores teóricos e experimentais. O mesmo pode ser dito dos módulos de deformação E₃ e E₅, relativamente ao comportamento no estágio II - colunas (2) - que resultaram em médias das médias de 1,00 e 1,01 respectivamente.

Esses resultados abonam perfeitamente a utilização da formulação proposta pelo Projeto de Norma de Argamassa Armada ⁽²⁾ para avaliação de deslocamentos imediatos em peças de argamassa armada, quer utilizando módulos de deformação obtidos experimentalmente - E₁ e E₂ - quer utilizando módulos de deformação calculados a partir da resistência à compressão da argamassa - E₄ e E₆.

6.1.5 Fissuração

Numa rápida análise da bibliografia internacional disponível sobre argamassa armada, nota-se, de pronto, a especial atenção com que a maioria dos pesquisadores trata o assunto da fissuração, procurando - muitas vezes numa busca sem sentido - pontuar em números precisos esse comportamento diferenciado do material.

De fato, pode-se dizer que de todas as propriedades mecânicas do material argamassa armada a abertura e o espaçamento de fissuras são as que mais revelam algumas distinções deste material relativamente ao concreto armado convencional, seu similar mais próximo. É sabido que a argamassa armada apresenta um padrão de fissuração caracterizado basicamente por fissuras mais finas e com menores espaçamentos. Swamy ⁽³¹⁾, faz uma boa análise da fissuração na argamassa armada comparando-a com a observada no concreto armado. Sugere a influência de vários fatores no espaçamento de fissuras: número de telas da armadura e tensão de escoamento do aço utilizado - tidos no trabalho

como fatores principais - a abertura de malha da tela utilizada, o cobrimento da armadura e a espessura da seção transversal do elemento. Comenta que, para os exemplares ensaiados à flexão, constatou aberturas máximas de fissuras 4 vezes inferiores às verificadas no concreto armado, considerando-se iguais deformações. Cita ainda, como diferença mais marcante entre concreto armado e argamassa armada, a tipologia da fissuração, que, com o acréscimo do carregamento, mostra-se na argamassa armada com grande concentração de fissuras de aberturas iguais, enquanto no concreto armado se caracteriza pela ocorrência de fissuras com aberturas múltiplas.

Muitas são as formulações propostas na bibliografia para avaliar abertura e espaçamento de fissuras na argamassa armada.

Logan e Shah ⁽²⁰⁾ propuseram a seguinte fórmula para avaliar a abertura máxima de fissuras na flexão:

$$w_{max} = 0,0035 \times \hat{\sigma}_m^{1.223} / (A_{m1t1})^{1/3} \quad (6.42)$$

onde :

$\hat{\sigma}_m$ = tensão máxima na armadura, no estágio de solicitação considerado, em libras por polegada ao quadrado;

A_{m1t1} = taxa superficial de armadura longitudinal, considerando-se apenas a região tracionada, em polegadas a menos um (in^{-1}).

Ainda, Naaman ⁽²³⁾ sugere:

$$w_m = 15.9/E_m (\hat{\sigma}_m - 95), \quad (6.42.a)$$

com as seguintes unidades:

$$\begin{aligned} [w] &= mm \\ [E_m] \text{ e } [\hat{\sigma}_m] &= MPa \end{aligned}$$

Balaguru ⁽¹¹⁾, como membro do grupo que estudou e propôs grande parte dessas formulações, sugeriu, em 1981, que se desprezasse a influência da argamassa entre fissuras, calculando-se a abertura média das fissuras (w_m) pela expressão:

$$w_m = a_{r-m} \cdot \epsilon_{st}, \quad \text{onde:} \quad (6.43)$$

a_{r-m} = espaçamento médio das fissuras, calculado por:

$$a_{r-m} = (\theta/\eta \times 1/A_{m1t1}) \cdot r/r_y > a_{tr} \quad (6.44)$$

onde:

θ e η = coeficientes com valores aproximados de 1,5 e 1,6 respectivamente;

A_{m1t1} = taxa superficial da armadura longitudinal, considerando-se apenas a região tracionada;
 r = raio de curvatura da viga, na seção e no estágio de solicitação considerados;
 r_y = raio de curvatura da viga, correspondente ao estágio de início de escoamento da armadura na fibra mais tracionada;
 a_{tr} = espaçamento dos fios transversais;

e:

ϵ_{ct} = deformação de tração correspondente à fibra mais tracionada da viga, calculado por:

$$\epsilon_{ct} = 1/r (h-x) \quad (6.45)$$

A comparação dos valores analíticos e experimentais obtidos pelas equações expostas, feita em estudos dos próprios autores destas e em estudos de outros pesquisadores do assunto, revela, invariavelmente, relações entre resultados calculados e observados com valores muito variáveis.

Como prova da indefinição do assunto fissuração, o documento oficioso do Comitê 549 do ACI (2) não apresenta nenhuma expressão para avaliação da abertura de fissuras, limitando-se a sugerir referências bibliográficas.

A norma soviética SN 366/77 (32) sugere uma expressão (6.46) - somente para obtenção de valores de referência - já analisada por Hanai (14) e baseada na deformação da armadura e no espaçamento entre fios transversais das telas. A expressão é corrigida por fatores de ajustamento que levam em conta os tipos de telas, o tipo das ações e o tipo de cura da argamassa empregada.

$$w = \eta_{t1} \cdot k_1 \cdot \sigma_m / E_{mt} \cdot a_{tr}, \text{ onde} \quad (6.46)$$

η_{t1} = coeficiente que leva em conta o tipo de tela (igual a 3,0 para telas soldadas e 3,5 para telas tecidas);

k_1 = coeficiente que considera o tipo das ações e o tipo de cura da argamassa (igual a 1,0 para o caso de ações de curta duração; igual a 1,5 para ações repetidas e de longa duração, quando se emprega argamassa de cura normal ou cura térmica à pressão atmosférica; igual a 1,65 nas mesmas condições de solicitação anteriores, mas quando se emprega argamassa curada em auto-clave);

σ_m = tensão na armadura (considerando-se somente telas de aço) na fibra mais tracionada;

E_{mt} = módulo de deformação aparente das telas (sugerido igual a 150.000 MPa);

a_{tr} = espaçamento dos fios transversais das telas de aço.

NOTA: a título de informação adicional, as telas soldadas empregadas pelos soviéticos têm diâmetro dos fios de 0,7 mm a 1,2 mm e abertura máxima de malhas de 12,7 mm.

Dessa rápida análise do problema, pode-se notar que a fissuração ainda é assunto mal resolvido, mesmo ao nível internacional, onde a maioria das fórmulas disponíveis são específicas para situações muito particulares de tipos e arranjos de armaduras, e outros parâmetros influentes na fissuração, fazendo com que seja problemática e pouco indicada suas generalizações.

Considerando-se, entretanto, o volume de trabalhos até agora realizados, algumas conclusões podem ser assumidas como certas para a argamassa armada, embora não permitam, ainda, completa elucidação do problema:

i) para mesmas tensões na armadura, as peças armadas com telas soldadas apresentam fissuras com menores aberturas que as observadas em peças armadas com outros tipos de telas tecidas; a tendência à linearização dos fios nas telas tecidas ⁽¹⁰⁾ e a grande deformabilidade dos fios dessas telas são apontadas como principais razões para o seu desempenho inferior.

ii) para peças armadas com telas soldadas, a posição do fio transversal é local potencial de abertura de fissuras ^(10,22,30) - o fenômeno é condicionado tanto pela diminuição da área efetiva de argamassa na seção transversal neste ponto como também pelo fato de ocorrer, quase que invariavelmente, um adicional de vibração na proximidade dos fios da tela, fazendo com que haja acúmulo de pasta nessa região; obviamente, a grande probabilidade de ocorrência de fissuras sobre os fios transversais induz espaçamentos de fissuras próximos do espaçamento dos fios transversais.

Embora sejam claras as distinções nos padrões de fissuração da argamassa armada e do concreto armado, na avaliação da abertura das fissuras parece interessante, por ora, encaminhar-se o problema seguindo basicamente o equacionamento dado ao concreto armado com telas soldadas, já que a tendência natural de se reduzir as taxas de armadura da argamassa armada acarreta alongamentos de fissuração próximos para os dois materiais.

Mollica ⁽²¹⁾, seguindo a Teoria Clássica de Fissuração, apresenta o estudo da fissuração no concreto armado, à luz da NBR 6118, particularizado para o caso de armaduras com telas soldadas.

Esse trabalho é a seguir analisado, particularizando-o agora para o caso de argamassas armadas com telas soldadas.

Assumindo-se fissuração sistemática na argamassa armada e tomando-se os coeficientes estatísticos sugeridos por

* Mollica, a abertura característica de fissuras (w_w) é dada por:

$$w_w = 1,658 \cdot w_m \quad (6.47)$$

Tem-se também que para a fissuração sistemática, a abertura média de fissuras (w_m) pode ser determinada por:

$$w_m = s \cdot (\epsilon_{mm} - \epsilon_{cm}), \text{ onde:} \quad (6.48)$$

s = espaçamento médio entre fissuras;
 ϵ_{mm} = deformação específica média do aço entre fissuras;
 ϵ_{cm} = deformação específica média da argamassa entre fissuras;

Tendo em conta que $\epsilon_{cm} \ll \epsilon_{mm}$ e $\epsilon_{mm} = \sigma_{mm} / E_m$, tem-se:

$$w_m = s \cdot \sigma_{mm} / E_m, \text{ sendo:} \quad (6.49)$$

σ_{mm} = tensão média no aço entre fissuras;
 E_m = módulo de deformação longitudinal do aço.

Na determinação do espaçamento médio entre fissuras, Mollica faz uso de alguns coeficientes experimentais - obtidos em ensaios de barras de aço de alta aderência e adotados no equacionamento da NBR 6118.

Calcula inicialmente um espaçamento de referência s_1 , dado por:

$$s_1 = 1,5 (c + \phi/2) + 0,16 \phi / \beta_r, \text{ onde:} \quad (6.50)$$

c = cobrimento;
 ϕ = diâmetro da barra da armadura - no caso da argamassa armada, diâmetro dos fios da tela;
 $\beta_r = A_m / A_{ar}$, seguindo definição da NBR 6118 - no caso da argamassa armada, considerando-se a distribuição da armadura ao longo de toda a seção transversal da peça, $\beta_r = A_m / A_c$.

Levando em conta a grande aderência das telas soldadas à argamassa ou concreto, propiciada pelas juntas soldadas, Mollica sugere que o espaçamento médio das fissuras (s) seja obtido de acordo com as seguintes desigualdades, onde "e" é o espaçamento entre juntas soldadas.

$s = s_1$, se $s_1 \geq e$ - nesse caso, a aderência fica garantida pela junta soldada, em substituição as moedas;

$s = e$, se $s_1 < e$ e $1,8 \cdot s_1 \geq e$ - a aderência se mobiliza ao longo de $1,8 s_1$;

$s = 1,8 \cdot s_1$, se $s_1 < e$ e $1,8 s_1 < e$

Na avaliação da tensão média no aço entre fissuras (σ_{sm}) da expressão 6.49) Mollica sugere:

$$\sigma_{sm} = \sigma_s - 0,5 f_{tk} / \beta_r \quad (6.51)$$

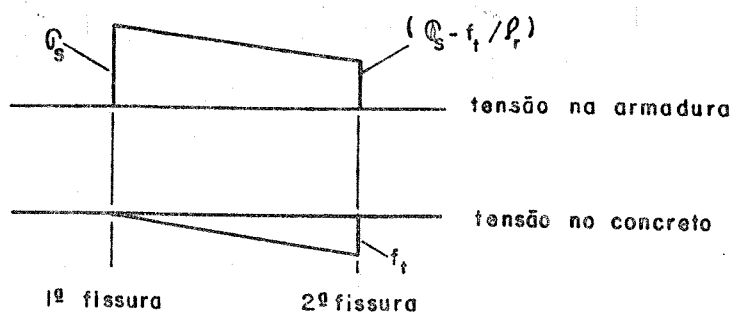


Fig. 6.15 - Avaliação da tensão média entre fissuras - análise simplificada de Mollica ⁽²¹⁾.

Na NBR 6118, a estimativa de σ_{sm} é feita por $\sigma_{sm} = 2/3 \cdot \sigma_s$.

Dessa forma, com uso das expressões (6.49), (6.50) e (6.51) e das inequações para determinação do espaçamento médio entre fissuras (s) consegue-se obter uma estimativa para o valor da abertura média de fissuras, em peças armadas com telas soldadas.

O critério proposto pelo Projeto de Norma de Argamassa Armada ⁽⁹⁾ para obtenção da abertura característica de fissuras, segue basicamente o equacionamento de Mollica, com utilização também da equação (6.47) para transformação final da abertura média em abertura característica. Não é atualmente fornecido nenhum coeficiente de ajustamento para as ações repetidas e de longa duração.

Por fim, é importante pontuar que tendências atuais procuram alterar a forma de encaminhamento do problema fissuração: ao invés de fazer do projetista um mero calculista, lidando com fórmulas imprecisas e trabalhosas na verificação da abertura e espaçamento de fissuras, procura-se simplificar os cálculos, resgatando a verdadeira arte de armar estruturas, e induzindo o controle da fissuração pelo conveniente arranjo de armaduras e pela limitação de deformações no aço. De fato, Naaman e Ramos ⁽²²⁾ já haviam atentado para o fato de, nos ensaios experimentais de peças de argamassa armada, a partir de uma determinada etapa de carregamento, não se abrirem novas fissuras, possibilitando então, nessa situação, a definição de correlações entre deformações na armadura e abertura média de fissuras.

Na análise dos resultados experimentais de fissuração obtidos nesta pesquisa, foram elaboradas tabelas comparativas entre valores experimentais médios e teóricos sugeridos por algumas das formulações expostas.

Foram eleitas como formulações teóricas as propostas pelo Projeto de Norma de Argamassa Armada ⁽⁹⁾ e pela Norma Soviética SN 366/77 ⁽¹⁰⁾, por se tratarem de recomendações normativas e pela suas praticidades de uso.

As tabelas comparativas da fissuração experimental e teórica constam do Anexo 3 e são aqui explicadas e analisadas.

Para cada série de vigas, seguindo o que até agora se fez para os demais parâmetros analisados (carga de fissuração, carga de ruptura etc.) foram calculados, mediante aplicação do Critério de Chauvenet, os valores médios experimentais do espaçamento de fissuras, número de fissuras na região de observação e abertura máxima de fissuras nas regiões A, B, C e D (vide fig. 5.3). Esses valores médios experimentais foram listados com as cargas de suas respectivas etapas, com a relação carga atuante/carga de fissuração (F/F_f), com a relação carga atuante/carga de ruptura (F/F_r) e com a tensão no nível de armadura mais tracionada do arranjo, calculada teoricamente, com base na formulação para o estágio II.

Convencionou-se como abertura teórica A_1 , aquela obtida seguindo-se basicamente a formulação proposta pelo Projeto de Norma de Argamassa Armada ⁽⁹⁾, onde a abertura de fissuras é conseguida pelo produto entre espaçamento médio de fissuras e deformação na armadura. A deformação da armadura (ϵ_m) foi obtida a partir de σ_m (eq. 6.51) - onde σ_m é a tensão na armadura, calculada no estágio II - com uso do diagrama $\sigma - \epsilon$ da armadura (fig. 5.6). No cálculo do espaçamento de referência s_1 , foi admitida, inicialmente, a taxa geométrica de armadura (ρ_r) calculada com a participação de toda a armadura da seção transversal. Para espaçamento entre juntas soldadas, no caso dos arranjos de armaduras com duas telas próximas da mesma face do elemento (arranjos FIIQ17.5, FIIR17.5, FIIIQ35 e FIIR35), foi admitido o valor do espaçamento de juntas resultante desses arranjos.

Convencionou-se como abertura teórica A_2 , aquela obtida pelo equacionamento da Norma Soviética (eq. 6.46), com $\eta_{t1} = 3$ e $k_1 = 1$, e sendo que no cálculo da deformação da armadura, a tensão na armadura era a avaliada pelo equacionamento do estágio II, sem redução conforme sugerido por Mollica e exposto em (6.51), e a relação σ_m/E_{mt} foi utilizada somente no trecho elástico linear do diagrama.

Nas tabelas comparativas, a ocorrência de "****" revela escoamento da armadura, portanto com estimativa de abertura de fissuras fora de propósito.

Da análise das tabelas nota-se, de pronto, a inapropriação da formulação soviética para o caso da argamassa armada, por conta dos fatores de ajustamento η_{t1} e k_1 , que foram assumidos iguais ao sugeridos para as telas russas, sem maiores particularizações. Apesar de estarmos comparando abertura de fissuras experimental máxima com abertura de fissuras teórica média, a formulação de A_1 mostra-se mais eficiente que a da norma soviética - o mesmo é válido na comparação da precisão desta formulação com a de outras já testadas em trabalhos da mesma natureza com o material -

revelando, entretanto, relações exp./teor. melhores para algumas séries (FIR15, FIIQ17.5, FIIIQ35, FIIIR35, por exemplo) do que para outras (FIIR25 e FIIR30, por exemplo). De qualquer forma, sua imprecisão é ainda clara, já que essas mesmas relações exp./teor. variam, aleatoriamente entre valores inferiores e superiores à unidade ($0,52 < \text{exp./teor.} < 2,17$).

A mesma fórmula básica do Projeto de Norma de Argamassa Armada foi calculada, utilizando-se como espaçamento médio entre fissuras o valor obtido em ensaio para esse parâmetro; também utilizou-se, numa segunda busca de resultados teóricos mais precisos, a taxa geométrica da armadura efetivamente tracionada nessas etapas de carregamento. As relações exp./teor. não apresentaram melhoras significativas. A análise da influência da tensão na armadura (σ_s) ou da tensão média na armadura (σ_{sm}) no início da fissuração, também não levou a resultados mais conclusivos.

Nota-se, portanto, que essa formulação, para a análise da fissuração na flexão, sugere razoáveis valores de referência. Talvez, complementarmente à formulação, seja interessante a associação de padrões de fissuração aos tipos de peças e arranjos de armadura adotados.

Nota-se, também, que estudos adicionais a este se fazem necessários para a avaliação da validade de aplicação do modelo matemático exposto a perfis de viga com outras seções, não contempladas neste estudo.

6.2 Ensaio de Tração

6.2.1 Comportamento geral dos ensaios

Conforme já salientado no Cap. 4 - Metodologia Experimental, desde a programação dos ensaios já se antevia uma maior complexidade na realização e interpretação dos resultados dos ensaios de tração.

De fato, esses ensaios foram trabalhosos e apresentaram resultados bastante dispersos.

Alguns problemas contribuíram para isso:

- prè-fissuração

A prè-fissuração ocorreu em 18% das peças ensaiadas. Esse problema já havia sido considerado na fase de programação dos ensaios e se previa uma incidência maior e mais comprometidora nas peças sem armaduras. Entretanto, durante a realização dos ensaios, o problema veio a ocorrer também em alguns exemplares armados, notadamente os de menores espessuras. A causa desse problema foi o difícil manuseio do conjunto peça-garras para seu posicionamento no pòrtico de ensaio.

- empenamento das peças durante o ensaio

Foi o principal problema dos ensaios de tração.

Considerando-se o empenamento - para fins exclusivos deste estudo - como a ocorrência de deformações de encurtamento em uma das faces do modelo, em estágio superior ao de escorvamento inicial da estrutura - no caso em questão, o escorvamento se estendeu até a fase 2 do carregamento - verificou-se que 70% de um total de 71 peças apresentaram o fenômeno.

As razões para a ocorrência do problema, já expostas no capítulo 4, foram a presença de arranjos de armaduras assimétricos e os desalinhamentos gerais na aplicação de cargas.

Entretanto, 54% das peças com arranjo de armaduras simétricos empenaram.

Esse fato fez com que a responsabilidade maior no empenamento recaísse sobre os desalinhamentos de cargas, que poderiam ser provocados por uma deficiência "congénita" no pòrtico de ensaio ou pelo impreciso posicionamento das garras nas extremidades das peças a ensaiar. Embora 82% das peças que empenaram o tenham feito para o mesmo lado - no caso, o lado das peças referenciado como 1 se alongava mais - a probabilidade de ocorrência de um defeito "congénito" no pòrtico foi aparentemente eliminada já durante a fase de realização dos ensaios, quando as inversões feitas no posicionamento de algumas peças no pòrtico, não implicaram, necessariamente, na consequente inversão da face com maior alongamento.

Para possibilitar um melhor juízo das análises qualitativas feitas acima, foi desenvolvido o equacionamento teórico do ensaio de tração, na fase elástica linear, para o caso geral de peças armadas com dois níveis de armaduras distintas, dispostas simetricamente em relação ao plano médio que contém a peça.

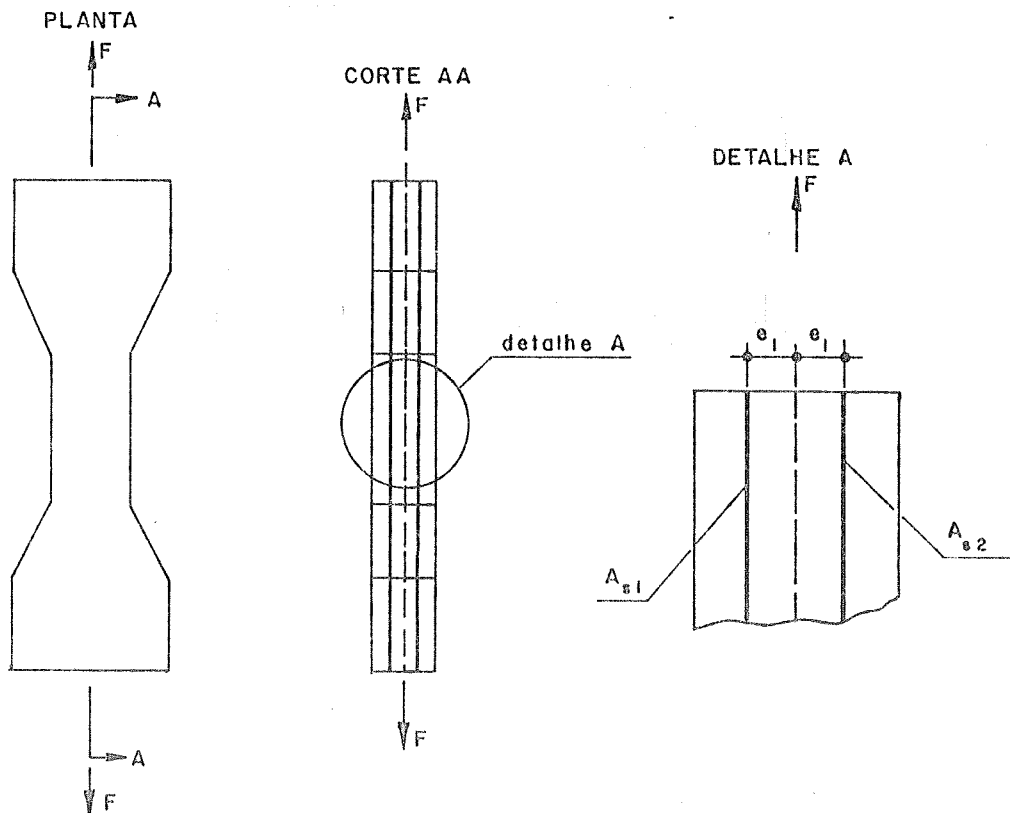


Fig. 6.16 - Situação de carregamento de chapa com armaduras distintas, dispostas simetricamente.

a) hipóteses

- seções planas permanecem planas;
- a resultante das forças resistentes (R) deve ser colinear à força F , para que haja o equilíbrio da peça;
- para simplificação nos cálculos, é admitido que a peça fissura no limite entre os estádios I-a e I-b, e não no estágio I-b;

• dados conhecidos:

- F - carga que provoca a 1ª. fissura na peça;
- e_1 - excentricidade da armadura;

- h - espessura da seção transversal;
- b - largura da seção transversal;
- E_c - módulo de deformação longitudinal da argamassa;
- E_m - módulo de deformação longitudinal das telas;
- A_{m1}, A_{m2} - áreas das seções transversais das armaduras, sendo sempre $A_{m2} \geq A_{m1}$.

b) distribuição das deformações e tensões na seção transversal

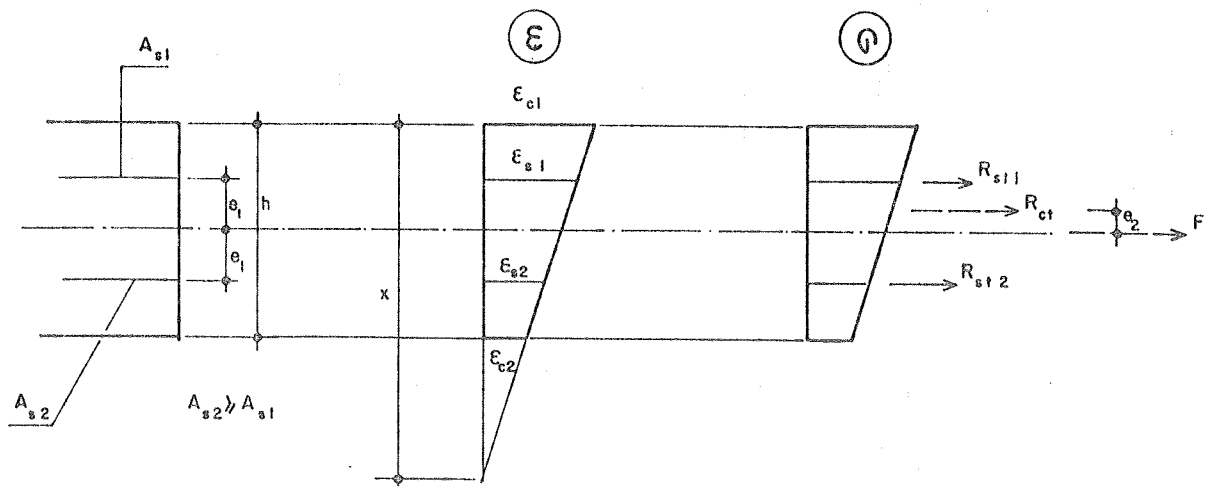


Fig. 6.17 - Distribuição das deformações e tensões na seção transversal e resultantes de forças - CARGA EXTERNA CENTRADA.

- Onde:
- $\epsilon_{c1}, \epsilon_{c2}$ = deformações da argamassa nas faces da peça;
 - $\epsilon_{s1}, \epsilon_{s2}$ = deformações dos fios das telas;
 - R_{st1}, R_{st2} = forças resistentes dos fios das telas;
 - R_{ct} = força resistente resultante da argamassa;
 - e_2 = excentricidade da força resistente resultante da argamassa.

c) equações de equilíbrio e compatibilidade

$$R_{ct} + R_{st1} + R_{st2} = R = F \quad (6.52)$$

$$R_{ct}.e_2 + R_{ct1}.e_1 - R_{ct2}.e_1 = 0 \quad (6.53)$$

$$\varepsilon_{c1}/x = \varepsilon_{c2}/(x-h) = \varepsilon_{m1}/\left[x - \left(h/2 - e_1\right)\right] = \varepsilon_{m2}/\left[x - \left(h/2 + e_1\right)\right] \quad (6.54)$$

Combinando-se convenientemente as equações (6.52), (6.53) e (6.54) chega-se a:

$$\left[E_c.b.h + E_m(A_{m1}+A_{m2})\right]\varepsilon_{c1} - \left[E_c.b.h^2 + E_m(A_{m1}+A_{m2})h + 2.E_m.e_1(A_{m2}-A_{m1})\right]\varepsilon_{c1}/2x = F \quad (6.55)$$

$$\left[E_m.e_1(A_{m2}-A_{m1})\right]\varepsilon_{c1} - \left[E_m.e_1.h(A_{m2}-A_{m1}) + 2.E_m.e_1^2(A_{m1} + A_{m2}) + E_c.b.h^3/6\right]\varepsilon_{c1}/2x = 0 \quad (6.56)$$

Da resolução desse sistema de duas equações obtêm-se os valores de ε_{c1} e x , que seriam respectivamente a deformação na face mais tracionada da chapa e a posição da linha neutra, para o caso de peças armadas com duas armaduras distintas.

Complementarmente, com uso da eq. 6.54 se obtêm os valores das deformações na outra face da chapa e nas armaduras.

As séries que não apresentam duas armaduras distintas, configuram-se como particularizações desse equacionamento geral, sendo:

- séries com armadura única (TI015 - TIR15)
assumir $A_{m1} = 0$
- séries com armaduras simétricas e iguais (TII025 - TIIR25 - TII030 - TIIR30 - TIII035 - TIIIR35)
assumir $A_{m1} = A_{m2}$
- séries sem armaduras (T15 - T15C - T15CC - T17.5 - T17.5C - T25 - T25C - T30 - T35)
assumir $A_{m1} = A_{m2} = 0$

No caso de se considerar a ocorrência de uma pequena excentricidade na carga aplicada (fig. 6.18) o equacionamento segue a mesma marcha, sendo que as equações (6.53) e (6.56) ficam, respectivamente:

$$R_{ct}.e_2 + R_{ct1}.e_1 - R_{ct2}.e_1 = F.e \quad (6.57)$$

$$\left[E_m.e_1(A_{m2}-A_{m1})\right]\varepsilon_{c1} - \left[E_m.e_1.h(A_{m2}-A_{m1}) + 2.E_m.e_1^2(A_{m1} + A_{m2}) + E_c.b.h^3/6\right]\varepsilon_{c1}/2x = -F.e \quad (6.58)$$

onde:

e = excentricidade da carga aplicada

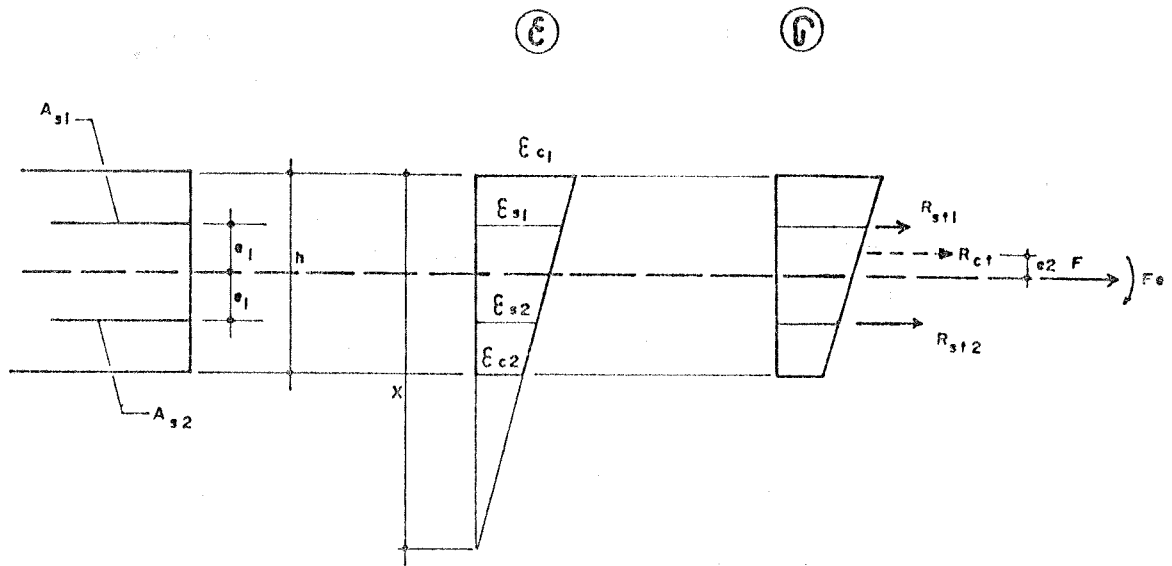


Fig. 6.10 - Distribuição das deformações e tensões na seção transversal e resultantes de forças - CARGA EXCÊNTRICA.

Com uso das equações (6.54), (6.55) e (6.56) ou (6.54), (6.55) e (6.58) pode-se obter a tab. 6.10, que apresenta as deformações teóricas nas faces das chapas, no estágio de carregamento em que se verificou o aparecimento da primeira fissura. Pelo fato da carga de fissuração se apresentar bastante variável dentro de uma mesma série, na tab. 6.10 são contempladas, em cada série, as situações de carga de fissuração mínima e máxima.

A tabela mostra claramente a desprezível influência dos arranjos assimétricos de armadura no empenamento da peça, especialmente quando se considera a possibilidade de ocorrência de uma excentricidade na carga aplicada. Os fatores "R", que expressam percentualmente a variação de deformações entre as duas faces da chapa, são consideravelmente maiores para o caso de cargas excêntricas. Nota-se também que, para pequenos valores de excentricidade de carga, passíveis de ocorrer em quaisquer ensaios dessa natureza, resultam diferenciais de deformação da ordem de 100%.

DEFORMAÇÕES (X 10⁴) TEÓRICAS DAS FACES DAS CHAPAS DE ALGUMAS SÉRIES

SÉRIE	CARGA EXEMP. NA SÉRIE	CENTRADA				EXCÊNTRICA (e = 1mm)			EXCÊNTRICA (e = 2mm)		
		ϵ_{c1}	ϵ_{c2}	$\epsilon_{c1} = \epsilon_{c2}$	R	ϵ_{c1}	ϵ_{c2}	R	ϵ_{c1}	ϵ_{c2}	R
T1015	3	35	33		5	49	19	156	64	5	1250
	2	82	77		5	115	45	156	150	11	1250
T1R15	1	32	30		8	49	20	141	64	8	750
	4	92	85		8	141	58	141	186	22	750
T15	2			13		19	8	134	24	3	791
	3			48		68	29	134	87	10	791
T15-C	2			62		87	37	134	111	13	791
	1			119		166	71	134	214	24	791
T15-CC	3			73		102	43	134	131	14	791
	2			109		153	65	134	196	22	791
T11017,5	2	44	45		0,5	61	29	117	77	13	547
	1	97	96		0,5	132	61	117	168	26	547
T11R17,5	2	36	36		0,3	50	22	125	63	9	625
	3	74	74		0,3	102	45	125	130	18	625
T17,5	4			30		40	19	104	50	9	438
	3			117		158	77	104	198	37	438
T17,5-C	3			67		90	44	104	113	21	438
	1			130		174	65	104	219	41	438
T11025	4			34		43	26	68	52	17	205
	3			92		116	69	68	139	46	205
T11R25	4			34		43	25	72	52	16	223
	2			59		74	43	72	90	28	223
T30	3			28		33	22	50	39	17	133
	2			55		66	44	50	77	33	133
T35	1			27		32	18	83	38	12	213
	3			60		72	39	83	84	27	213

Nota: 1) $R = ((\text{maior} - \text{menor}) / \text{menor}) \times 100$

2) No caso de armaduras assimétricas, a excentricidade da carga externa foi considerada no lado oposto ao da armadura predominante.

Tab. 6.10 - Deformações (x 10⁴) teóricas nas faces das chapas de algumas séries, considerando-se carga centrada e carga excêntrica (e = 1 mm ou e = 2 mm).

Concluindo, percebe-se claramente pelo equacionamento teórico, que o empenamento das peças de argamassa armada durante os ensaios de tração é ocorrência quase que normal, considerando-se as limitações práticas e de precisão dos equipamentos utilizados.

O fenômeno do empenamento das peças durante os ensaios acabou configurando um quadro de resultados bastante dispersos.

Análises qualitativas, que permitiriam delinear o comportamento geral do material quando submetido a solicitações de tração, ficaram mais complexas; por exemplo, o comportamento estratificado do material ao longo do ensaio, embora ocorresse, foi de difícil análise e de impraticável generalização.

6.2.2 Carga de fissuração

A carga de fissuração foi assumida como sendo aquela que provocou o aparecimento da primeira fissura visível nas chapas, independentemente da face onde ela ocorria. Conforme já salientado no cap. 4, a utilização de célula elétrica de carga com indicador digital facilitou a obtenção precisa dessa carga.

Devido ao frequente empenamento das peças durante o ensaio, as cargas de fissuração apresentaram dispersão muito grande, conforme mostra a tab. 6.11.

Para a análise desses resultados existem algumas formulações teóricas.

De maneira análoga ao expresso nos ensaios de flexão, pesquisadores internacionais têm sugerido, em grande parte dos estudos, uma correlação direta entre a carga de fissuração e a taxa volumétrica de armadura ou a taxa superficial de armadura.

Naaman e Ramos (22) não conseguiram comprovar a linearidade entre carga de fissuração e taxa volumétrica de armadura, sugerida pela teoria clássica de fissuração para materiais compostos, que coloca:

$$\hat{\sigma}_{fc} = V_1 (\hat{\sigma}_{r1} - \hat{\sigma}_{um}) + \hat{\sigma}_{um}, \text{ onde:} \quad (6.59)$$

$\hat{\sigma}_{fc}$ = tensão de tração no material composto no momento da aparição da primeira fissura;

V_1 = volume de armadura na direção da carga (%);

$\hat{\sigma}_{r1}$ = tensão de tração na armadura, na direção da carga;

$\hat{\sigma}_{um}$ = tensão de tração máxima na matriz.

Entretanto, no mesmo estudo, utilizando-se de constatações anteriores de Bezukladov, Naaman propõe a linearidade entre carga de fissuração e taxa superficial de armadura, com:

$$\hat{\sigma}_{fc} = 10 \cdot S_1 + \hat{\sigma}_{um}, \text{ em kgf/cm}^2, \text{ sendo} \quad (6.60)$$

S_1 = taxa superficial de armadura, na direção da carga, em cm^2/cm^3 .

C A R G A D E F I S S U R A C A O					
SERIE	MEDIA (kN)	DESVIO PADRAO	COEF. VAR.	INTERVALO MEDIA	CONFIANCA (95%)
TIQ15	3,254	1,235	0,38	0,987 --	5,521
TIR15	3,918	1,617	0,41	0,949 --	6,687
T15	4,321	2,004	0,46	2,684 --	5,958
TIHQ17.5	4,871	1,818	0,37	1,533 --	8,209
TIHR17.5	4,316	1,540	0,36	1,489 --	7,143
T17.5	5,693	2,571	0,45	2,739 --	8,647
TIHQ25	6,743	3,314	0,49	0,658 --	12,828
TIHR25	4,690	1,018	0,22	2,821 --	6,559
T25	6,059	1,740	0,29	4,507 --	7,611
TIHQ30	5,478	1,176	0,21	3,319 --	7,637
TIHR30	7,279	1,188	0,16	5,098 --	9,460
T30	4,391	1,675	0,38	1,316 --	7,466
TIHQ35	9,667	4,074	0,42	2,187 --	17,147
TIHR35	13,281	4,694	0,35	4,663 --	21,899
T35	5,691	2,167	0,38	1,712 --	9,670

Nota: Os valores apresentados para as sêries não armadas, são resultantes da média da série básica mais as complementares

Tab. 6.11 - Valores experimentais da carga de fissuração.

Novamente aqui, para os ensaios de tração, nota-se a inapropriação da transposição dessas fórmulas gerais para o material brasileiro, que apresenta características próprios de desempenho.

A formulação da NBR 6118 ^(*) para a questão, estendida também ao Projeto de Norma de Argamassa Armada ^(*) é a seguinte:

- a) a deformação de ruptura à tração da argamassa é igual à $2,7 f_{tk}/E_c$;
- b) a tensão de tração é igual a f_{tk} ;
- c) seções transversais planas permanecem planas.

O efeito da retração pode ser considerado de maneira simplificada, nas condições correntes de utilização, supondo-se a tensão de tração igual a $0,75 f_{tk}$ e desprezando-se a armadura.

Todos esses equacionamentos são válidos para o caso de tração pura.

Entretanto, a ocorrência de excentricidades de carga durante os ensaios, acabou condicionando a fissuração precoce das chapas.

Nestas condições, tornou-se sem sentido uma avaliação crítica de cargas e deformações de fissuração.

Então verificou-se simplesmente a coerência entre as deformações acusadas em ensaio e as obtidas teoricamente, para determinado carregamento próximo da carga de aparecimento da primeira fissura.

As deformações obtidas através das leituras dos defletômetros foram desprezadas, pois, pelo fato de estarem eles afastados cerca de 1,5 cm de cada face das chapas, acabaram acusando deslocamentos diferentes dos de suas respectivas faces, conforme ilustra a fig. 6.19.

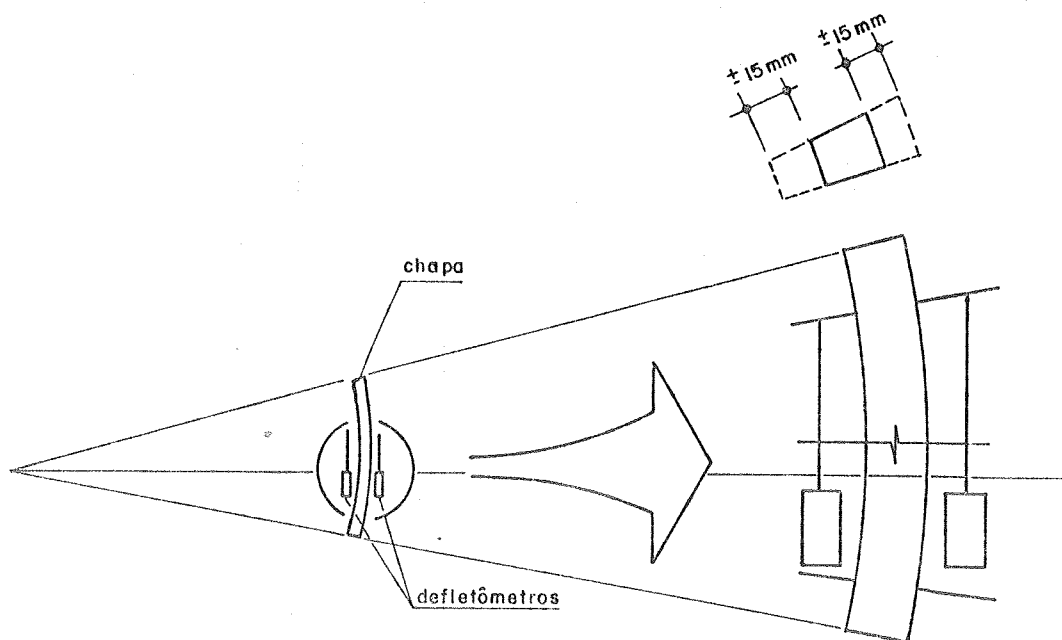


Fig. 6.19 - Consequência do empenamento dos exemplares de tração - chapas - nas leituras de deslocamentos nas faces.

As deformações experimentais foram avaliadas por intermédio dos extensômetros elétricos colados as faces de 1 exemplar de cada série estudada.

As deformações teóricas foram calculadas com uso das equações (6.54), (6.55) e (6.56) ou (6.54), (6.57) e (6.58) anteriores.

Os resultados comparativos de deformações estão expostos na tab. 6.12.

Embora o equacionamento teórico, para carga com excentricidade, evidencie uma tendência ao empenamento, as deformações experimentais foram por demais aleatórias.

DEFORMAÇÕES (x 10 ⁴) EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS										
SERIE	TENSÃO EXEMP.		EXPERI- MENTAIS	D E F O R M A Ç O E S TEÓRICAS						
	NA	SERIE		CARGA CENTRADA			CARGA EXCÊNTRICA			
	(MPa)					(e = 1 mm)		(e = 2 mm)		
TIQ15	21.33	4	168	-14	56	59	80	35	104	10
TIR15	20.45	3	382	-31	49	53	70	32	91	10
T15	21.04	3	129	-39	48	48	68	29	87	10
T15-C	37.22	1	151	67	119	119	166	71	214	24
T15-EC	33.58	1	95	79	89	89	125	54	161	18
TI1Q17.5	16.77	2	75	-18	44	45	61	29	77	13
TI1R17.5	15.52	4	2498	-512	36	37	50	23	64	10
T17.5	21.29	2	48	24	57	57	77	38	97	18
T17.5-C	23.06	3	-43	170	67	67	44	90	21	113
TI1Q25	34.92	1	143	-65	92	92	115	70	137	47
TI1R25	16.31	3	93	-93	44	44	55	33	66	22
T25	12.62	1	113	-52	33	33	40	24	48	17
T25-C	25.24	1	71	44	80	80	99	61	118	41
TI1Q30	21.94	4	85	-15	63	63	76	51	88	38
TI1R30	25.43	4	1294	-143	67	67	80	53	93	39
T30	8.91	3	163	-105	28	28	33	22	39	17
TI1Q35	20.63	2	554	-80	54	54	63	44	72	35
TI1R35	40.50	1	73	59	95	95	112	78	128	62
T35	9.45	1	76	-41	27	27	32	18	38	12

Tab. 6.12 - Deformações experimentais e teóricas das faces das chapas, em estágio de carregamento próximo do carregamento de fissuração. Suposição teórica de carga centrada e excêntrica, com excentricidades de 1 mm e 2 mm.

6.2.3 Carga de ruptura

A carga de ruptura foi assumida como aquela que provocou a ruptura do aço das telas.

Os valores experimentais obtidos são mostrados na tabela 6.13.

C A R G A D E R U P T U R A					
SERIE	MEDIA (kN)	DESVIO PADRAO	COEF. VAR.	INTERVALO MEDIA	CONFIANCA (95%)
TI015	12,538	0,413	0,03	11,780	-- 13,296
TIIR15	19,298	1,698	0,09	16,180	-- 22,416
T15	4,321	2,004	0,46	2,684	-- 5,958
TI1017.5	20,204	0,345	0,02	19,571	-- 20,837
TIIR17.5	35,306	1,232	0,03	33,044	-- 37,568
T17.5	5,693	2,571	0,45	2,739	-- 8,647
TI1025	24,694	0,841	0,03	23,150	-- 26,238
TIIR25	43,504	3,504	0,08	37,071	-- 49,937
T25	6,059	1,740	0,29	4,507	-- 7,611
TI1030	26,459	1,270	0,05	24,127	-- 28,791
TIIR30	45,903	5,268	0,11	36,231	-- 55,575
T30	4,391	1,675	0,38	1,316	-- 7,466
TI1035	46,115	2,351	0,05	41,799	-- 50,431
TIIR35	----	****	****	*****	-- *****
T35	5,691	2,167	0,38	1,712	-- 9,670

Notas: 1) Os valores apresentados para as séries não armadas, são idênticos aos valores de suas respectivas cargas de fissuração.

2) A carga de ruptura da série TIIR35 não foi atingida no ensaio.

Tab. 6.13 - Valores experimentais da carga de ruptura.

Seguindo consenso dos estudiosos das propriedades mecânicas do material ao nível internacional, o cálculo teórico da carga de ruptura é feito considerando-se a armadura como único elemento resistente. Neste equacionamento o empenamento da peça foi desprezado, embora ele se manifestasse até o final do ensaio, conforme mostram os diagramas de deslocamentos do Anexo 2.

A tabela 6.14 resume os valores comparativos encontrados.

CARGA DE RUPTURA - Comparação exp.-teor.

SERIE	P_u (kN) exper.	P_u (kN) teor.	$\frac{\text{exp.}}{\text{teor.}}$
TIQ15	12,538	12,373	1,01
TIR15	19,298	20,614	0,94
TI1Q17.5	20,204	20,614	0,98
TI1R17.5	35,306	37,111	0,95
TI1Q25	24,694	24,746	1,00
TI1R25	43,504	41,227	1,06
TI1Q30	26,459	24,746	1,07
TI1R30	45,903	41,227	1,11
TI1IQ35	46,115	41,227	1,12
TI1IR35	-----	-----	-----

- Notas: 1) A carga de ruptura da série TI1IR35 não foi atingida no ensaio.
2) Não foi feita a consideração das séries não armadas.

Tab. 6.14 - Comparação de valores teóricos e experimentais do momento de ruptura.

As deformações práticas da armadura, para cargas superiores à 90% da carga de ruptura, foram sempre acima de 4,5 %, indicando que nestes estágios de carregamento a armadura já estava em processo de escoamento. É importante aqui salientar que os pontos de ruptura das armaduras nem sempre foram coincidentes com os nós soldados.

6.2.4 Deslocamentos

As verificações práticas de deslocamentos axiais das chapas ensaiadas à tração, ficaram comprometidas depois de constatado o empenamento generalizado das peças. Não se justifica, portanto, uma análise mais aprofundada desses valores.

6.2.5 Fissuração

A fissuração de peças de argamassa armada, quando submetidas à tração, é fenômeno não muito contemplado na bibliografia internacional. A maior dificuldade na execução desse tipo de ensaio faz com que o fenômeno da fissuração seja estudado com maior afinco e profundidade nas solicitações de flexão.

Acredita-se, contudo, que, neste caso - tração - ocorra a influência na fissuração dos mesmos parâmetros já mencionados para a flexão (número de telas, tensão de escoamento do aço da armadura utilizada, abertura das malhas das telas, cobertura da armadura etc.).

A tipologia da fissuração continua sendo basicamente aquela característica da argamassa armada na flexão, ou seja, fissuras finas e pouco espaçadas.

Naaman ⁽²³⁾ sugere, em trabalho de 1979, expressão para avaliação da abertura máxima de fissuras, em peças ensaiadas à tração simples:

$$w_{max} = 3500/E_m, \text{ se } \sigma_m \leq 345 A_{m11} \quad (6.52)$$

ou

$$w_{max} = 20/E_m \left[175 + 3,69 \left(\sigma_m - 345 A_{m11} \right) \right], \text{ se } \sigma_m > 345 A_{m11} \quad \dots (6.53)$$

onde:

w_{max} = abertura máxima de fissuras, em mm;

E_m = módulo de deformação longitudinal da armadura, em MPa;

σ_m = tensão na fibra mais tracionada da armadura, em MPa;

A_{m11} = taxa superficial de armadura, na direção longitudinal, em cm^{-1} .

Em trabalho anterior ⁽¹⁹⁾, de 1977, Naaman, Balaguru e Shah já haviam sugerido a grande influência da taxa superficial de armadura na fissuração por tração.

Outras formulações, bastante específicas a situações particulares de ensaio são sugeridas. Não merecem aqui, entretanto, maiores considerações.

Os trabalhos que comparam desempenho de diferentes tipos de telas são unânimes em afirmar a superioridade das telas soldadas na limitação das aberturas de fissuras ⁽²⁰⁾. A posição dos fios transversais continua sendo local potencial de abertura de fissuras.

Neste trabalho, na comparação entre valores experimentais e teóricos, é interessante retomar as formulações propostas pela norma soviética SN 366/77 e pelo Projeto de Norma de Argamassa Armada ⁽²¹⁾, ambas de caráter mais genérico que as propostas convencionalmente em trabalhos técnicos de avaliação de desempenho.

Nas tabelas comparativas, os valores experimentais médios do espaçamento de fissuras, número de fissuras e abertura de fissuras foram obtidos mediante aplicação do Critério de Chauvenet. Para espaçamento de fissuras e número de fissuras, a "barra" separa os valores médios observados nas faces 1 (regiões de observação A e B) e 2 (regiões de observação C e D), conforme fig. 5.4. A abertura de

fissuras foi obtida como média dos valores máximos observados nas regiões A, B, C e D.

A abertura teórica de fissuras A_1 é relativa a formulação do Projeto de Norma de Argamassa Armada (eqs. 6.49, 6.50 e 6.51). A abertura teórica A_2 foi obtida pelo equacionamento da Norma Soviética (eq. 6.46), com $\eta_{t1} = 3$ e $k_1 = 1$. Todas as considerações de cálculo feitas nos ensaios de flexão foram mantidas para os ensaios de tração. A questão do empenamento das peças durante o ensaio tornou-se aqui de consideração impraticável.

As tabelas contemplam somente as etapas de carregamento em que todos os exemplares da série apresentaram fissuração sistemática.

Os resultados revelam, novamente aqui, a inadequação da formulação soviética, com os fatores de ajustamento sugeridos - $\eta_{t1} = 3$, no caso de telas soldadas, e $k_1 = 1$ para ações de curta duração). Com a inapropriação deste equacionamento teórico para as duas solicitações consideradas - flexão e tração - parece agora mais clara a necessidade de buscar coeficientes de ajustamento outros, que melhor expressem os efeitos de nossa tipologia de armaduras no fenômeno da fissuração.

Da formulação do Projeto de Norma de Argamassa Armada 'a)' resultam valores teóricos mais interessantes. Em geral, esses valores são um pouco inferiores aos observados experimentalmente ($1,09 \leq \text{exp./teor.} \leq 1,89$), com média das médias das relações exp./teor. de 1,38. A própria transformação do valor da abertura teórica média em abertura teórica característica - sugerida pela eq. 6.47 - através do coeficiente de majoração de 1,658, supre, neste caso, a "imprecisão" inicial da formulação.

É importante aqui salientar que, de todos os trabalhos até agora desenvolvidos por este autor com o material argamassa armada, estes foram os melhores resultados obtidos na análise específica da sua fissuração.

6.3 Ensaios Complementares

Dos ensaios complementares, realizados com o objetivo único de dar suporte a pesquisa principal - ensaios de flexão e tração - dois foram de notável importância: os ensaios de caracterização dos componentes básicos da argamassa armada - aço e argamassa.

Os ensaios de caracterização das telas de aço são de interpretação imediata, já que deles se depreende a classe do aço e suas características mecânicas principais, quais sejam o limite de resistência à tração (L.R.), o limite convencional de escoamento (L.E. $\sigma_{0,2}$) - no caso de aço classe B - e o módulo de deformação longitudinal (E).

Os ensaios de caracterização das argamassas empregadas em cada uma das séries foram realizados de maneira sistemática, permitindo-se a composição da tabela 6.15, que resume os principais resultados dos ensaios.

Os valores de f_{ct} , $f_{ct,7}$, $f_{ct,j}$ e $f_{ct,1}$ expostos em cada linha da tabela foram obtidos como média aritmética de 4 valores de ensaio aceitos pelo Critério de Chauvenet. Os valores de $f_{ct,j}$ e $f_{ct,1}$ foram obtidos da média de 6 valores de ensaio e o valor do módulo de deformação longitudinal foi resultante, na maioria das vezes, da média de 2 valores.

Desconsiderando-se o fato de que os "j" dias - definidos pelo ensaio das peças das séries principais de flexão e tração - não tenham sido os mesmos para cada uma das séries, e tomando-se os valores da tab. 6.15 como uma nova amostragem de 34 exemplares, chega-se ao exposto na tab. 6.16.

Ainda, focalizando-se a nova amostragem de 34 exemplares e tomando algumas relações entre esses parâmetros de resistência e deformação, tem-se a tab. 6.17.

Adam Neville ⁽²⁴⁾ sugere, para concretos com resistência à compressão da ordem de 40 MPa, o valor $f_{ct,j}/f_{ct,j} = 0,08$, bem próximo da relação (01) da tabela 6.17 obtida para a argamassa.

Para as relações (02) e (03), considerando-se o caso de concretos de cimentos portland comuns, Lauro M. dos Santos ^(27,28), seguindo recomendações do CEB-72, sugere valores de 0,40 e 0,65, respectivamente. A argamassa aqui em estudo teve, na média, um "crescimento" de resistência um pouco mais acelerado que o sugerido para os concretos. Entretanto, não são comuns ensaios de avaliação do ganho de resistência de argamassas, e seria precipitada qualquer conclusão a respeito do ocorrido, baseando-se unicamente nos valores destes ensaios. É oportuna a realização de ensaios de argamassas com distintos proporcionamentos de materiais e distintas granulometrias do agregado miúdo para se buscar uma generalização do fenômeno.

PROPRIEDADES MECANICAS DA ARGAMASSA ARMADA COM TELAS SOLDADAS
VALORES CARACTERISTICOS DAS ARGAMASSAS

VALORES CARACTERISTICOS (M P a)							
ARGAMASSAGEM	fc3	fc7	fc1	ftj	fck	ftk	E
1	29.2	33.8	47.7	4.7	42.0	4.1	37600
2	29.2	36.4	49.2	4.0	37.9	3.1	38000
3	36.9	39.7	49.6	3.3	45.7	1.9	39300
4	31.9	35.3	60.3	4.8	53.0	4.0	36700
5	33.5	39.1	50.9	4.5	43.1	4.0	41800
6	33.5	35.9	48.1	4.4	38.5	3.8	37100
7	33.8	33.4	46.5	4.1	44.8	3.7	38300
8	34.6	38.7	47.4	3.6	44.3	3.0	38500
9	37.0	37.6	49.1	3.6	45.2	2.5	37600
10	31.2	38.4	44.8	3.7	39.1	2.6	39400
11	26.9	30.9	41.8	2.8	38.7	2.4	35800
12	27.9	29.4	40.6	3.6	36.6	2.7	37000
13	23.8	32.1	38.6	2.6	33.5	2.4	36600
14	26.4	31.6	50.0	3.1	43.8	1.9	36200
15	27.1	30.5	46.6	3.2	46.0	2.2	36700
16	22.5	29.6	44.5	3.6	38.5	2.8	35300
17	30.2	36.0	55.3	3.8	51.5	3.3	43400
18	29.4	35.0	50.4	3.5	42.1	3.1	37000
19	30.0	36.6	50.5	3.3	44.3	2.2	35500
20	34.0	37.0	50.8	4.1	46.9	3.2	37200
21	31.7	35.0	43.0	3.6	36.1	2.5	38700
22	29.6	34.9	50.0	4.3	44.1	3.5	35700
23	29.8	35.6	48.1	3.9	44.6	3.3	38700
24	27.8	31.5	47.0	3.2	43.8	2.5	33200
25	29.0	35.6	44.5	3.4	41.0	2.7	32900
26	25.5	30.5	40.3	3.4	37.5	3.1	32300
27	25.6	33.7	45.8	3.7	42.3	3.3	34800
28	29.4	37.6	44.9	3.1	38.7	2.7	37100
29	23.8	32.5	41.9	2.9	32.4	1.7	35000
30	28.1	35.8	50.0	3.5	43.4	2.7	40200
31	20.9	28.7	38.6	3.3	34.3	2.3	31300
32	22.1	28.8	41.1	4.0	31.8	3.8	34200
33	22.8	28.6	38.9	3.3	31.3	2.9	31700
34	30.2	38.8	46.9	3.9	44.2	3.5	37500
x	29.0	34.3	46.6	3.6	41.2	2.9	36700
s	4.1	3.3	4.7	0.5	5.2	0.6	2700

Tab. 6.15 - Resumo dos valores caracteristicos das argamassagens. As correlações entre número da argamassagem e série respectiva estão contidas nas tabelas do capítulo 5.

ARGAMASSAS - VALORES CARACTERISTICOS MEDIOS FINAIS					
	MEDIA (MPa)	DESVIO PADRAO	COEF. VAR.	INTERVALO CONFIANCA MEDIA (95%)	
f_{cm}	29,0	4,1	0,14	27,5	--- 30,5
f_{ct}	34,3	3,3	0,10	33,1	--- 35,5
f_{cd}	46,6	4,7	0,10	44,9	--- 48,3
f_{ctd}	3,6	0,5	0,14	3,4	--- 3,8
f_{ctk}	41,2	5,2	0,13	39,4	--- 43,0
f_{tk}	2,9	0,6	0,21	2,7	--- 3,1
E_c	36700	2700	0,07	35700	--- 37600

Tab. 6.16 - Valores característicos médios finais para as argamassas, considerando-se amostragem de 34 exemplares, conforme exposto na tab. 6.15.

ARGAMASSAS - RELACOES DE RESISTENCIA E DEFORMACAO					
Nº	RELACAO	MEDIA (MPa)	DESVIO PADRAO	INTERVALO CONFIANCA MEDIA (95%)	
(01)	f_{ctd}/f_{cd}	0,079	0,009	0,076	--- 0,082
(02)	f_{cm}/f_{cd}	0,623	0,069	0,598	--- 0,648
(03)	f_{ct}/f_{cd}	0,739	0,063	0,717	--- 0,761
(04)	E_c/f_{cd}	791	65	768	--- 815
(05)	$f_{ctd}/\sqrt{f_{cd}}$	0,540	0,064	0,517	--- 0,563
(06)	$E_c/\sqrt{f_{cd}}$	5382	317	5270	--- 5495

Tab. 6.17 - Relações entre valores característicos de resistência ou entre valores característicos de resistência e deformação das argamassas empregadas.

A relação (05) é contemplada pelo ACI e citada por Balaguru ⁽¹¹⁾ com o valor de 0,4980.

Por fim, a relação $E_c/\sqrt{f_{cd}}$ é sugerida pela NBR 6118 - "Projeto e execução de obras de concreto armado" ⁽³⁾ - com o valor de 6600. O Projeto de Norma de Argamassa Armada ⁽⁸⁾,

prevendo a maior deformabilidade relativa da argamassa, sugere o valor de 5280 ($0,80 \times 6600$), valor bastante próximo do obtido experimentalmente. A proximidade entre valores teóricos - obtidos a partir da resistência à compressão simples da argamassa - e experimentais do módulo de deformação longitudinal já havia sido antecipadamente constatada na avaliação de deslocamentos dos ensaios de flexão.

7 CONCLUSÕES

7.1 Considerações Gerais

De início, é importante salientar que as considerações tecidas neste capítulo têm abrangência limitada, pois, a despeito do grande interesse em se realizar ensaios com a máxima diversidade e representatividade, questões de ordem econômica e de tempo de duração da pesquisa pesaram consideravelmente nas decisões iniciais, restringindo, em partes, esse anseio inicial. Contudo, diante do exposto nos capítulos precedentes, parece desnecessária a pontuação exata dos limites de validade destas conclusões.

Os ensaios, de maneira geral, transcorreram sem problemas intransponíveis. O material acabou por revelar um comportamento constante e previsível, notadamente nos ensaios de flexão, de realização menos trabalhosa.

A tendência atual de trato do material, como um tipo particular de concreto armado, sujeito às mesmas regras básicas de comportamento físico-mecânico, mostrou-se bastante válida.

As cargas de fissuração e ruptura revelaram-se bem próximas das obtidas pela teoria de concreto armado.

O desenvolvimento da fissuração, contrariando a tradição de estudos anteriormente feitos (19), foi razoavelmente diagnosticado nos dois ensaios - principalmente no tocante à abertura de fissuras - com o uso de equacionamento básico de concreto armado. Foram confirmadas as particularidades do material relativamente a esse fenômeno - fissuras finas e pouco espaçadas.

O material revelou ainda outra importante particularidade: maior deformabilidade. A consideração do módulo de deformação da argamassa como 80% do módulo de deformação de concreto de mesma resistência ($E_{argam} = 0,80 \cdot E_{concreto}$) forneceu valores teóricos de deslocamentos muito próximos dos observados experimentalmente, abonando tal prática, pelo menos por ora, na consideração de deslocamentos provocados por cargas de curta duração.

Qualifica-se como de grande importância e necessidade o desenvolvimento de ensaios complementares a estes, que contemplem os seguintes aspectos:

- argamassa armada com outros tipos de telas de uso potencial (por exemplo, telas de metal expandido);
- argamassa armada com armaduras compostas de telas associadas a fios de aço de diâmetros reduzidos;
- estruturas de argamassa armada em folhas poliédricas, obtidas pela composição de placas planas, como as aqui estudadas.

Buscando facilitar a consulta direta às conclusões desta pesquisa, as considerações relativas a cada um dos fenômenos analisados nos dois ensaios são a seguir apresentadas, de

forma objetiva e direta. Vale ressaltar, novamente, que são considerações de abrangência limitada, necessitando, portanto, de análises mais profundas e criteriosas antes de suas generalizações.

7.2 Ensaio de Flexão

7.2.1 Carga de fissuração

- a resistência à fissuração está diretamente ligada à qualidade da argamassa e às características geométricas dos elementos;
- o modelo teórico proposto pela NBR 6118, com consideração da plastificação da seção transversal, fornece bons resultados (a média das relações exp./teor. foi de 1,19);
- para o caso de seções retangulares, as eqs. 6.11, 6.12 e 6.13 resumem o modelo proposto;
- a consideração simplificada da retração ($f_{tk} = 0,75 \cdot f_{tk}$) pode ser adotada para a argamassa armada, a princípio, embora a consideração "exata" da retração, a seguir a tendência demonstrada nestes ensaios, tenha fornecido resultados mais precisos; parece interessante apropriar-se coeficientes de redução da resistência à tração do material, por efeito da retração, nos diferentes tipos de cura.

7.2.2 Carga de ruptura

- o modelo teórico proposto pela NBR 6118 para equacionamento do E.L.U. do concreto armado (fig. 6.10) fornece bons resultados para a argamassa armada;
- a princípio, os valores de deformações características na seção transversal adotados para o concreto armado (fig. 6.9) podem ser extrapolados para a argamassa armada, já que esse fato foi confirmado na prática (figs. 6.11 e 6.12);
- não foram notados efeitos negativos (perda de estabilidade) da armadura posicionada na região comprimida.

7.2.3 Deslocamentos

- o uso da teoria elementar da resistência dos materiais para avaliação de deslocamentos da argamassa armada - $d^2y/dx^2 = - M/(E \cdot I)$ - é bastante pertinente;
- para avaliação dos deslocamentos de flexão provocados por cargas de curta duração em elementos de argamassa armada com comportamento característico de estágio I (não fissurado) é interessante o uso de $I = I_1$ (momento de inércia no estágio I) e $E = E_1$ ou $E = E_4$, módulos de deformação longitudinal tangentes à origem, conforme definição em 6.1.4;
- para avaliação dos mesmos deslocamentos em elementos com carregamento superior ao da carga de fissuração (comportamento característico de estágio II) é interessante o uso de $I = I_2$ (momento de inércia no estágio II) e $E = E_2$ ou $E = E_5$, módulos de deformação longitudinal secantes, conforme já definido;

- no caso específico da avaliação de deslocamentos em elementos submetidos a carregamentos próximos do carregamento de fissuração ($p_r \leq p \leq 1,8 p_r$) pode ser interessante a utilização do momento de inércia equivalente de Branson (eq. 6.41).

7.2.4 Fissuração

- quando do início da fissuração, a abertura média de fissuras é de aproximadamente 0,05 mm; em instante próximo à ruptura, a abertura de fissuras fica em torno de 0,20 mm; o espaçamento médio final das fissuras é menor que o espaçamento entre os fios transversais das telas. Caracteriza-se portanto um padrão de fissuração com fissuras finas e pouco espaçadas;
- a despeito da existência de muitas formulações teóricas sobre o assunto, sugere-se, por ora, a utilização da formulação teórica de Mollica, para avaliação da abertura de fissuras (eq. 6.49);
- na sua aplicação, a consideração do espaçamento de referência "s," e da tensão média do aço (eq. 6.51) são bons artificios;
- é de extrema importância a continuidade dos estudos de fissuração do material, visando o estabelecimento de padrões característicos de fissuração, associados aos tipos e arranjos de armaduras e tipos de elementos.

7.3 Ensaio de Tração

7.3.1 Carga de fissuração

- a avaliação foi comprometida pelo empenamento das peças;
- a NBR 6118 sugere um modelo matemático que evidencia novamente a relação direta entre a carga de fissuração e a qualidade da argamassa; apesar da impossibilidade de se constatar experimentalmente esse modelo, sugere-se, por ora, sua adoção criteriosa, numa extrapolação do comportamento manifestado pelo material nos ensaios de flexão.

7.3.2 Carga de ruptura

- a consideração da armadura como único elemento resistente fornece bons resultados, sendo portanto aqui indicada;
- o nó soldado da tela não se configura, necessariamente, como ponto potencial de ruptura da armadura.

7.3.3 Deslocamentos

- a avaliação foi comprometida pelo empenamento das peças;
- estudos futuros deste comportamento do material devem ser encaminhados criteriosamente; é imprescindível o planejamento detalhado do equipamento de carregamento - sugere-se aqui a adoção de máquinas universais de ensaio - e das dimensões dos modelos - sugere-se aqui a adoção de modelos de menor comprimento; os resultados devem ser analisados de maneira global, com a consideração dos

deslocamentos médios - deslocamentos entre garras - como indicativos do comportamento.

7.3.4 Fissuração

- quando do início da fissuração, a abertura de fissuras é de aproximadamente 0,08 mm (superior à abertura inicial de fissuras verificadas nos ensaios de flexão); para cargas próximas da carga de ruptura, a abertura média de fissuras é de 0,17 mm; o espaçamento médio entre fissuras é praticamente coincidente com o espaçamento dos fios transversais das telas - maior portanto que o espaçamento de fissuras observado nos ensaios de flexão; contudo, novamente aqui, pode-se caracterizá-lo como um padrão de fissuração com fissuras pouco espaçadas e de pequena abertura;
- a formulação teórica que melhor traduz os resultados experimentais é a sugerida por Mollica, com consideração do espaçamento de referência "s₁" e da tensão média do aço - eq. 6.51;
- com essa formulação, a fissuração teórica resulta um pouco menor que a fissuração experimental observada - o maior espaçamento entre fissuras observado nos ensaios de tração tem como consequência um ligeiro aumento na abertura das fissuras, relativamente ao observado na flexão.

7.4 Ensaios Complementares

7.4.1 Ensaio de caracterização das argamassas empregadas em cada uma das séries

- a argamassa com o traço em massa de 1:2, x = 0,40 apresenta resistência característica à compressão superior a 25 MPa, valor este sugerido pelo Projeto de Norma de Argamassa Armada como limite inferior de resistência;
- a formulação teórica do Projeto de Norma de Argamassa Armada (10) para determinação do módulo de deformação longitudinal da argamassa a partir de sua resistência à compressão simples ($E = 0,80 \times 6600 \sqrt{f_{c3}}$) fornece bons resultados;
- a relação entre resistência à tração e resistência à compressão da argamassa obedece basicamente o sugerido para concretos com resistências mais elevadas ($f_{t3} = 0,08 \cdot f_{c3}$)

8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- 1 AMARAL, Nilo Andrade. Construções de concreto. São Paulo, EPUSP, 1971. 2 v.
- 2 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Guide for the design, construction, and repair of ferrocement; fifth draft. Detroit, 1986. (ACI 549.1R-XX)
- 3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). Projeto e execução de obras de concreto armado; NBR 6118. Rio de Janeiro, 1978.
- 4 -----, Arame de aço; ensaio de tração; NBR 6207. Rio de Janeiro, 1982.
- 5 -----, Agregado para concreto; NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.
- 6 -----, Ensaio de cimento portland; NBR 7215. Rio de Janeiro, 1982.
- 7 -----, Tela de aço soldada para armadura de concreto; NBR 7481. Rio de Janeiro, 1982.
- 8 -----, Projeto e execução de argamassa armada; CE 18:05.14.001. Rio de Janeiro, junho 1988.
- 9 BALAGURU, P., NAAMAN, A.E. SHAH, S.P. Ferrocement in bending, part I: static non-linear analysis. Chicago, Dept. of Materials Engineering; University of Illinois at Chicago Circle, 1976. (Progress report on National Science Foundation Grant ENG 74-20829)
- 10 BALAGURU, P.N., NAAMAN, A.E. SHAH, Surendra P. Analysis and behavior of ferrocement in flexure. Journal of the Structural Division, ASCE, 103 (ST10): 1937-51, Oct. 1977.
- 11 BALAGURU, P.N. Prediction of crack widths in ferrocement beams. Journal of Ferrocement, Bangkok, 11 (3): 203-14, July 1981.
- 12 BRANSON, Dan E. Desing procedures for computing deflections. Proceedings of the American Concrete Institute, Detroit, 65 (9): 730-40, Sept. 1965.
- 13 -----, Deflections of reinforced concrete flexural members. Proceedings of the American Concrete Institute, Detroit, 63 (6): 637-74, June 1966.

- 14 CASTANHO, José Lourenço Braga de Almeida. Flexão normal em secções transversais de peças de concreto protendido. São Paulo, Escritório Técnico J.C. de Figueiredo Ferraz, 1972. (Pub. n.9).
- 15 EL DEBS, Mounir Khalil. Contribuição ao projeto de galerias enterradas: alternativas em argamassa armada. São Carlos, Escola de Engenharia, 1984. (Tese de Doutorado)
- 16 HANAI, João Bento de. Construções de argamassa armada; situação, perspectivas e pesquisas. São Carlos, Escola de Engenharia, 1981.
- 17 HANAI, João Bento de. Argamassa armada: fundamentos tecnológicos para projeto e execução. São Carlos, EESC-USP, 1987. (Tese de Livre-Docência)
- 18 KUMAR, G.V.S. SHARMA, P.C. An investigation of the ultimate and first crack strengths of ferrocement in flexure. Indian Concrete Journal, Bombay, 50 (11): 335-40, Nov. 1976.
- 19 LANGENDONCK, Telemaco Van MOLINARI, Gilberto. Resistência do concreto a tração na flexão. Engenharia, São Paulo, 4 (43): 245-54, março 1946.
- 20 LOGAN, D. SHAH, S.P. Moment capacity and cracking behavior of ferrocement in flexure. Proceedings of the American Concrete Institute, Detroit, 70 (12): 799-804, Dec. 1973.
- 21 MOLLICA JUNIOR, Sérgio. O uso da tela soldada no combate à fissuração. São Paulo, IBTS, s.d.
- 22 NAAMAN, Antoine RAMOS, Carlos. Propiedades mecánicas del ferrocemento en tracción, flexión y compresión. Boletín IMME, Caracas, 9 (33/4): 3-51, ene.-jun. 1971.
- 23 NAAMAN, A.E. Performance criteria for ferrocement. Journal of Ferrocement, Bangkok, 9(2): 75-92, April 1979.
- 24 NEVILLE, Adam M. Propriedades do concreto; trad. de Salvador Eugenio Giamusso. São Paulo, Pini, 1982.
- 25 RAJAGOPALAN, K. PARAMESWARAN, V.S. Cracking and ultimate strength characteristics of ferrocement in direct tension and in pure bending. Indian Concrete Journal, Bombay, 48 (12): 387-93, 395, Dec. 1974.

- 26 RECOMENDAÇÕES técnicas para o emprego do ferrocimento;
trad. RACCOMANDAZIONI tecniche A.I.C.A.P. per
l'impiego del ferrocemento. Notiziario AICAP - L'
Industria del Cemento - 11/84. In: CEARA.
Universidade Federal. Centro de Tecnologia Projeto
Ferrocimento. Boletim trimestral nº. 16. Fortaleza ,
1986.
- 27 SANTOS, Lauro Modesto dos. Cálculo de concreto armado.
São Paulo, Edgard Blucher; LMS, 1977/81. v.1.
- 28 -----, v.2.
- 29 SCHIEL, Frederico. Introdução à resistência dos
materiais. São Carlos, Escola de Engenharia, 1983.
- 30 SOMAYAJI, S. BALAGURU, P.N. Influence of transverse
wires on cracking of model reinforced composites .
In: INTERNATIONAL Symposium on Ferrocement, Bergamo,
Jul. 22-24, 1981.
- 31 SWAMY, R.N. AL- WASH, A.A. Cracking behaviour of
ferrocement in flexure. In: INTERNATIONAL Symposium
on Ferrocement, Bergamo, Jul. 22-24, 1981.
- 32 UNIAO SOVIETICA. Comitê Federal do Conselho de
Ministros (GOSSTROI-URSS). Instrução para projetos
de estruturas de cimento armado; SN-366-77
(tradução). Moscou, 1978.