

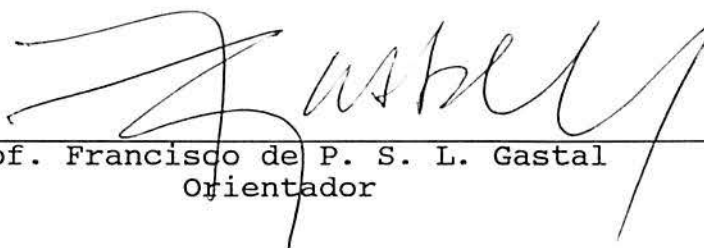
ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS  
PROTENDIDOS TIPO LAJE-ROTH

CARLA SUZANA BRITTO E SILVA

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA.

Porto Alegre, 30 de agosto de 1994

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pelo Curso de Pós-Graduação.



---

Prof. Francisco de P. S. L. Gastal  
Orientador



---

Prof. Jorge Daniel Riera  
Coordenador do CPGEC/UFRGS

Banca Examinadora:

- Prof. Francisco de P. S. L. Gastal (Orientador)  
Ph. D. pela North Carolina State University
- Prof. Américo Campos Filho (Co-orientador)  
D. Sc. pela EPUSP
- Prof. Guillermo J. Creus  
D. Sc. pela COPPE/UFRJ
- Prof. Sérgio Roberto Maestrini  
Ph. D. pela North Carolina State University
- Prof. João Luiz Campagnolo  
M. Sc. pela UFRGS

Ao meu avô  
(saudade)

## AGRADECIMENTOS

Aos professores Francisco de P. S. L. Gastal e Américo Campos Filho por aceitarem o desafio de orientar um trabalho com envolvimento experimental, pela orientação segura e paciência ao longo deste.

Aos professores João Luiz Campagnolo, Dario L. Klein e Luiz Carlos P. Silva Filho pelo auxílio prestado na fase experimental.

Ao Bueno, ao Fontes, ao Flávio e aos demais funcionários do LEME pela incansável colaboração na montagem e desenvolvimento dos ensaios experimentais. Aos bolsistas de iniciação científica do LEME.

À PRECONCRETOS S/A pela cessão dos protótipos e ao Eng<sup>o</sup> Rubem Schwingel por intermediar os contatos junto a esta, pelos dados fornecidos e interesse demonstrado ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Alfiéri Félix Gobetti e José Carlos F. Hennemann pelo voto de confiança na ocasião do ingresso no curso.

À Sra. Juliana Z. Bonilha pela revisão das referências bibliográficas.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido.

Aos colegas e funcionários do Curso de Pós-Graduação pela convivência diária. Ao Roberto Rios, ao Ricardo Azevedo, ao Jaime Claire, ao Roberto Pavan, à Cláudia Sousa, ao Mário Paluch e ao Fábio Willrich, sobretudo pela amizade e, a este último, também pelo auxílio inestimável na utilização dos programas auxiliares, nos ensaios experimentais e na impressão final.

À minha família pela presença e pelo apoio.

## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Descrição geral do problema.....	3
1.2 - Escolha dos protótipos.....	4
2 - ASPECTOS GERAIS.....	6
2.1 - Execução dos protótipos.....	6
2.1.1 - Colocação e protensão das cordoalhas.....	6
2.1.2 - Moldagem.....	6
2.1.3 - Concretagem dos protótipos em estudo.....	6
2.1.4 - Cura.....	7
2.1.5 - Corte e transporte.....	8
2.2 - Dimensões e valores característicos da laje 12.....	8
2.3 - Disposição física dos protótipos no laboratório....	9
2.4 - Datas características.....	20
3 - ENSAIOS PRELIMINARES E EQUIPAMENTOS.....	22
3.1 - Ensaio no concreto.....	22
3.1.1 - Ensaio de compressão simples.....	23
3.1.2 - Ensaio de compressão diametral.....	25
3.1.3 - Determinação do módulo de deformação longi- tudinal.....	26
3.2 - Ensaio no aço.....	28
3.2.1 - Ensaio de tração simples.....	28

3.3 - Equipamentos e demais aparelhagens.....	31
3.3.1 - Defletômetros.....	31
3.3.2 - Extensômetros elétricos.....	32
3.3.3 - Indicadores de deformação.....	32
3.3.4 - Elongâmetro.....	33
3.3.5 - Equipamentos auxiliares.....	33
4 - ENSAIOS NOS PROTÓTIPOS.....	36
4.1 - Ensaios de carregamento instantâneo (curta duração)	36
4.1.1 - Com carga concentrada até a ruptura.....	36
4.1.2 - Com carga de serviço distribuída.....	37
4.2 - Ensaios de carregamento permanente (longa duração).	38
4.2.1 - Com carga de serviço distribuída.....	38
4.2.2 - Somente peso próprio.....	38
5 - MODELO NUMÉRICO E PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO.....	48
5.1 - Modelo numérico.....	48
5.2 - Procedimentos de cálculo.....	51
5.2.1 - Cálculo do momento fletor último.....	51
5.2.2 - Determinação do fator R, ações de lon-	
ga duração.....	51
5.2.3 - Cálculo dos vãos máximos admissíveis para	
as lajes ROTH e critérios de limitação.....	52
5.2.3.1 - Cálculo dos vãos máximos admissí-	
veis para as lajes ROTH, pelo	
critério de deformações.....	52

5.2.3.2 - Cálculo dos vãos máximos admissíveis para as lajes ROTH, pelo critério de flexão.....	53
5.2.3.3 - Cálculo dos vãos máximos admissíveis para as lajes ROTH, pelo critério do esforço cortante.....	53
<b>6 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>
6.1 - Protótipos.....	54
6.1.1 - Ensaio de carregamento instantâneo, com carga de serviço distribuída.....	54
6.1.2 - Ensaio de carregamento permanente, com carga de serviço distribuída.....	57
6.1.3 - Ensaio de carregamento permanente, somente peso próprio.....	61
6.1.4 - Ensaio instantâneo, retirada da carga de serviço.....	65
6.1.5 - Ensaio de carregamento instantâneo, com carga concentrada até a ruptura.....	67
6.1.6 - Comparação entre momentos fletores últimos dos protótipos.....	83
6.2 - Lajes.....	84
6.2.1 - Influência da posição das armaduras no momento fletor último das lajes.....	85
6.2.2 - Influência da perda de protensão no momento fletor último das lajes.....	87

6.2.3 - Comportamento das lajes ROTH com carregamento distribuído, curta duração, através do programa VISCO.....	88
6.2.4 - Comportamento das lajes ROTH com carregamento distribuído, longa duração, através do programa VISCO.....	100
6.2.5 - Desempenho das lajes ROTH.....	111
7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	121
ANEXO A .....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128



## LISTA DE SÍMBOLOS

### I - LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

$A_c$	- área da seção transversal do concreto
$A_s$	- área da seção transversal da armadura inferior
$A_s'$	- área da seção transversal da armadura superior
$D$	- diâmetro do corpo de prova
$E_c$	- módulo de deformação longitudinal do concreto
$E_{co}$	- módulo de deformação longitudinal do concreto, na origem
$E_s$	- módulo de deformação longitudinal do aço
$F_m$	- carga de ruptura da cordoalha
$F_p$	- força de protensão
$F_1$	- carga a 1% de alongamento da cordoalha
$L$	- comprimento do corpo de prova
$M_u$	- momento fletor último
$P$	- carga linear aplicada segundo a geratriz do corpo de prova
$R$	- razão entre flecha ao longo do tempo e flecha instantânea
$T$	- temperatura

### II - LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

$d$	- altura útil da seção de concreto
$d'$	- altura do cobrimento
$f$	- flecha
$f_{c,j}$	- resistência à compressão do concreto após $j$ dias
$f_{ck}$	- valor característico da resistência à compressão do concreto
$f_{cm}$	- resistência média à compressão do concreto
$i$	- índice
$k$	- parâmetro de endurecimento
$l$	- comprimento do vão teórico
$(1/r)$	- curvatura da seção
$s$	- índice
$t$	- tempo, índice

### III - LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS

$\Delta$  - incremento

### IV - LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

$\delta$  - desvio padrão

$\epsilon_c$  - deformação específica do concreto

$\epsilon_s$  - deformação da armadura tracionada

$\epsilon_1$  - deformação da armadura inferior

$\epsilon_2$  - deformação da armadura superior

$\nu$  - coeficiente de atrito

$\nu$  - coeficiente de Poisson

$\sigma_c$  - tensão normal de compressão no concreto

$\sigma_{po}$  - tensão inicial de protensão

$\sigma_r$  - tensão de tração na ruptura da cordoalha

$\sigma_s$  - tensão normal na armadura

$\sigma_t$  - tensão de tração na ruptura do concreto

$\phi$  - diâmetro da barra de armadura, diâmetro nominal dos fios da cordoalha

$\varphi$  - coeficiente de deformação lenta

## RESUMO

Neste trabalho é desenvolvido um estudo numérico-experimental do comportamento de elementos protendidos tipo laje-ROTH, sujeitos a carregamentos instantâneos e de longa duração.

Inicialmente é feita uma descrição das estruturas e do seu processo de execução. Após são descritos os ensaios preliminares, equipamentos utilizados, os sistemas de carregamentos empregados nos ensaios e sistemas de medição.

É apresentada também uma completa descrição dos ensaios executados sobre os protótipos e da análise numérica efetuada para os protótipos e para as demais lajes tipo ROTH.

Finalmente são apresentados os resultados obtidos, as comparações entre as análises numérica e experimental e são, também, tecidas algumas conclusões.

## ABSTRACT

This work describes a numerical and experimental study of the behavior of prestressed concrete slabs, type ROTH, subjected to instantaneous and long-term loading.

Initially the structure and its execution process are described, as well as the preliminary tests, the equipment used, the loading and measuring systems.

A thorough description of the experimental tests, for the prototypes, is presented and also of the numerical analysis for the complete set of slabs type ROTH.

Finally the numerical and experimental results are presented and compared and some conclusions are drawn.

## 1 - INTRODUÇÃO

As primeiras experiências de utilização da protensão no concreto datam do final do século passado.

Devido à fraca resistência do concreto à tração, procurou-se eliminar as tensões de tração no concreto, através da compressão deste com armaduras de aço de dureza natural, tracionadas e ancoradas na própria peça (Pfeil, 1980).

Em 1886, P.H. Jackson, de São Francisco, teria feito a primeira proposição de se pré-tensionar o concreto. Em 1888, W. Döhrung, de Berlim, patenteava um sistema de protensão em bancada. Em 1906, M. Koenen, de Berlim, realizava o primeiro ensaio com armadura concretada sob tensão. Naquela época, todavia, os efeitos da retração e fluência do concreto ainda não eram conhecidos, fazendo com que fosse anulada a protensão, de forma que, após algum tempo, as peças passassem a se comportar como sendo feitas de concreto armado comum (Leonhardt, 1983).

Em 1919, K. Wettstein empregou, pela primeira vez, aço de alta resistência sob elevadas tensões (cordas de piano). R.H. Dill, de Nebraska, em 1923, foi o primeiro a reconhecer que se deveria utilizar fios de alta resistência sob elevadas tensões. Mas foi somente a partir de 1928, com o engenheiro francês Eugene Freyssinet que as necessárias condições para a protensão foram estabelecidas e descritas de forma correta; Freyssinet pesquisou a retração e a fluência do concreto, constatando a necessidade da utilização do aço duro, submetido a tensões elevadas, para realizar as protensões, obtendo uma protensão mais eficiente (Leonhardt, 1983; Odebrecht, 1979).

Nas próximas décadas, seguiram-se vários nomes que trouxeram colaborações importantes para a utilização do concreto protendido, entre estes, Dischinger (1936), Magnel (1940), K.B. Billner (1942), Birkenmaier, Brandestini, Ros e Vogt (processo BBRV), F. Leonhardt, W. Baur, U. Finsterwalder (1950), Y. Guyon (1951), R. Morandi, P.W. Abeles, H. Rüschi e tantos outros, citados por Leonhardt (1983) e Pfeil (1980).

No Brasil, a primeira obra em concreto protendido foi a ponte do Galeão (1948), sendo o aço, as ancoragens, os

equipamentos e o projeto importados da França (Vasconcelos, 1985; Pfeil, 1980).

As cordoalhas começaram a aparecer na década de 60, gradativamente substituindo os fios isolados, por serem mais econômicas além de garantir melhores condições de aderência, devido à sua disposição helicoidal. Duffles Andrade foi o pioneiro no uso de cordoalhas no Brasil, fazendo ele próprio o trançado dos fios, segundo Vasconcelos (1985).

Durante cerca de seis anos a patente Freyssinet foi a única explorada no Brasil. Havia casos isolados da aplicação de outros sistemas, como o Baur-Leonhardt na ponte do rio Guaíba e o sistema Dywidag nos vertedouros da barragem de Furnas (Vasconcelos, 1985).

O segundo processo utilizado no Brasil e o primeiro genuinamente brasileiro, foi o sistema Rudloff, desenvolvido por José Rudloff Manns, chileno radicado no Brasil em 1952, citado por Vasconcelos (1985).

Outros nomes se destacaram na história do concreto protendido no Brasil, entre os quais os de Walter Pfeil, José Carlos de Figueiredo Ferraz, Evandro Porto Duarte, Sérgio Luiz Carneiro e Carlos Freire Machado (estes três responsáveis pelas ancoragens MAC), entre outros (Vasconcelos, 1985).

Em 1964 foi fundada a PROTENSA, no Paraná, uma das pioneiras na execução de peças premoldadas protendidas no Brasil. Em 1965 foi fundada a CINASA - Construção Industrializada Nacional S/A, em São Bernardo do Campo. Inicialmente produziria painéis para a construção de casas pré-fabricadas, o que demandaria maciços investimentos sem retorno a curto prazo, isto acarretou o desvio desta atividade para a produção de peças premoldadas protendidas de fio aderente (Vasconcelos, 1985).

Entre as inúmeras empresas de premoldados no país, de acordo com Vasconcelos (1985), podem ser citadas as seguintes:

- REAGO Indústria e Comércio S/A (SP);
- S.C.A.C. (SP);
- C.P.M. (SP);
- Munte Construções Industrializadas Ltda (SP);
- Premo (MG);
- Precon (MG);
- Beltram (BA);

- PREMAG (RJ);
- Stahlton (RJ);
- Preconcretos S/A Indústria e Comércio (RS),  
fornecedora dos protótipos estudados neste trabalho.

A PRECONCRETOS S/A Indústria e Comércio surgiu em 1973, a fim de suprir as necessidades de rapidez de construção, através da fabricação de produtos de concreto premoldado e protendido.

A importância das indústrias de premoldados protendidos reside no fato de permitir a construção de grandes áreas, prédios comerciais, industriais, administrativos, de ensino, pontes, etc., com altos padrões de qualidade e rapidez, resultando em retorno imediato dos investimentos, seja em lucros, seja em benefícios para a sociedade.

### 1.1 - Descrição geral do problema

Este trabalho tem por objetivo uma análise numérico-experimental do comportamento de elementos protendidos tipo laje-ROTH, face a total falta de referências bibliográficas sobre o assunto.

O estudo compreende uma análise numérica do comportamento dos elementos frente a carregamentos instantâneos, em função do tempo e também a determinação de sua capacidade última de carga.

A análise experimental é procedida sobre oito protótipos, dos quais dois são carregados, até a ruptura, instantaneamente, dois são mantidos com o carregamento de serviço e dois sem carga, além do peso próprio, por um período de quatro meses. Após este período as quatro lajes foram submetidas a carregamentos instantâneos de forma semelhante às duas primeiras. Terminada esta série de ensaios, mais dois protótipos, de outra partilha, foram levados à ruptura, mediante carregamento instantâneo, totalizando oito protótipos.

Os resultados numéricos e experimentais são comparados com a finalidade de ajustar um modelo numérico que possa representar o comportamento de tais elementos. Este modelo poderá ser utilizado na otimização do projeto destas lajes.

## 1.2 - Escolha dos protótipos

A PRECONCRETOS S/A, fornecedora dos protótipos, fabrica, dentre inúmeros outros produtos, as lajes tipo ROTH nas designações nominais mostradas na tabela 1.1.

Lajes tipo ROTH são lajes pré-moldadas de concreto protendido. A seção característica da laje ROTH 12 é mostrada na figura 1.1.

A diferença básica entre lajes de mesma altura está na quantidade de armadura; assim, uma laje 12S tem maior número de cordoalhas que uma laje 12 e a laje 12SS, por sua vez, possui maior quantidade de armadura que as duas anteriores.

As lajes são produzidas, conforme descrito no item 2.1, no comprimento pretendido pelo cliente e podem ser serradas com precisão de centímetros. Além disso, conforme as necessidades de projeto, pode-se aumentar a área de concreto, reduzindo-se o número de vazios cilíndricos longitudinais e/ou a armadura.

A escolha dos protótipos a serem estudados experimentalmente recaiu sobre a laje 12, com um comprimento de cinco metros, por apresentar características compatíveis com o espaço físico e equipamentos existentes no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME), do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



Tabela 1.1 - Características nominais das lajes ROTH

DESIGNAÇÃO	8	12	12 S	12SS	16	16 S	20	20 S	24	24 S	24SS	
ALTURA (cm)	8	12	12	12	16	16	20	20	24	24	24	
LARGURA (cm)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
PESO KN * 10 <sup>-2</sup>	m	93	120	120	120	150	150	180	180	231	278	278
	m <sup>2</sup>	155	200	200	200	250	250	300	300	385	463	463

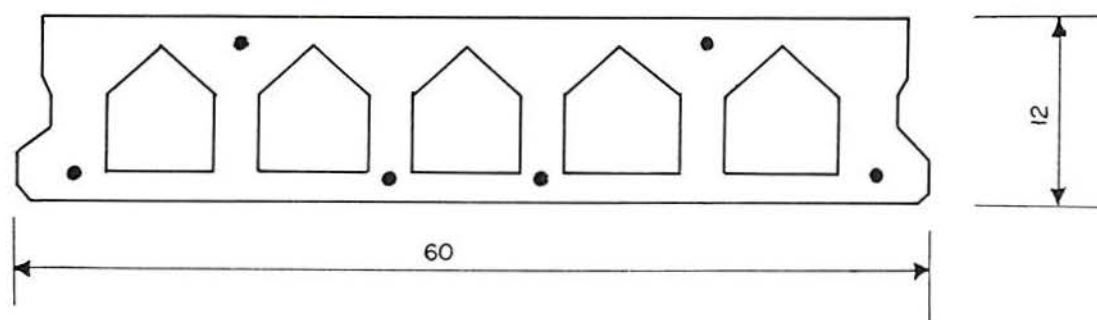


Figura 1.1 - Características da seção transversal do protótipo (cm)

## 2 - ASPECTOS GERAIS

### 2.1 - Execução dos protótipos

#### 2.1.1 - Colocação e protensão das cordoalhas

A armadura das lajes, formadas por cordoalhas de aço de três fios (RN-180), é protensionada sobre as pistas (foto 2.1).

A armadura superior é constituída de duas cordoalhas de diâmetro 2,5 mm e a inferior de quatro cordoalhas de diâmetro 3,0 mm.

Segundo LEONHARDT (1983), o tipo de protensão em questão é denominado protensão em bancada (pretensioning). As cordoalhas são tensionadas entre blocos de ancoragem fixos e são assim concretadas (fotos 2.2 e 2.3).

A tensão de protensão inicial aplicada pelo macaco hidráulico é da ordem de  $144,19 \text{ KN/cm}^2$  para as cordoalhas superiores e  $139,68 \text{ KN/cm}^2$  para as cordoalhas inferiores (item 2.2).

#### 2.1.2 - Moldagem

A moldagem se processa sobre pistas metálicas de 120 metros de comprimento, mediante a utilização de moldadoras móveis (foto 2.4).

#### 2.1.3 - Concretagem dos protótipos em estudo

Os seis primeiros protótipos foram concretados juntamente com o restante da partida, ocupando toda a pista metálica. Os dois últimos foram concretados em data posterior.

O concreto é dosado racionalmente, nas instalações da PRECONCRETOS, com resistência característica maior ou igual a 30 MPa (item 2.2).

Ao cimento portland comum foi adicionada cinza vulcânica, a fim de melhorar a trabalhabilidade do concreto, mantendo baixo o fator água-cimento.

O concreto fresco é cuidadosamente transportado, para suprir a moldadora móvel; esta efetua a concretagem à razão de 0,68m/min e é reabastecida periodicamente até o final da concretagem, de maneira que esta se processe de forma contínua, sem interrupções.

O concreto é adensado automaticamente, por um sistema existente na própria máquina. Durante a extrusão produzida pela moldadora, o concreto envolve as cordoalhas pretensionadas e, estando excepcionalmente adensado, garante a perfeita aderência entre os dois materiais.

Os protótipos foram nomeados em função da posição que ocupavam na pista de concretagem. Assim, contidos no primeiro terço da pista estavam os protótipos A1 e A2, lado a lado; no terço médio, os protótipos B1 e B2 e, no terço final, os protótipos denominados C1 e C2 (fig. 2.1). Os protótipos identificados pelas letras D e E são originários de uma outra partilha e foram tomados aleatoriamente na pista de concretagem.

Durante a concretagem dos protótipos dos tipos A, B e C, foram retirados três conjuntos de corpos de prova cilíndricos (ver item 3.1). O primeiro conjunto, denominado conjunto "A", corresponde à amostra do concreto utilizado na confecção das lajes pertencentes ao primeiro terço da pista de concretagem. O segundo, denominado conjunto de corpos de prova "B", corresponde à amostra do concreto utilizado no terço médio da pista e o terceiro, conjunto "C", corresponde ao terço final da pista (foto 2.5). Quanto aos protótipos D e E, por ocasião da concretagem, a moldagem dos corpos de prova foi efetuada pela PRECONCRETOS, sem o acompanhamento da nossa equipe.

#### 2.1.4 - Cura

O processo de cura é realizado de forma acelerada, pela aplicação de vapor supersaturado. A pré-cura se dá em 3 horas, a cura em 12 horas a uma temperatura de aproximadamente 80°C e o resfriamento em 1 hora.

Através da cura a vapor podem ser atingidos, muito rapidamente, valores elevados de resistência à compressão para o concreto, de ordem igual ou superior à 30 MPa.

### 2.1.5 - Corte e transporte

Quando atingidos os valores de resistência descritos em 2.1.4, as lajes são serradas com a precisão de centímetros, momento em que transfere-se a protensão ao concreto (fotos 2.6 a 2.8).

O posicionamento dos protótipos na pista de concretagem está descrito no item 2.1.3 e mostrado na figura 2.1.

A medida em que vão sendo serradas, as lajes são transportadas para um caminhão ou para o depósito e já podem ser utilizadas na obra.

No caso dos protótipos em estudo, estes foram cuidadosamente içados e colocados no caminhão, então transportados para o LEME (foto 2.9).

### 2.2 - Dimensões e valores característicos da laje 12

As dimensões principais dos protótipos são dadas nas figuras 1.1 e 2.2.

Os valores abaixo relacionados são valores teóricos fornecidos pelo fabricante e são correspondentes à laje de 12 centímetros de altura.

-Peso próprio: 1,14 KN/m  
1,91 KN/m<sup>2</sup>  
5,72 KN em 5,0 m

-Área de armadura protendida: 1,142 cm<sup>2</sup>  
(2\*0,147+4\*0,212)

-Força de protensão: -160,84 KN (superior -42,39 KN, inferior -118,45 KN)

-Tensão inicial de protensão no aço:  $\sigma_{p_0}^s = 144,19$  KN/cm<sup>2</sup>;  $\sigma_{p_0}^i = 139,68$  KN/cm<sup>2</sup>

-Momento de protensão: -341,52 KN cm

-Momento último teórico: 1 133 KN cm

-Área da seção de concreto: 457,41 cm<sup>2</sup>

-Protensão com aderência inicial

-Aço CP-180 RN -superior 2\*3\*2,5 mm

-inferior 4\*3\*3,0 mm

-Limite de resistência à tração ( $f_{ptk}$ ): 180 KN/cm<sup>2</sup>

-Módulo de elasticidade do aço: 19 500 KN/cm<sup>2</sup>

-Resistência média à compressão aos 28 dias ( $f_{ck}$  teórico):  $3 \text{ KN/cm}^2$  (30 MPa)

-Tipo de cimento: portland comum com adição de cinzas vulcânicas, endurecimento normal

-Carga de serviço:  $1,65 * 10^{-2} \text{ KN/cm}$  ( $2,75 * 10^{-2} \text{ KN/cm}^2$ )

### 2.3 - Disposição física dos protótipos no laboratório

A laje denominada B1 foi colocada diretamente no pórtico para ensaio de carregamento instantâneo, apoiada sobre blocos de concreto, conforme figura 2.3 (foto 2.10).

A outra laje destinada ao ensaio de carregamento instantâneo, denominada C2, ficou apoiada sobre dispositivos conhecidos como "tartarugas"; estes aparelhos são uma espécie de carrinho e permitem que a laje seja transportada por duas pessoas, dentro do laboratório.

As demais lajes, destinadas à análise do comportamento em função do tempo, devido à falta de condições físicas (as lajes pesam cerca de 6 KN) não puderam ocupar a disposição física desejada para os ensaios já no primeiro dia de idade. O posicionamento das lajes neste dia está mostrado na figura 2.4.

Foram colocados espaçadores de madeira entre as lajes que partilhavam dos mesmos apoios, a fim de que o peso próprio de uma não fosse transferido à outra.

Os protótipos A1 e B2 foram monitorados através de defletômetros mecânicos a partir deste primeiro dia de idade.

Aos seis dias de idade as lajes C1 e A2 foram colocadas em suas posições definitivas para os ensaios de carga de longa duração. A figura 2.5 mostra a nova disposição dos protótipos no laboratório a partir desta data.

Com a utilização de blocos de concreto estas lajes foram apoiadas em suas extremidades, simulando as condições de apoio normalmente utilizadas em obra. Adotou-se 10 centímetros como largura de apoio para todos os protótipos, de 3 a 4 centímetros maior que a usual em obra, para evitar problemas, como o escorregamento da laje dos apoios, o que poderia ocorrer quando do ensaio de carregamento instantâneo, a medida em que as deformações se tornam elevadas (fig. 2.3).

Após três meses e meio do ensaio do último dos seis

protótipos iniciais, foram trazidos para o laboratório os protótipos denominados D e E, que mereceram cuidados semelhantes aos dispensados aos protótipos anteriores.

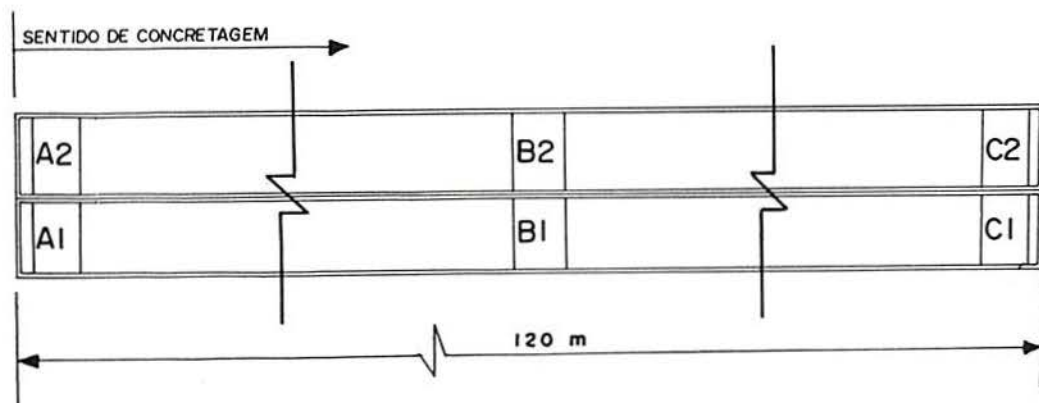


Figura 2.1 - Posicionamento dos protótipos na pista de concretagem

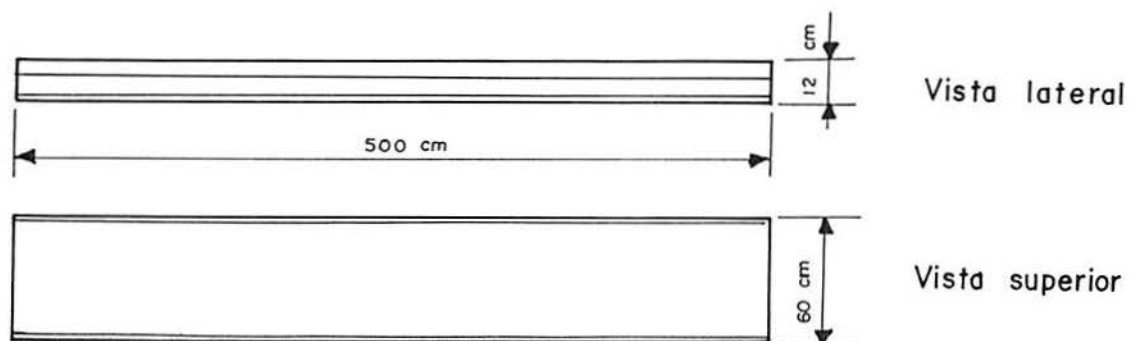


Figura 2.2 - Dimensões principais dos protótipos



Foto 2.1 - Protensão das armaduras sobre a pista de concretagem

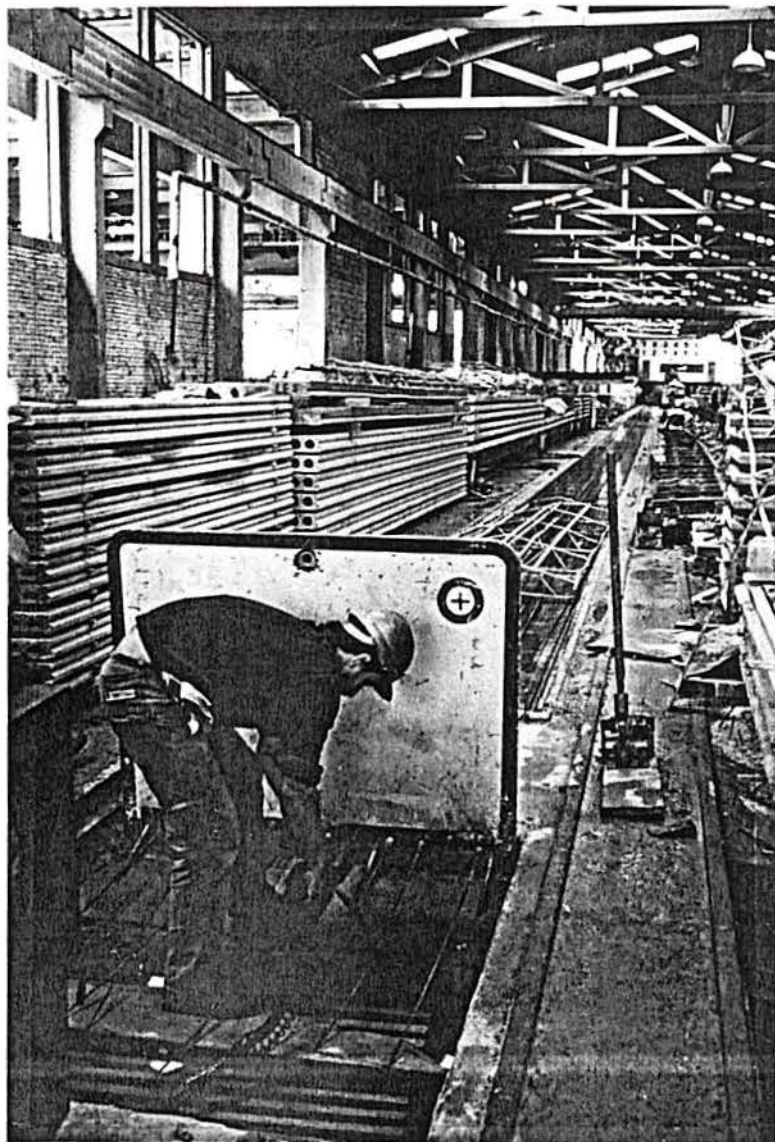


Foto 2.2 - Execução da protensão, cordoalha a cordoalha, com a devida proteção contra acidentes. A armadura é protensionada sobre as pistas





Foto 2.3 - Macaco pneumático na execução da protensão na outra extremidade da pista. Ancoragem através de cunhas em suportes provisórios

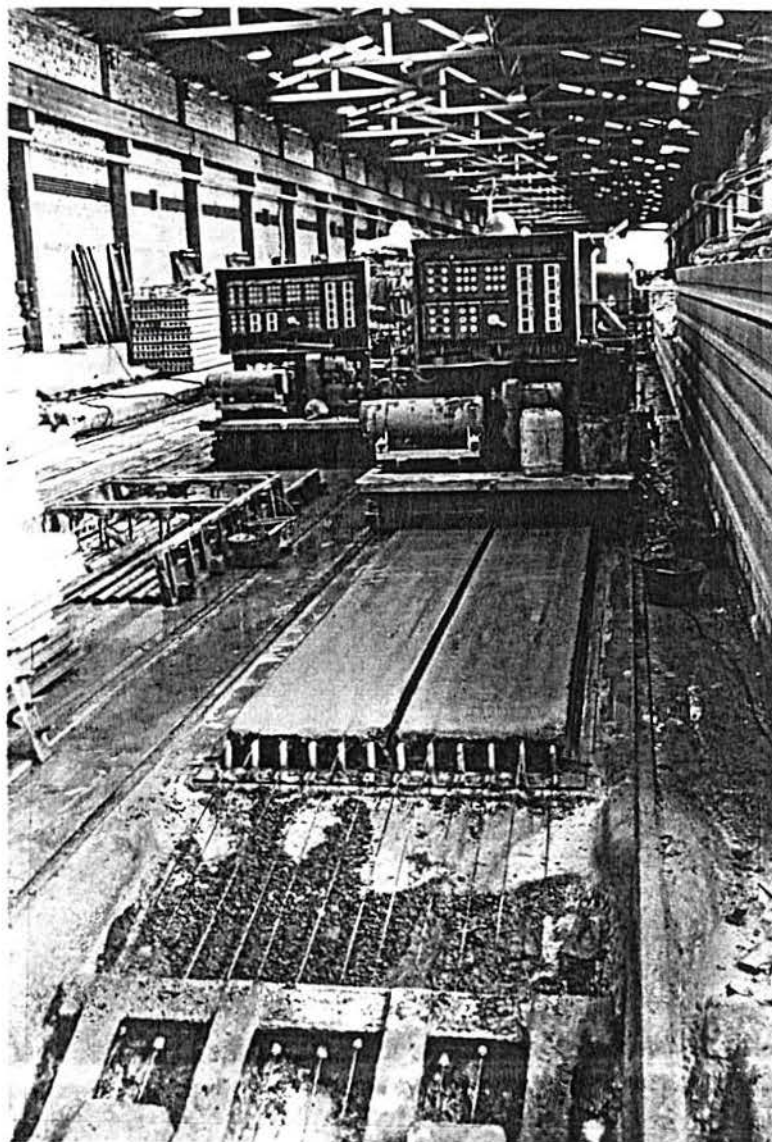


Foto 2.4 - Lajes executadas em forma de prancha, mediante concretagem por moldadoras móveis. O concreto, durante a extrusão produzida pela moldadora, envolve as cordoalhas pretensionadas

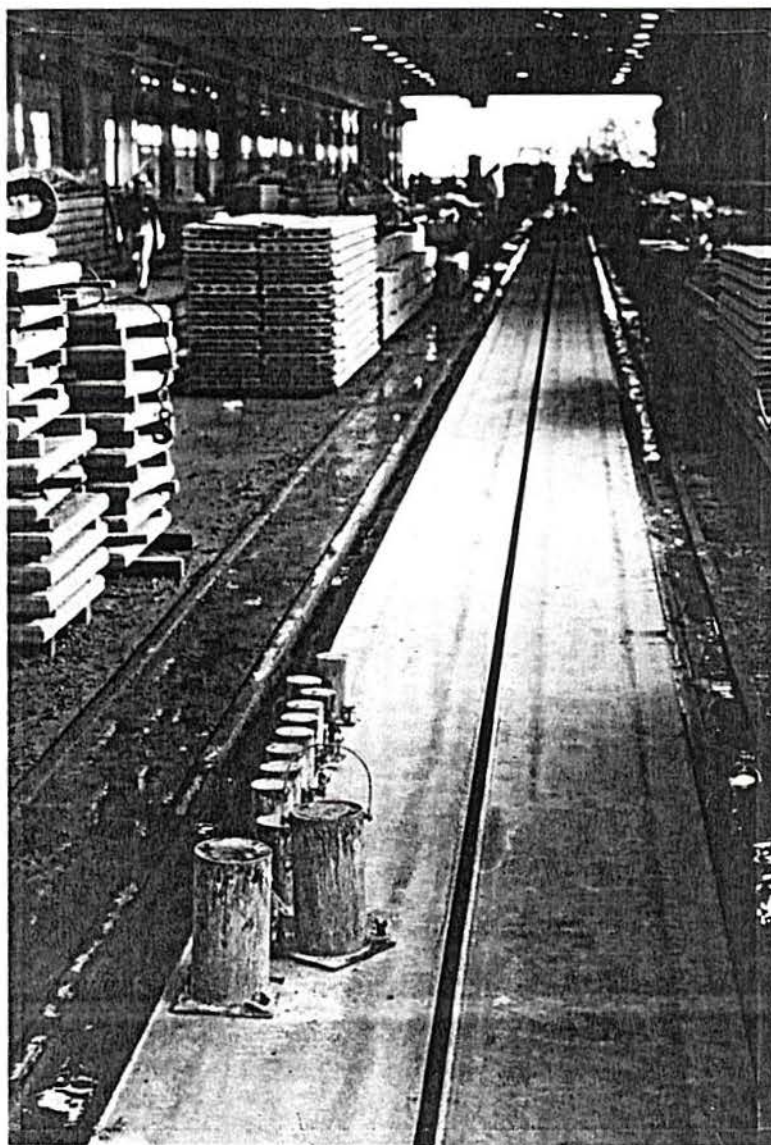


Foto 2.5 - Vista das lajes sobre pista metálica de 120 metros de comprimento, após cura acelerada mediante aplicação de vapor supersaturado. Os corpos de prova sofreram o mesmo processo de cura

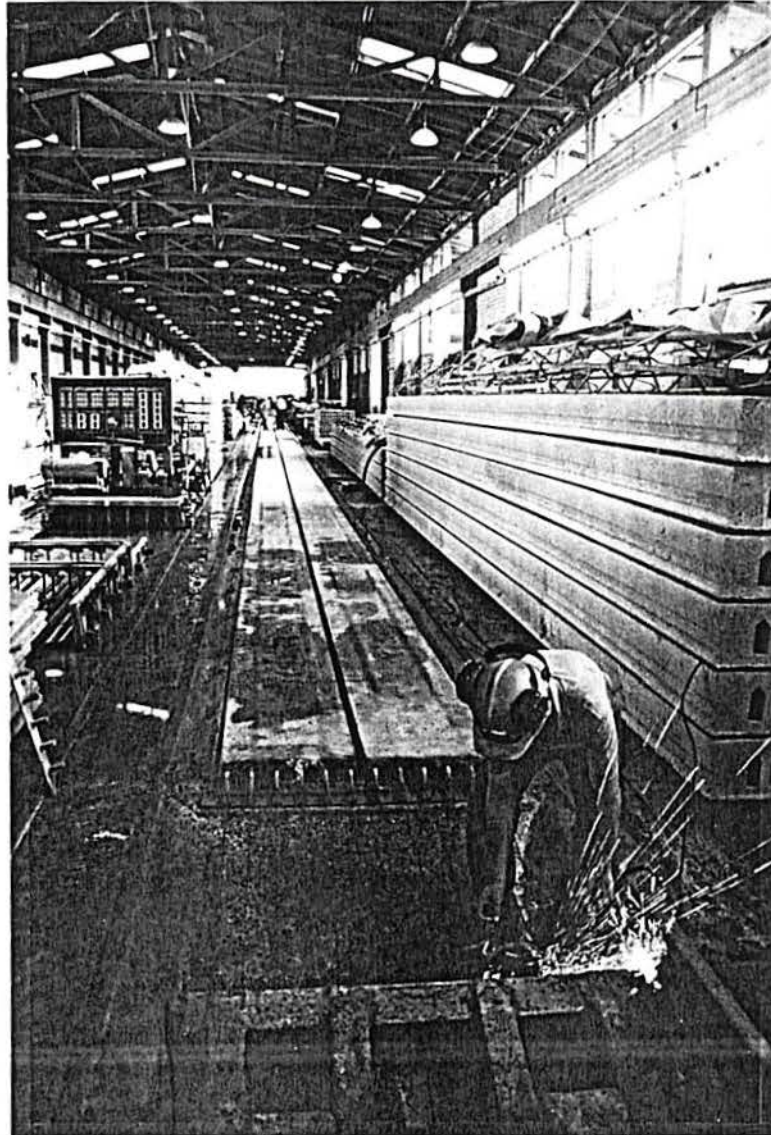


Foto 2.6 - Momento em que as cordoalhas são cortadas dos suportes provisórios. A ancoragem se dá por aderência entre a armadura e o concreto

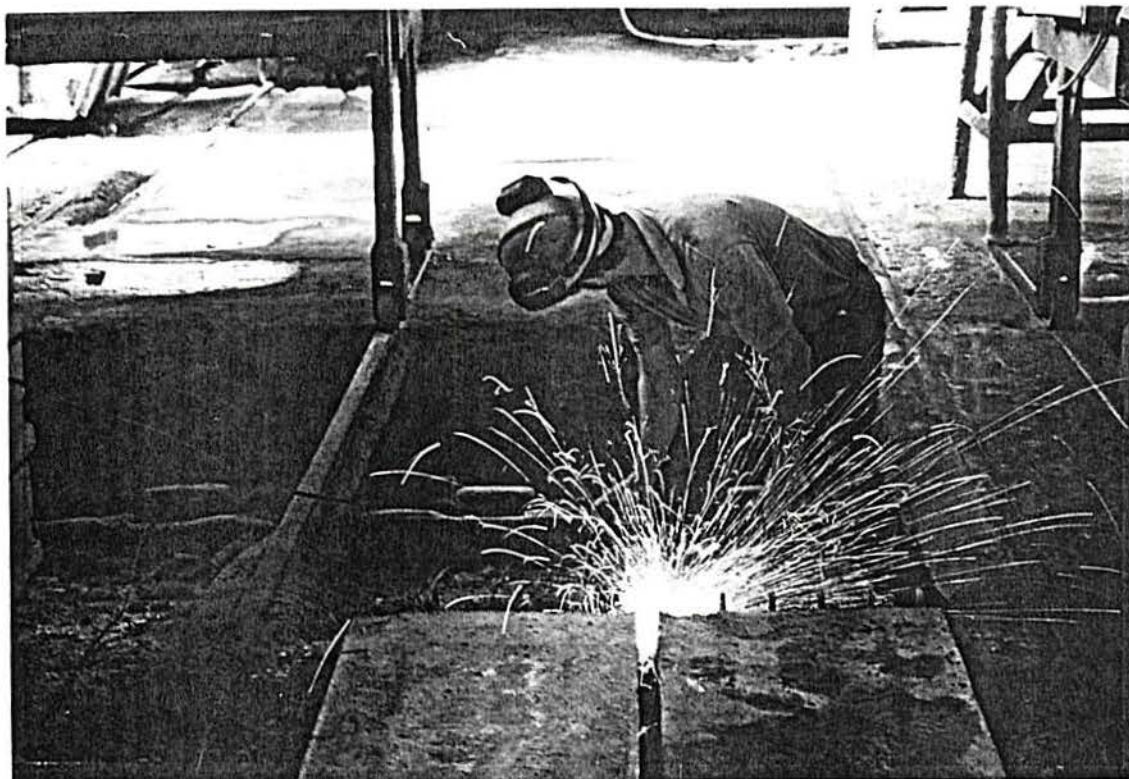


Foto 2.7 - Vista do corte das cordoalhas na outra extremidade da pista

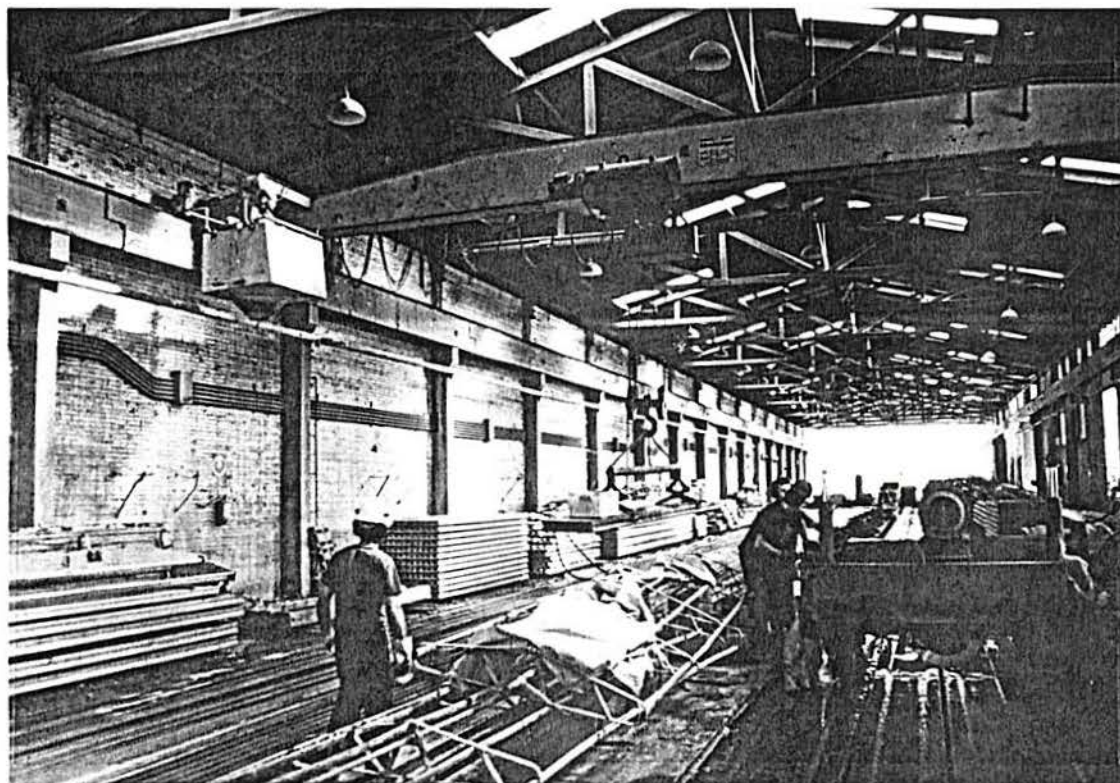


Foto 2.8 - Quando atingidos os valores de resistência do concreto iguais ou superiores a 30 MPa, as lajes são serradas, momento em que transfere-se a protensão ao concreto. A contraflecha foi medida através da leitura de defletômetros

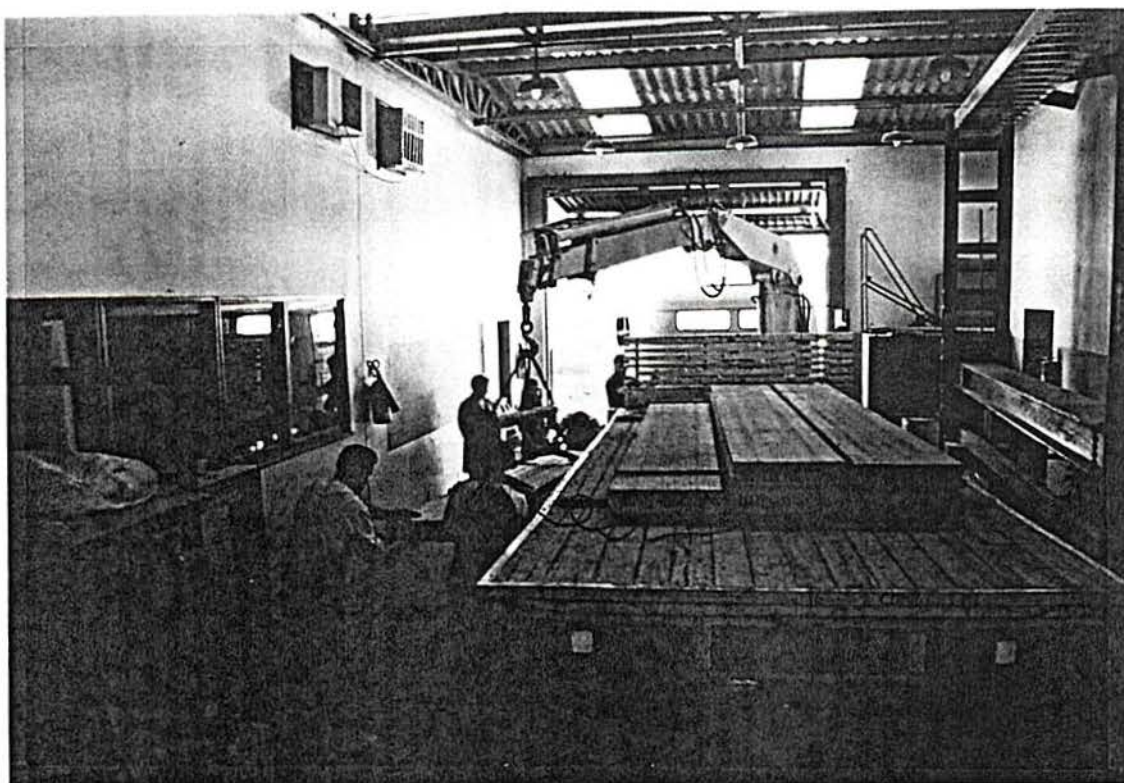


Foto 2.9 - Chegada dos protótipos no LEME e colocação sobre apoios constituídos de blocos de concreto

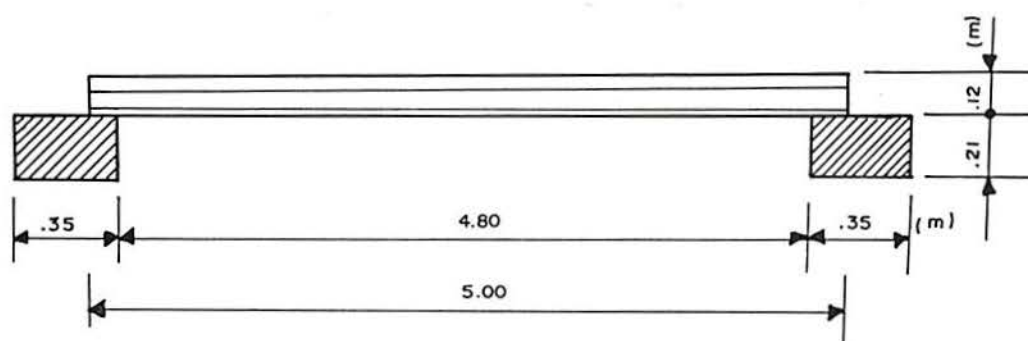


Figura 2.3 - Protótipo apoiado sobre blocos de concreto

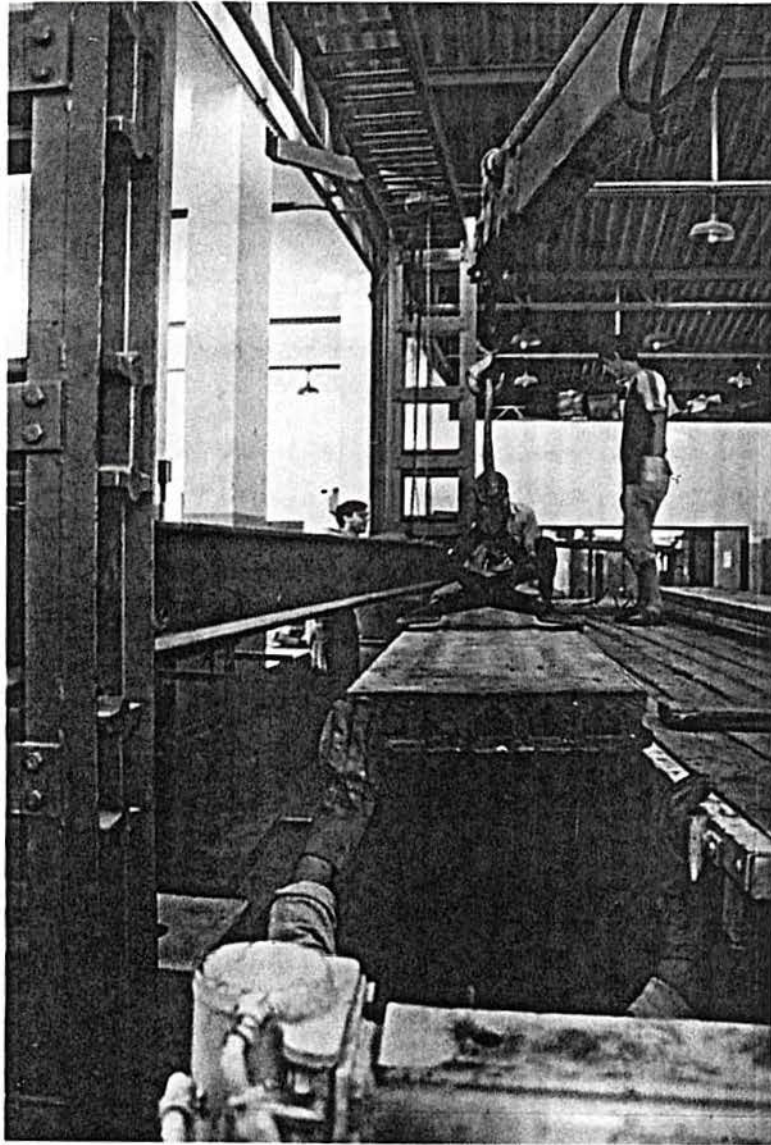


Foto 2.10 - Vista da laje B1 sendo colocada no pórtico

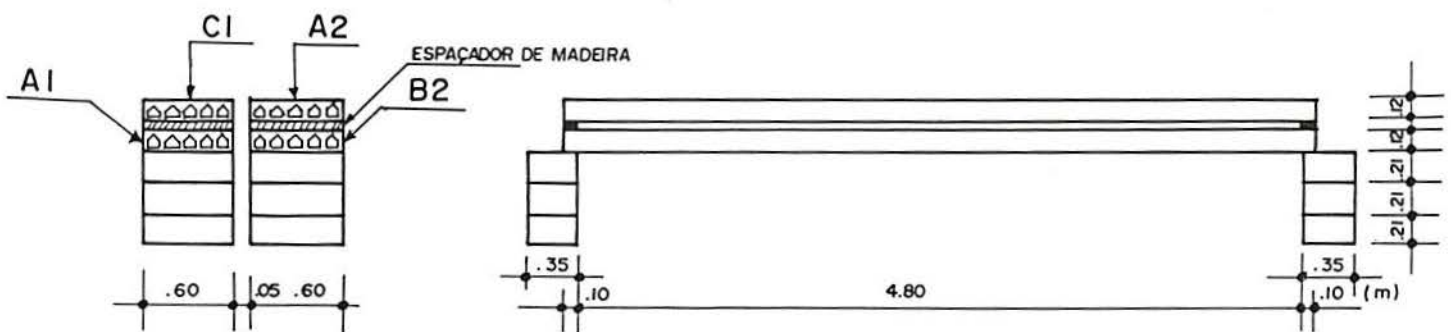


Figura 2.4 - Posicionamento dos protótipos ao serem descarregados no laboratório

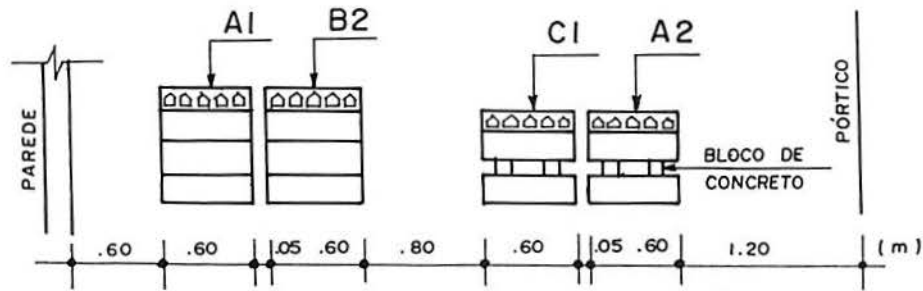


Figura 2.5 - Disposição física dos protótipos para análise do comportamento ao longo do tempo

#### 2.4 - Datas características (abril 1993 - janeiro 1994)

23/04 - Efetuada a protensão das cordoalhas sobre a pista;

- Concretagem dos seis primeiros protótipos;

24/04 - Corte e posterior transporte até o laboratório da UFRGS;

05/05 - Primeiro ensaio de carregamento instantâneo, até a ruptura, laje B1, com a idade de 12 dias e temperatura média no ambiente do laboratório de  $20,5^{\circ}\text{C}$ ;

- Carregamento com a carga de serviço distribuída, lajes A1 e B2, com a idade de 12 dias e temperatura ambiente de  $20,5^{\circ}\text{C}$ ;

12/05 - Segundo ensaio de carregamento instantâneo, até a ruptura, laje C2, com a idade de 19 dias e temperatura ambiente de  $23,5^{\circ}\text{C}$ ;

03/09 - Terceiro ensaio de carregamento instantâneo, até a ruptura, laje A2, com a idade de 133 dias, temperatura ambiente de  $14,0^{\circ}\text{C}$  e 74% de umidade relativa do ar;

10/09 - Quarto ensaio de carregamento instantâneo, até a ruptura, laje C1, com a idade de 140 dias, temperatura ambiente de  $16,0^{\circ}\text{C}$  e 62% de umidade relativa do ar;

- Descarregamento da carga de serviço, laje B2, com a idade de 140 dias (temperatura ambiente:  $16,0^{\circ}\text{C}$ ; umidade relativa do ar: 62%);



13/09 - Quinto ensaio de carregamento instantâneo, até a ruptura, laje B2, com a idade de 143 dias, temperatura ambiente de  $16,0^{\circ}\text{C}$  e 71% de umidade relativa do ar;

- Descarregamento da carga de serviço, laje A1, com a idade de 143 dias (temperatura ambiente:  $16,0^{\circ}\text{C}$  ; umidade relativa do ar: 71%);

14/09 - Sexto ensaio de carregamento instantâneo, até a ruptura, laje A1, com a idade de 144 dias, temperatura ambiente de  $17,0^{\circ}\text{C}$  e 81,5% de umidade relativa do ar;

No período decorrido entre abril e setembro, constatou-se no ambiente do laboratório a temperatura média de  $17,6^{\circ}\text{C}$  e entre maio e setembro, umidade relativa do ar de 83,5% .

06/01 - Sétimo ensaio de carregamento instantâneo, até a ruptura, laje E, temperatura ambiente de  $27^{\circ}\text{C}$ ;

07/01 - Oitavo ensaio de carregamento instantâneo, até a ruptura, laje D, temperatura ambiente de  $28^{\circ}\text{C}$ ;

Para os ensaios das lajes D e E não foi possível medir a umidade no ambiente do laboratório, mas observou-se que esta era baixa naquela ocasião.

### 3 - ENSAIOS PRELIMINARES E EQUIPAMENTOS

Neste capítulo são descritos os ensaios necessários à determinação das propriedades físicas do concreto utilizado na execução dos protótipos, os ensaios efetuados nas amostras das cordoalhas empregadas na protensão, bem como os equipamentos utilizados para a medição durante os ensaios dos protótipos.

#### 3.1 - Ensaio no concreto

No item 2.1.3 são descritos os três conjuntos de corpos de prova. Cada conjunto consiste de 10 corpos de prova de 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura e 2 corpos de prova de 15 centímetros de diâmetro e 30 centímetros de altura.

Todas as amostras foram moldadas em duas camadas e cada camada convenientemente adensada em mesa vibratória. Após, cada conjunto foi colocado em seu respectivo terço de pista de concretagem, sendo submetidos simultaneamente ao mesmo processo de cura dos protótipos.

Os seguintes ensaios foram realizados para a determinação das características do concreto:

- compressão simples;
- compressão diametral;
- módulo de deformação longitudinal.

A tabela 3.1 fornece o número de corpos de prova moldados, as dimensões e a idade do concreto na data da realização dos ensaios.

Tabela 3.1 - Corpos de prova de concreto

N <sup>o</sup> C.P. MOLDADOS	DIMENSÃO DO C.P. D*L (cm)	IDADE DO C.P. (DIAS)	N <sup>o</sup> DE C.P. ENSAIADOS		
			A COMPRESSÃO		MÓDULO DE DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL
			SIMPLES	DIAMETRAL	
06 C.P. 15 X 30	10 X 20	03	04		
	10 X 20	07	03		
	10 X 20	13	03	03	
	15 X 30	13			01
30 C.P. 10 X 20	10 X 20	28	03		
	15 X 30	28	03		
	10 X 20	144	03	04	
TOTAL PARCIAL C.P. ENS.			19	07	01
TOTAL GERAL DE C.P. ENS.			27		

### 3.1.1 - Ensaio de compressão simples

Foram ensaiados à compressão simples 16 corpos de prova cilíndricos com o diâmetro de 10 centímetros e a altura de 20 centímetros e 03 corpos de prova cilíndricos com o diâmetro de 15 centímetros e a altura de 30 centímetros, em diferentes idades.

Na tabela 3.2 encontram-se os resultados obtidos nos ensaios.

Os valores médios das resistências à compressão simples estão plotados no gráfico 3.1 em função da idade do concreto.

Para os protótipos, considerou-se para o cálculo da resistência característica à compressão simples o valor da resistência dos corpos de prova rompidos no terceiro dia, já que os primeiros ensaios no LEME foram realizados nesta data e também porque o processo de cura acelerada, mediante vapor supersaturado confere às lajes, imediatamente após o corte, a resistência necessária à utilização.

O valor característico da resistência  $f_{ck}$  do concreto, conforme a norma NBR-6118 (1982), é dado por:

$$f_{ck} = f_{cj} - 1.65 \delta \quad (3.1)$$

admitindo-se uma distribuição normal dos resultados.

Da tabela 3.2 , considerando-se resultados à compressão simples obtidos de ensaios no terceiro dia, depreende-se que:

$$f_{cj} = 38,34 \text{ MPa}$$

$$\delta = 3,882$$

$$f_{ck} = 31,93 \text{ MPa}$$

Tabela 3.2 - Resultados dos ensaios à compressão simples

IDADE (DIAS)	CONJUNTO A QUE PERTENCE O C.P.	DIMENSÃO DO C.P. D*L (cm)	RESISTÊNCIA À RUPTURA (MPa)
3	A	10 x 20	32,87
3	A		42,04
3	B		39,36
3	C		39,08
7	A	10 x 20	43,45
7	B		47,40
7	C		48,11
13	A	10 x 20	54,88
13	B		53,75
13	C		51,78
28	A	10 x 20	50,79
28	B		50,51
28	C		58,27
28	A	15 x 30	45,13
28	B		41,51
28	C		41,68
144	A	10 x 20	65,32
144	B		61,80
144	C		64,48

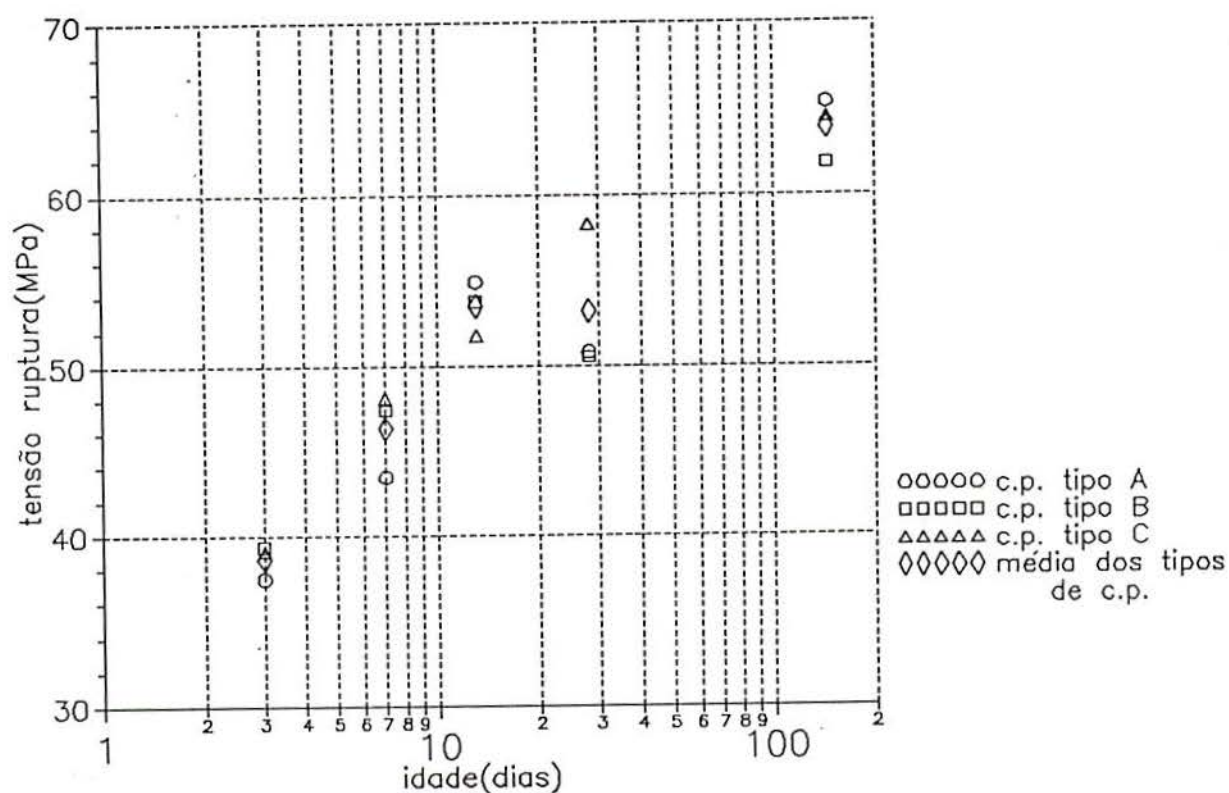


Gráfico 3.1 - Valores médios das resistências à compressão simples

### 3.1.2 - Ensaio de compressão diametral

O método do professor Lobo Carneiro consiste na aplicação de forças de compressão em um corpo de prova cilíndrico, segundo duas geratrizes, diametralmente opostas (fig. 3.1, fotos 3.1 e 3.2). A distribuição das tensões principais no plano diametral se dá de forma que para quase toda a seção existe uma tensão constante de tração normal ao plano da seção (Petrucci, 1971), cujo valor é:

$$\sigma_t = 0,85 \frac{2 P}{\pi D L} \quad (3.2)$$

onde  $P$  é a carga linear aplicada segundo uma geratriz,  $D$  o diâmetro,  $L$  o comprimento do corpo de prova e  $0,85$  é um coeficiente corretivo aplicado à expressão para compensar a existência de compressão, próxima aos bordos carregados, na direção normal à do carregamento (Silva, 1986).

Foram ensaiados à compressão diametral 07 corpos de prova cilíndricos com o diâmetro de 10 centímetros e o comprimento de 20 centímetros, em duas idades diferentes (tabela 3.1). Os resultados obtidos encontram-se na tabela 3.3.

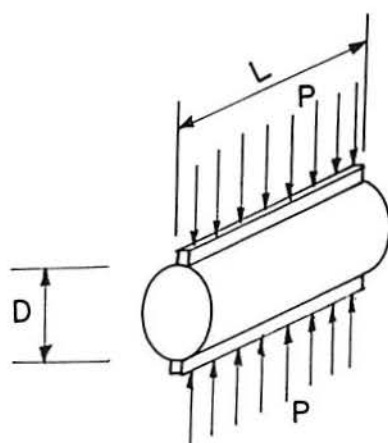


Figura 3.1 - Ensaio à compressão diametral

Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios à compressão diametral

IDADE (DIAS)	TIPO DO C.P.	CARGA DE RUPTURA P ( KN )	TENSÃO DE TRAÇÃO NA RUPTURA $\sigma_t$ ( MPa )
13	A	128,0	3,84
	B	118,0	3,54
	C	120,0	3,60
144	A	117,0	3,51
	A	108,0	3,24
	B	134,5	4,03
	C	105,0	3,15

### 3.1.3 - Determinação do módulo de deformação longitudinal

Para a obtenção da curva tensão-deformação e determinação do módulo de deformação longitudinal do concreto empregado nos protótipos, foi ensaiado um corpo de prova cilíndrico de 15 centímetros de diâmetro e 30 centímetros de altura, do tipo B (ver item 2.1.3), moldado quando da concretagem dos protótipos, juntamente com os demais, nas condições referidas no item 3.1.

O ensaio, de curta duração, consistiu na aplicação de uma carga axial, crescente, sobre o corpo de prova instrumentado com "strain gages", conforme mostra a figura 3.2.

A carga foi aplicada através de uma prensa, que permitia estabelecer os níveis de carregamento para os quais realizou-se a leitura das deformações específicas.

No ensaio do corpo de prova tipo B não foi atingida a ruptura, pois o mesmo seria utilizado como compensador de temperatura e referencial no ensaio de longa duração. Neste caso considerou-se o módulo inicial ( $E_{co}$ ), também chamado de módulo de deformação na origem (Jimenez Montoya et al, 1973), correspondente à tangente ao diagrama ( $\sigma, \epsilon$ ) na origem do sistema de coordenadas. Segundo Fusco (1976), admite-se que seja aproximadamente

$$E_c = 0,9 E_{co} \quad (3.3)$$

O gráfico 3.2 mostra os resultados obtidos neste ensaio.

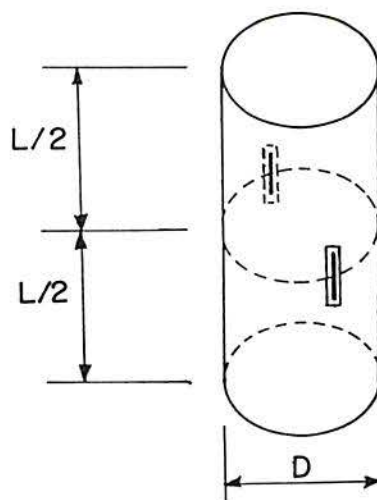


Figura 3.2 - Corpo de prova para o ensaio do módulo de deformação longitudinal

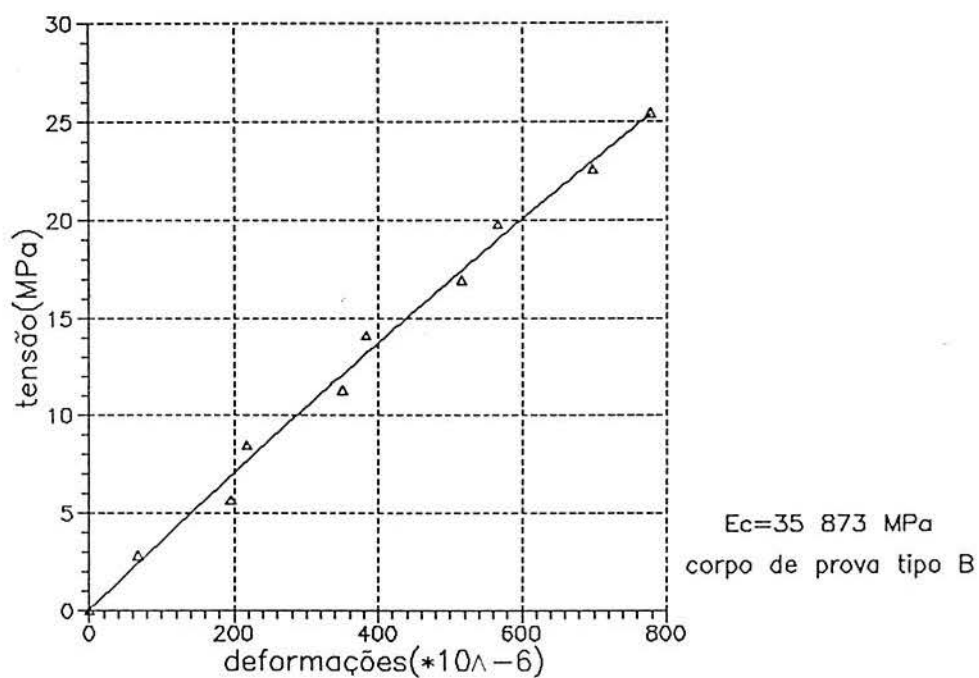


Gráfico 3.2 - Curva tensão-deformação do concreto aos treze dias de idade

### 3.2 - Ensaio no aço

#### 3.2.1 - Ensaio de tração simples

Foram ensaiadas 2 amostras das cordoalhas utilizadas nos protótipos, com o limite de resistência à tração  $f_{ptk} = 1800$  MPa, cordoalhas de três fios e relaxação normal, de diâmetro nominal  $\phi = 3$  mm.

Os ensaios foram realizados de acordo com as especificações da NBR 6349(Out. 1982).

Nos ensaios de tração das cordoalhas de aço foram obtidos os valores constantes na tabela 3.4 e a média dos valores resultou:

$$\sigma_r = 1886,5 \text{ MPa}$$

$$E_s = 207\,990 \text{ MPa}$$

onde  $\sigma_r$  é a tensão de ruptura à tração e  $E_s$  o módulo de deformação longitudinal.

Os gráficos 3.3 e 3.4 apresentam as curvas carga-alongamento obtidas experimentalmente para as cordoalhas ensaiadas e o gráfico 3.5 compara as curvas experimentais com a curva teórica fornecida pela Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira (1982).

Tabela 3.4 - Resultados dos ensaios nas cordoalhas de aço.

N <sup>o</sup> DA AMOSTRA	DESIGNAÇÃO	DIÂMETRO NOMINAL ( $\phi$ ) DA CORDOALHA (mm)	CARGA DE RUPTURA $F_m$ (KN).10 <sup>-2</sup>	CARGA A 1% DE ALONGAMENTO $F_1$ (KN).10 <sup>-2</sup>
1	CP 180 RN 3X3	3 X 3,0	4050	3600
2			3950	3600



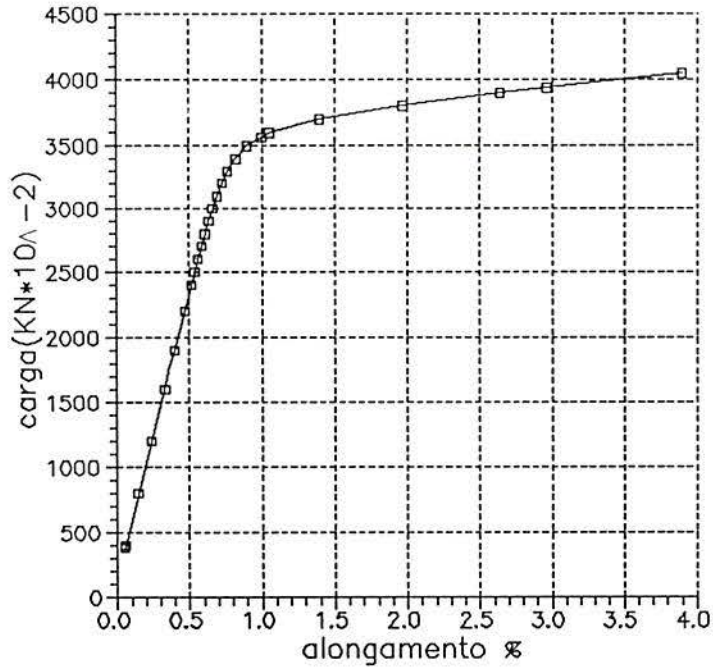


Gráfico 3.3 - Curva carga-alongamento da cordoalha CP 180 RN 3X3 - Amostra 1

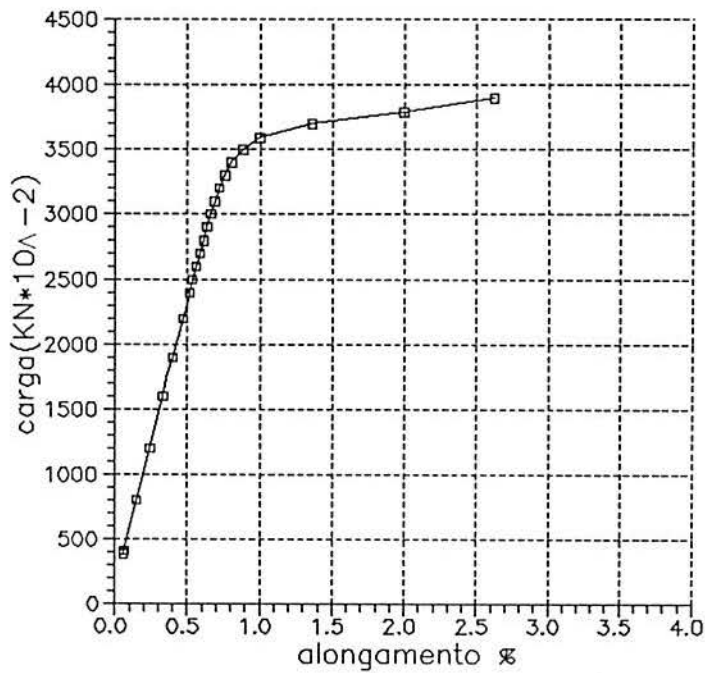


Gráfico 3.4 - Curva carga-alongamento da cordoalha CP 180 RN 3X3 - Amostra 2

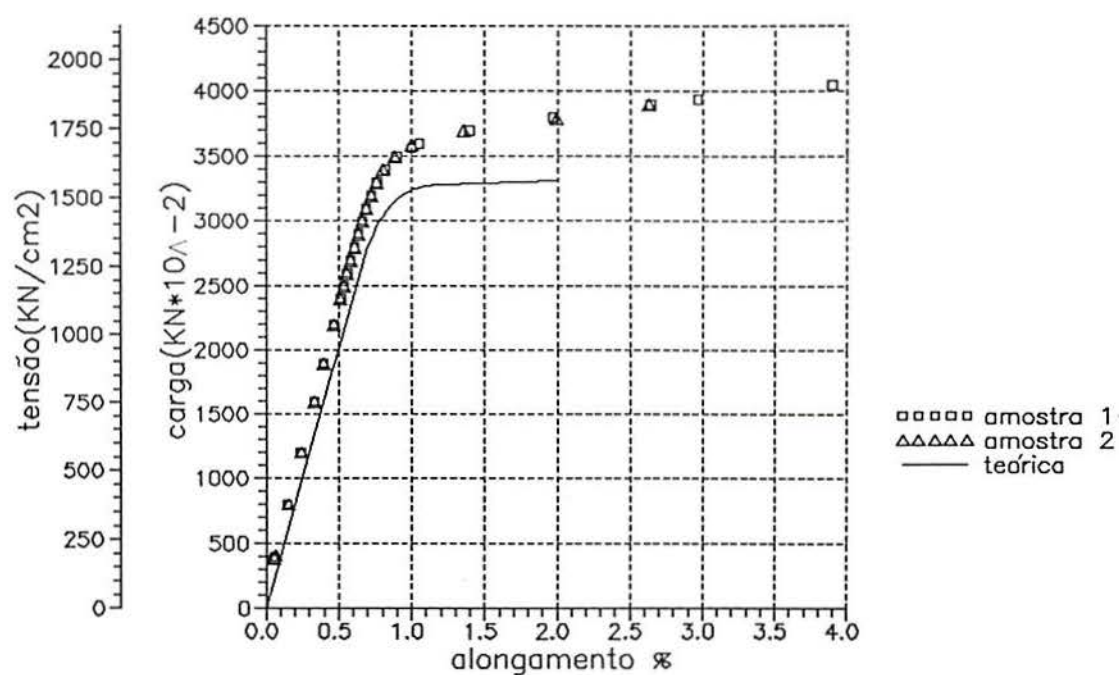


Gráfico 3.5 - Comparação dos resultados experimentais com a curva teórica dada pela Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira

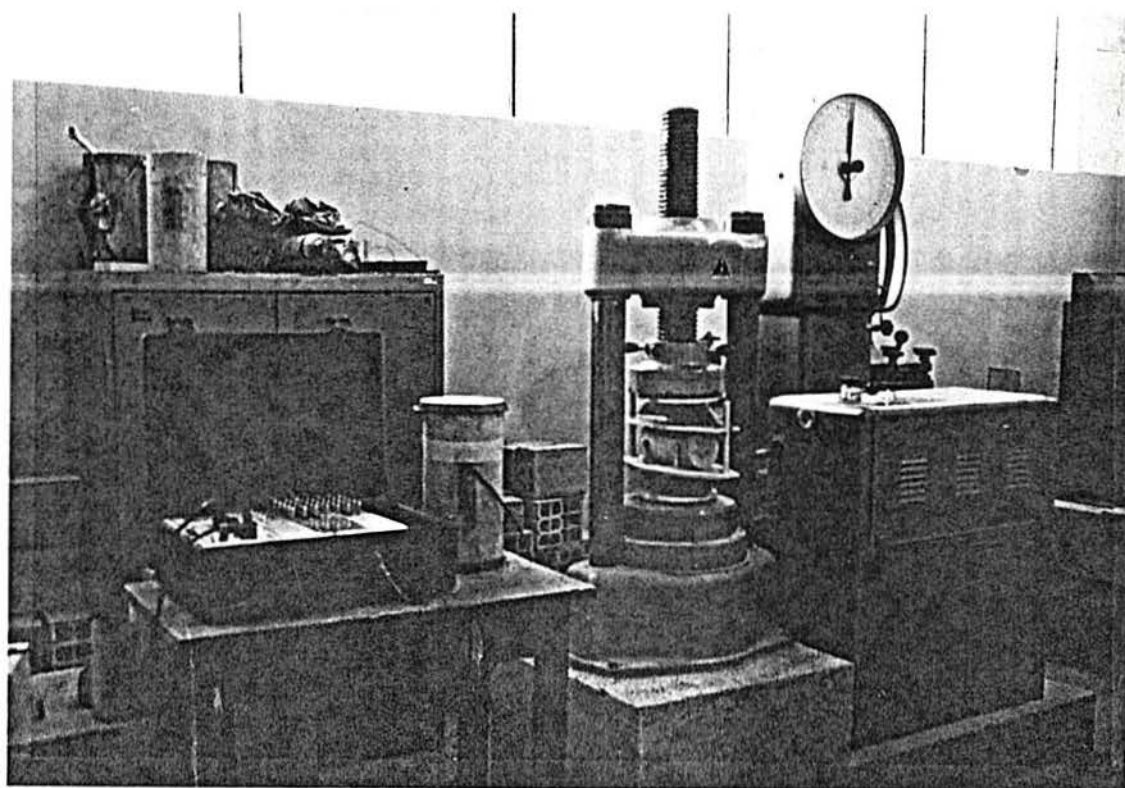


Foto 3.1 - Ensaio à compressão diametral e corpo de prova pronto para o ensaio do módulo de deformação longitudinal



Foto 3.2 - Corpos de prova rompidos à compressão diametral e compressão simples

### 3.3 - Equipamentos e demais aparelhagens

Os equipamentos utilizados nos ensaios dos protótipos e nos ensaios auxiliares encontram-se descritos nos itens abaixo.

#### 3.3.1 - Defletômetros

Foram utilizados defletômetros mecânicos, os quais permitiram a leitura dos deslocamentos verticais com precisão de 0,01 mm. O posicionamento destes aparelhos será descrito no capítulo 04 (ver fig. 4.1 e 4.2) e as características são mostradas na tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Relação dos defletômetros utilizados

MARCA	CURSO MÁXIMO (mm)	QUANTIDADE
MYTUTOYO	50	13
MYTUTOYO	30	05
STARRET	30	04

### 3.3.2 - Extensômetros elétricos

Os extensômetros elétricos (strain gages) utilizados foram colados conforme procedimento descrito por Klein (1975).

Estes permitiram obter os valores das deformações nos protótipos e nos corpos de prova, quando ensaiados para a determinação do módulo de deformação longitudinal.

Todos os extensômetros elétricos utilizados foram fabricados pela Kyowa Electronic Instruments Co. Ltda. As características estão expressas na tabela 3.6 e o posicionamento no capítulo 04, fig. 4.3.

Tabela 3.6 - Características dos strain gages

	NOS PROTÓTIPOS E C.P. REFERENCIAL/COMPENSADOR	NO C.P. P/ ENSAIO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO
TIPO	KFC-10-C1-11	KF-70-A1-11
COMPR. DA GRADE	10 mm	68 mm
RESISTÊNCIA	120,0 <sup>±</sup> 0,3Ω	120,0 <sup>±</sup> 0,3Ω
GAGE FACTOR	2,12 <sup>±</sup> 1,0%	2,10 <sup>±</sup> 1,0%
QUANTIDADE	18	02

### 3.3.3 - Indicadores de deformação

Para a leitura das deformações acusadas nos extensômetros elétricos dos protótipos, durante os ensaios de longa duração, utilizou-se um indicador de deformações (strain indicator) e uma unidade de balanceamento e mudança (switching and balancing units), ambos de fabricação da BLH Electronic Inc., com as seguintes características:

- indicador de deformações digital portátil, modelo 1200, com leitura em micropolegada por polegada;
- unidade de balanceamento e mudança modelo 1225, com 10 canais.

Para os ensaios de carregamento instantâneo e os ensaios de determinação do módulo de deformação longitudinal nos corpos de prova, utilizou-se um indicador de deformações portátil, de fabricação da SODMEX, ponte de extensometria M.D.C.-5 . O sistema de calibração permitiu a leitura digital em  $\mu\text{m}/\text{m}$ , com uma resolução de  $\pm 1 \mu\text{m}/\text{m}$  para  $10^{-6}$ . Através de comutação, o M.D.C.-5 pode receber 5 pontos de medição.

### 3.3.4 - Elongômetro

Com este aparelho pode-se obter indiretamente a leitura das deformações, medindo-se o alongamento ( $\Delta l$ ) ocorrido entre dois pontos distanciados de um valor inicial conhecido (1).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{\Delta} \quad (3.4)$$

O elongômetro SOILTEST, INC. CT-171 M foi utilizado para a medida das deformações nos protótipos (foto 3.3). Neste caso, foram coladas com araldite de secagem rápida, pastilhas de alumínio, diretamente no concreto. Na colagem das pastilhas utilizou-se um gabarito, o qual permitiu manter a mesma distância inicial entre os dois pontos, em todas as operações, e também tomar pontos equidistantes do centro dos protótipos, na direção longitudinal. Procurou-se medir as deformações na face superior e na face inferior de cada protótipo. Nos protótipos A1 e B2, devido ao carregamento com sacos de areia distribuídos em toda a face superior destas lajes, impossibilitando o uso do aparelho nesta região, a deformação superior foi estimada através da leitura entre dois pontos situados na face lateral, o mais próximo possível da face superior. (foto 4.10)

### 3.3.5 - Equipamentos auxiliares

Na preparação e nos ensaios, tanto dos protótipos quanto dos corpos de prova, se fez necessária a utilização de outros equipamentos, aqui denominados auxiliares e que estão abaixo relacionados:

- vibradores BOSCH, 2 de alta frequência e 2 de frequência normal;

- tensadora PAUL H1D (utilizada na protensão das cordoalhas);
- bomba hidráulica ENERPAC, ph 80, até 10 ton;
- célula de carga, capacidade 20 ton e leitora digital;
- prensa WPM, até 60 ton, Leipzig;
- prensa CPL HYTRONIC, até 90 ton;
- prensa Höchstkraft, 10 ton;
- voltímetro CIE 7005 MULTIMETER digital;
- balança Saturno SB 5000, digital, capacidade 100 kgf;
- balança Marte Itasul, modelo A4/40K, carga máxima 40 kgf;
- bases de madeira para defletômetros, em número de duas;
- bases magnéticas Starret 657AA, em número de oito;
- régua invar 100 cm;
- fissurômetro L.A.Falcão Bauer (régua comparadora);
- paquímetro;
- outros.

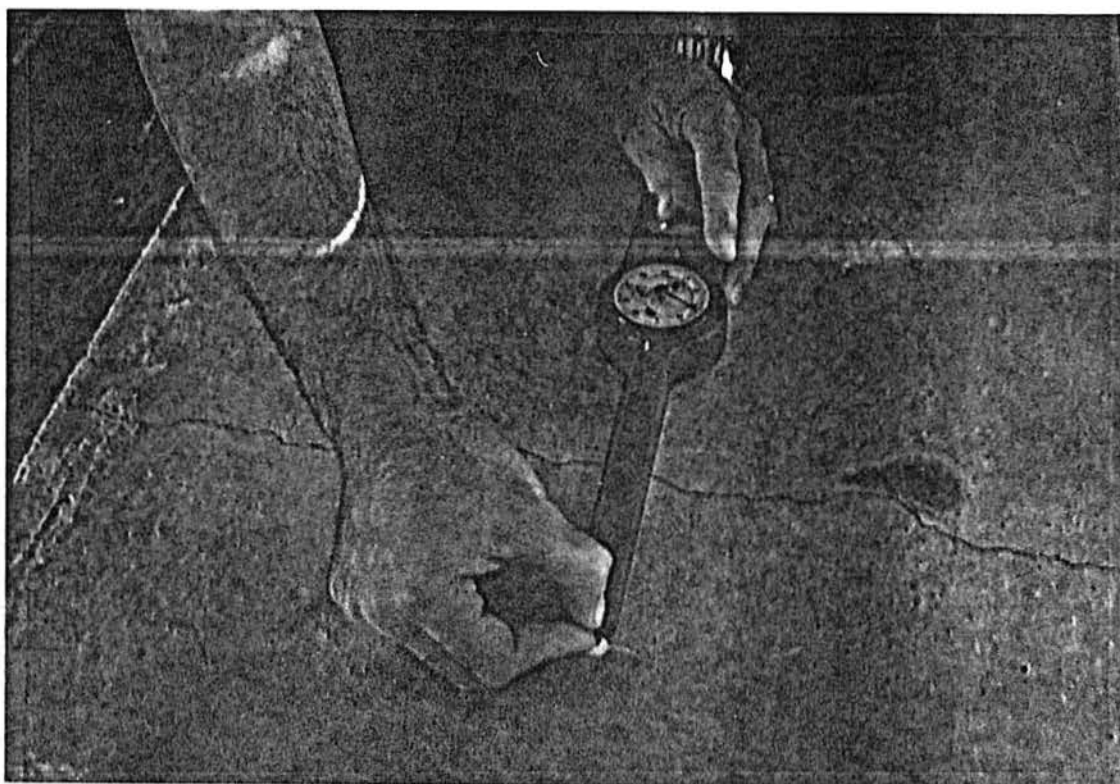


Foto 3.3 - Vista do elongômetro e fissura provocada por retração na secagem do concreto

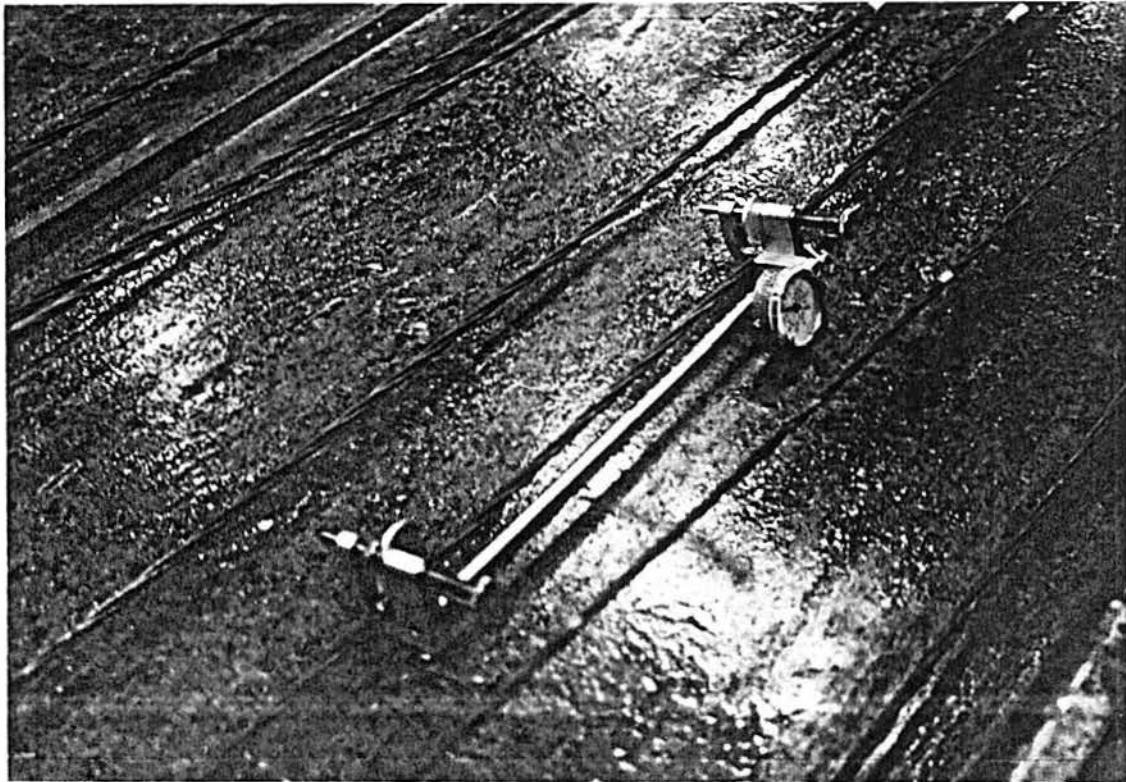


Foto 3.4 - Extensômetro mecânico para medida do alongamento da cordoalha devido à protensão

## 4 - ENSAIOS NOS PROTÓTIPOS

Neste capítulo são descritos os ensaios nos protótipos e os sistemas de carregamentos. Os resultados e a análise destes encontram-se no capítulo 6.

Para fins de apresentação, os ensaios nos protótipos foram divididos em dois grupos principais:

4.1 - Ensaio de carregamento instantâneo (curta duração)

4.1.1 - com carga concentrada até a ruptura

4.1.2 - com carga de serviço distribuída

4.2 - Ensaio de carregamento permanente (longa duração)

4.2.1 - com carga de serviço distribuída

4.2.2 - somente peso próprio

A tabela 4.1 classifica os ensaios nos protótipos segundo estes grupos principais.

É importante ressaltar que em todos os ensaios procedidos os efeitos devidos ao peso próprio dos protótipos, tais como deslocamentos e deformações, não são considerados, uma vez que estes já atuam nas peças quando de sua instrumentação, nas análises numéricas, todavia, esta parcela de carga é necessariamente considerada pois contribui para a determinação das tensões e deformações ocorridas tanto no concreto como nas armaduras.

A seqüência cronológica dos ensaios a que foram submetidos os protótipos encontram-se no item 2.4.

4.1 - Ensaio de carregamento instantâneo (curta duração)

4.1.1 - Com carga concentrada até a ruptura

Estes ensaios foram realizados em etapas iniciais de carregamento de 1,6 KN. A transmissão do carregamento ao protótipo deu-se através de dois perfis metálicos colocados no sentido transversal, um de cada lado, distando 30 cm do centro do protótipo. Cada perfil recebeu metade do carregamento aplicado pelo macaco hidráulico na célula de carga (foto 4.1 e



figura 4.4). A medida que as deformações foram aumentando e a partir do início da abertura de fissuras visíveis a olho nu, os incrementos de carga passaram a ser os possíveis e convenientes no instante do ensaio.

Em cada etapa de carregamento foram medidos os deslocamentos verticais no protótipo, através da leitura dos defletômetros e as deformações através dos strain-gages e alongômetro.

As posições de tomada destas leituras nos protótipos são mostradas nas figuras 4.1 e 4.3.

Na fotos 4.1 e 4.2 vemos os dispositivos utilizados para o ensaio de carregamento instantâneo, até a ruptura.

Todos os protótipos foram submetidos ao ensaio de carregamento instantâneo, até a ruptura (tabela 4.1). Este ensaio está ilustrado nas fotos 4.3 a 4.8.

#### 4.1.2 - Com carga de serviço distribuída

Este ensaio foi realizado em dois protótipos, em três etapas de carregamento, sendo a primeira e a segunda de 0,50 KN/m cada e a terceira de 0,65 KN/m. A carga a ser aplicada era constituída de sacos de areia (foto 4.9). Os sacos de areia em menor tamanho observados na foto 4.11 representam unicamente a correção da carga, devido à perda de carga ocorrida desde o dia em que os sacos maiores foram cheios até o dia do ensaio de carregamento, pela ação da umidade ambiente.

Após cada etapa de carregamento foram medidos os deslocamentos verticais no protótipo através da leitura dos defletômetros, as deformações através dos strain-gages e alongômetro (foto 4.10). As posições de tomada destas leituras nos protótipos são mostradas nas figuras 4.2 e 4.3.

Após os ensaios de longa duração a que foram submetidos estes protótipos (aproximadamente quatro meses), os mesmos foram descarregados, também em três etapas, de 0,65 KN/m a primeira e de 0,50 KN/m a segunda e a terceira, tendo sido lidas, da mesma forma, ao final de cada etapa as deformações verticais.

## 4.2 - Ensaaios ao longo do tempo

### 4.2.1 - Com carga de serviço distribuída

Os protótipos A1 e B2, após o ensaio de carregamento instantâneo, com carga de serviço distribuída (item 4.1.2), permaneceram carregados por um período aproximado de quatro meses, sendo diariamente monitorados através da leitura dos deslocamentos verticais e deformações (defletômetros, strain-gages e elongômetro) nas posições identificadas nas figuras 4.2 e 4.3), além do acompanhamento da temperatura e umidade ocorridas no LEME neste período. (foto 4.12)

### 4.2.2 - Somente peso próprio

Tal como os protótipos A1 e B2, os protótipos C1 e A2 também foram monitorados por um período aproximado de quatro meses e efetuadas as correspondentes leituras nos equipamentos com que foram instrumentados, com a diferença de que os protótipos C1 e A2, até o final deste período, não receberam outro carregamento senão o correspondente ao peso próprio. (foto 4.12)

Tabela 4.1 - Classificação dos ensaios nos protótipos

ENSAIO	PROTÓTIPO	IDADE DIAS	CARACTERÍSTICAS	GRUPO DO ENSAIO
01	B1	12	carga concentrada até a ruptura	4.1
02	A1	12	carga de serviço, distribuída	4.1
03	B2	12	carga de serviço, distribuída	4.1
04	C2	19	carga concentrada até a ruptura	4.1
05	B2	12-140	carga de serviço, distribuída	4.2
06	A1	12-143	carga de serviço, distribuída	4.2
07	A2	12-126	somente peso próprio	4.2
08	C1	12-136	somente peso próprio	4.2
09	A2	133	carga concentrada até a ruptura	4.1
10	C1	140	carga concentrada até a ruptura	4.1
11	B2	140	descarregamento da carga de serviço	4.1
12	A1	143	descarregamento da carga de serviço	4.1
13	B2	143	carga concentrada até a ruptura	4.1
14	A1	144	carga concentrada até a ruptura	4.1
15	D	—	carga concentrada até a ruptura	4.1
16	E	—	carga concentrada até a ruptura	4.1

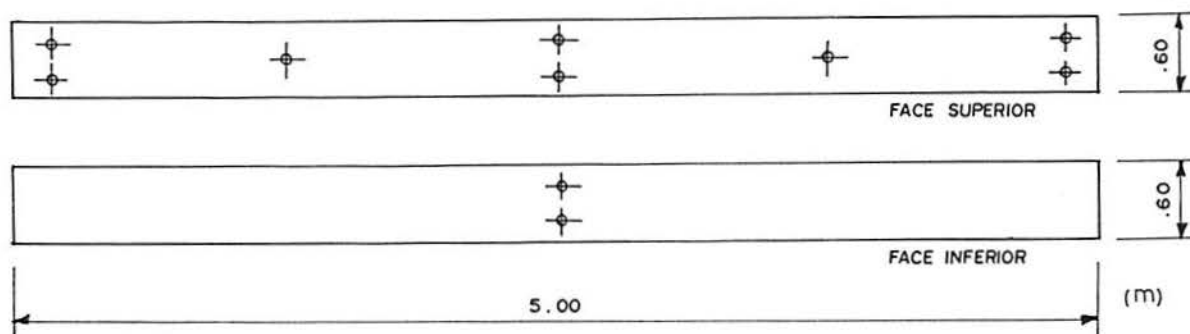


Figura 4.1 - Posição dos defletômetros para os ensaios de carregamento instantâneo, até a ruptura

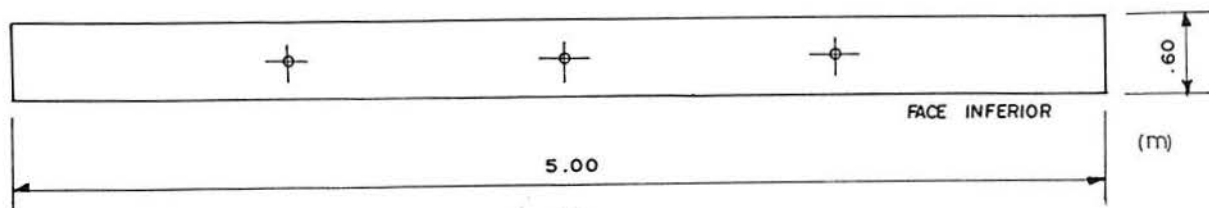


Figura 4.2 - Posição dos defletômetros para os ensaios de longa duração e para os ensaios de carregamento instantâneo, com carga de serviço

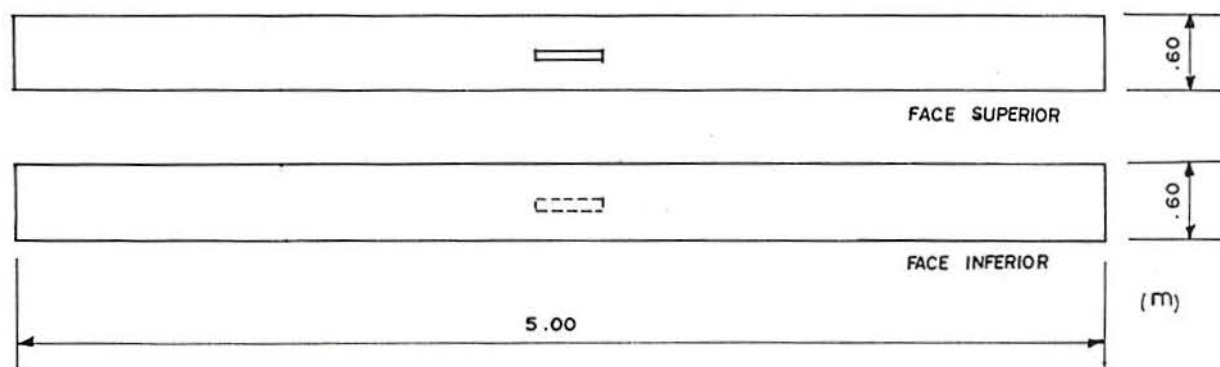


Figura 4.3 - Posição dos strain gages nos protótipos

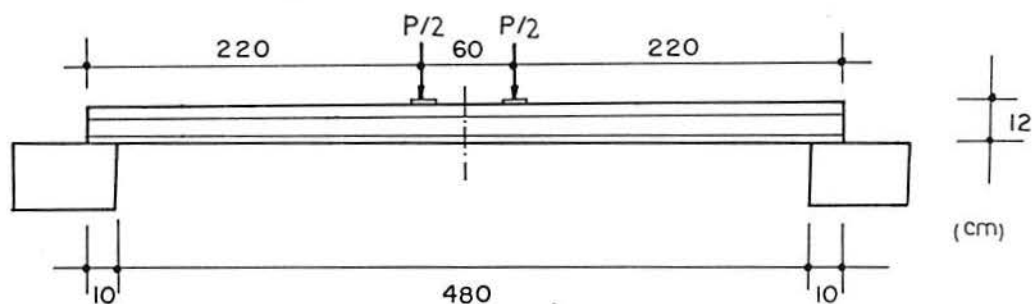


Figura 4.4 - Posição da aplicação das cargas nos protótipos durante os ensaios de carregamento instantâneo, até a ruptura

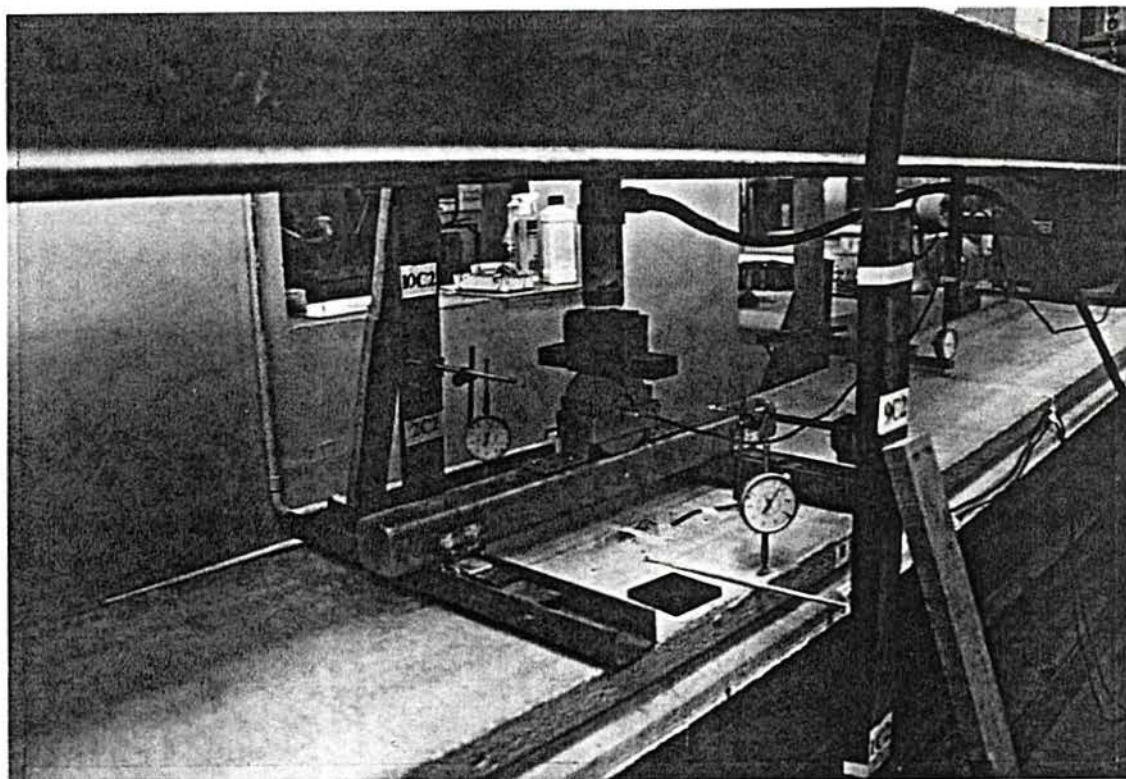


Foto 4.1 - Vista da estrutura utilizada para o ensaio de carregamento instantâneo, até a ruptura e da célula de carga

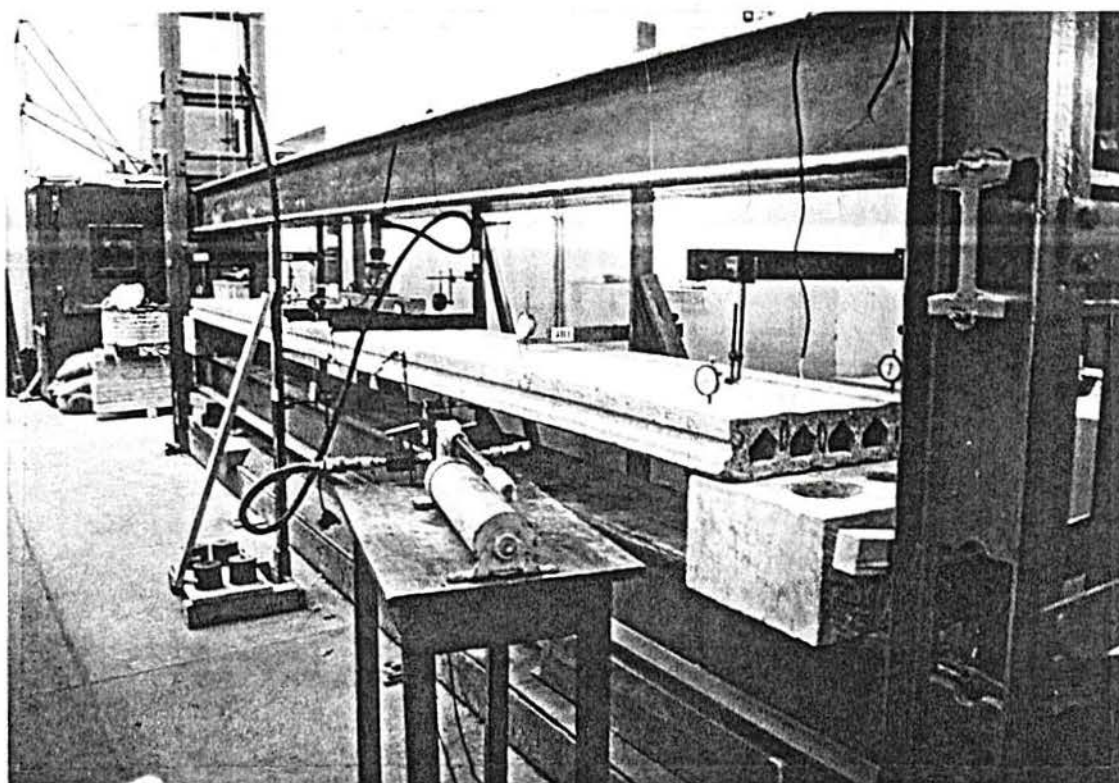


Foto 4.2 - Vista do protótipo B1, instrumentado para o ensaio de carregamento até a ruptura

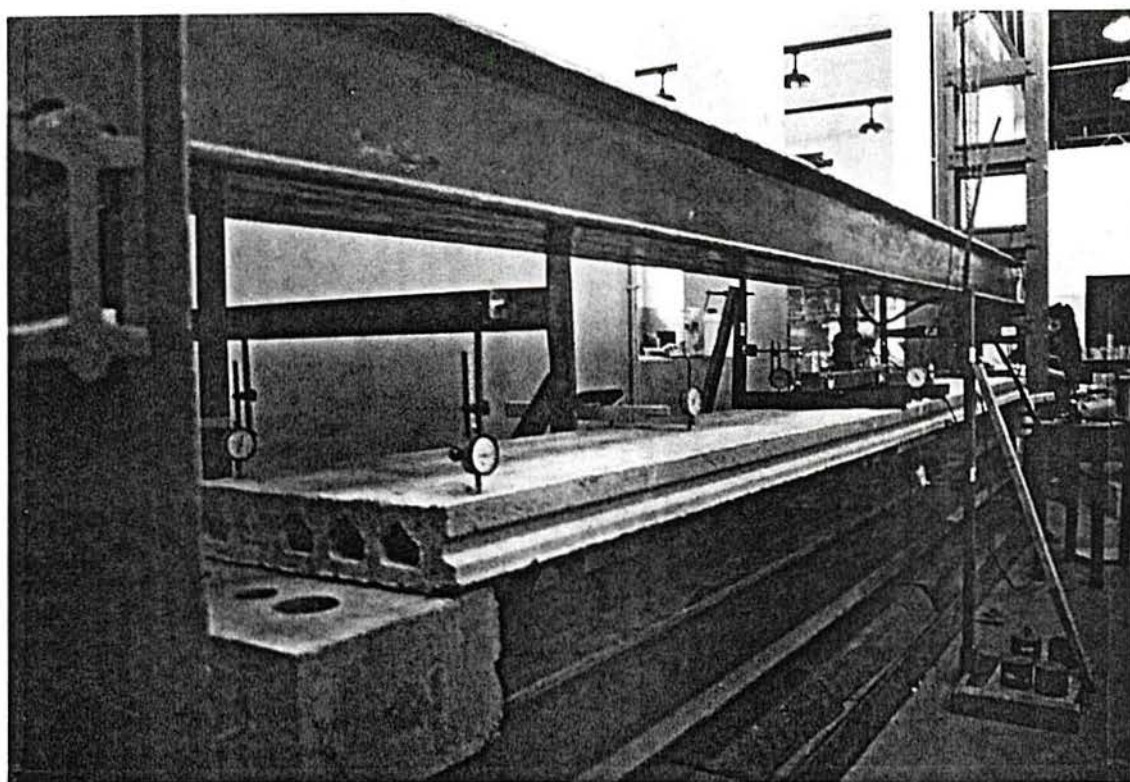


Foto 4.3 - Vista do protótipo B1, anterior ao carregamento

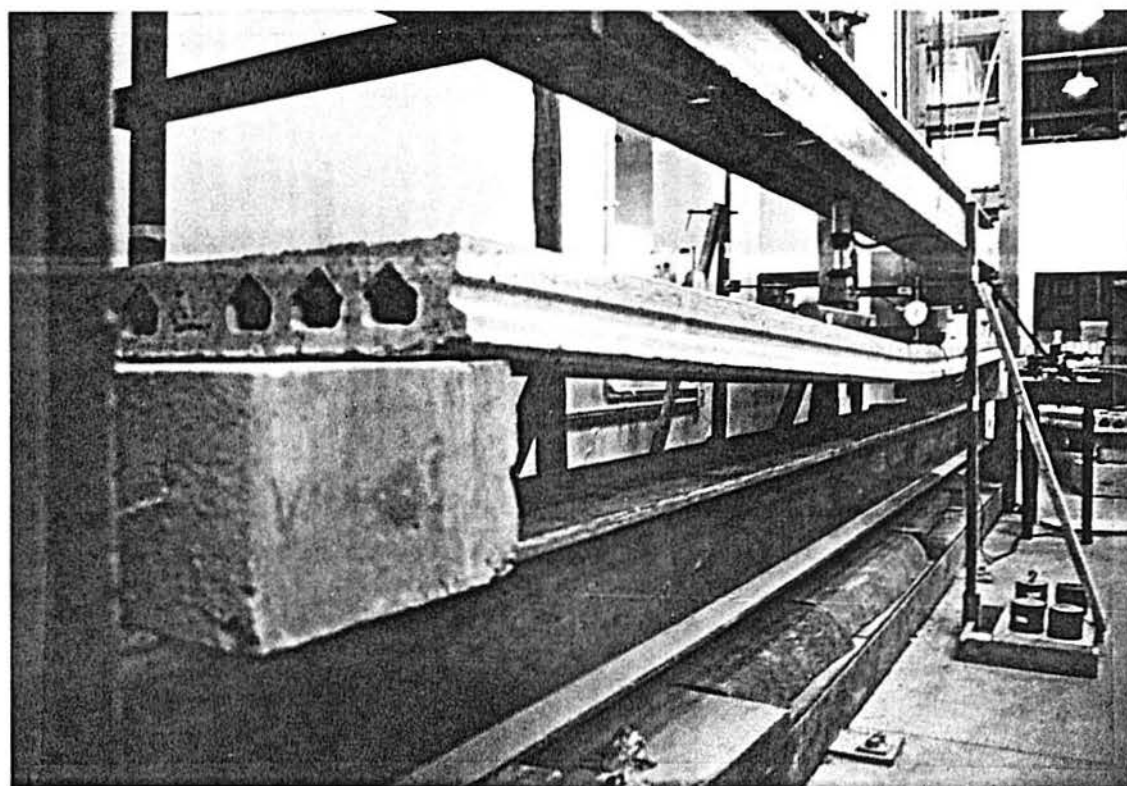


Foto 4.4 - Vista do protótipo B1, durante o ensaio de carregamento até a ruptura

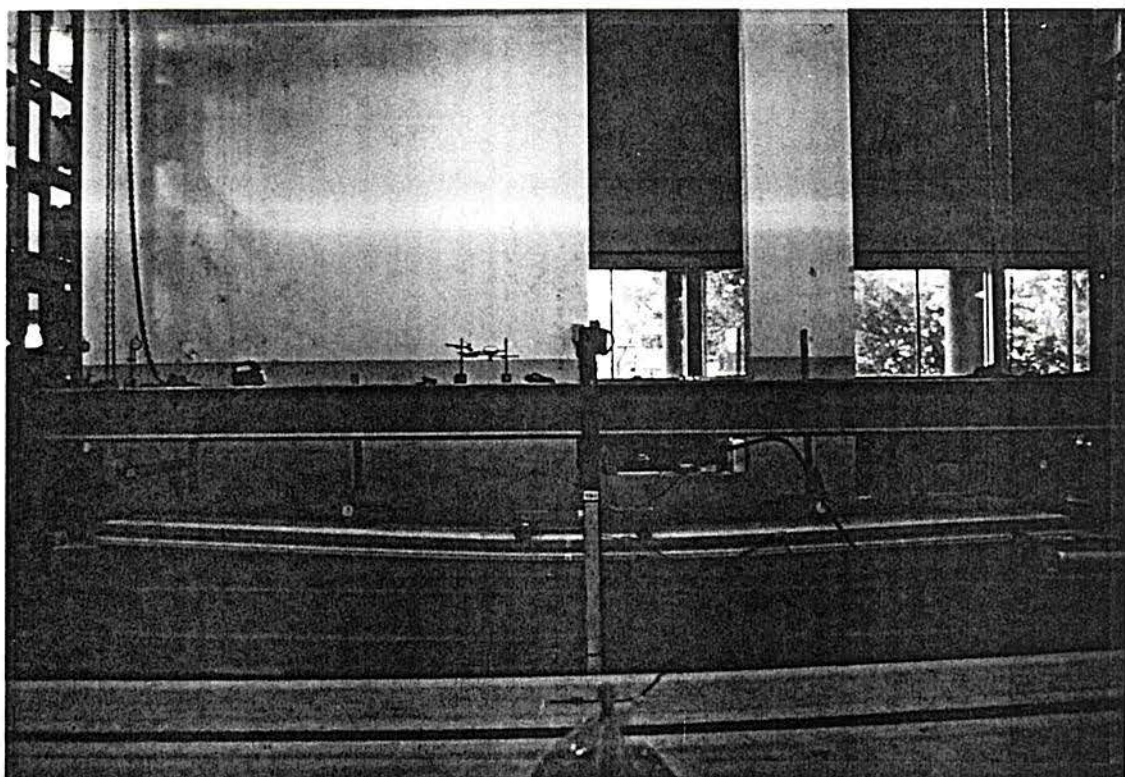


Foto 4.5 - Vista do protótipo B1 durante o ensaio, carregamento crescente

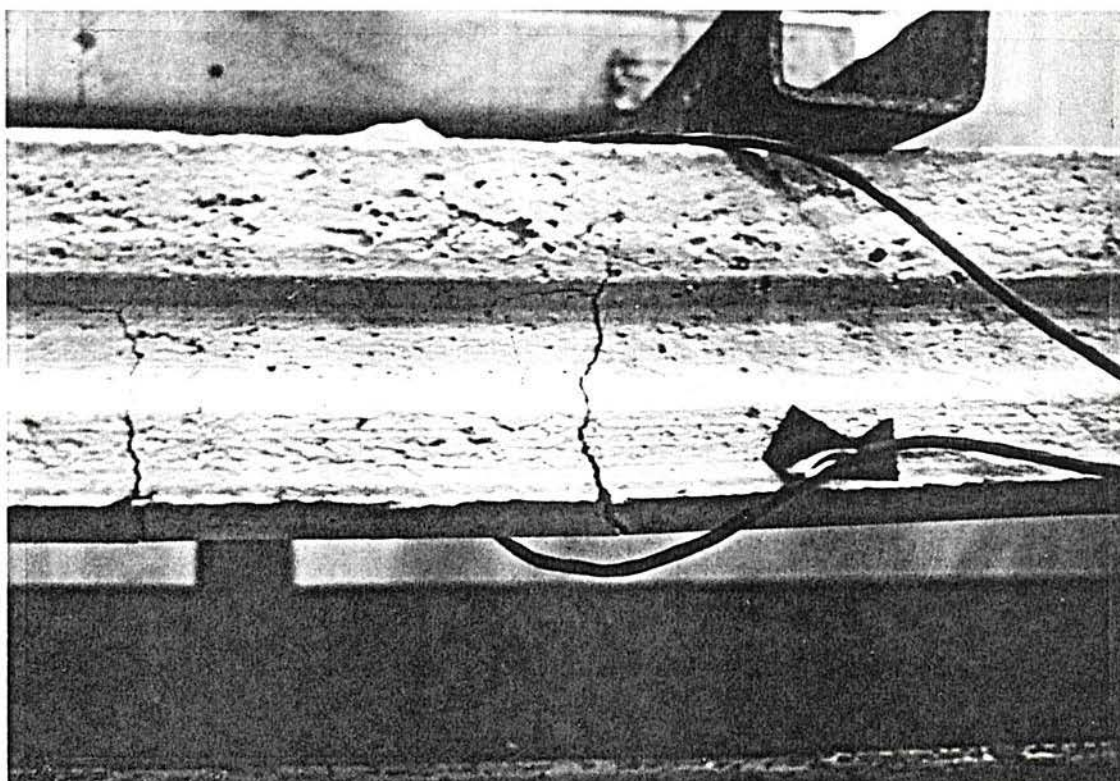


Foto 4.6 - Vista das fissuras provocadas pelo carregamento instantâneo no protótipo B1, região central

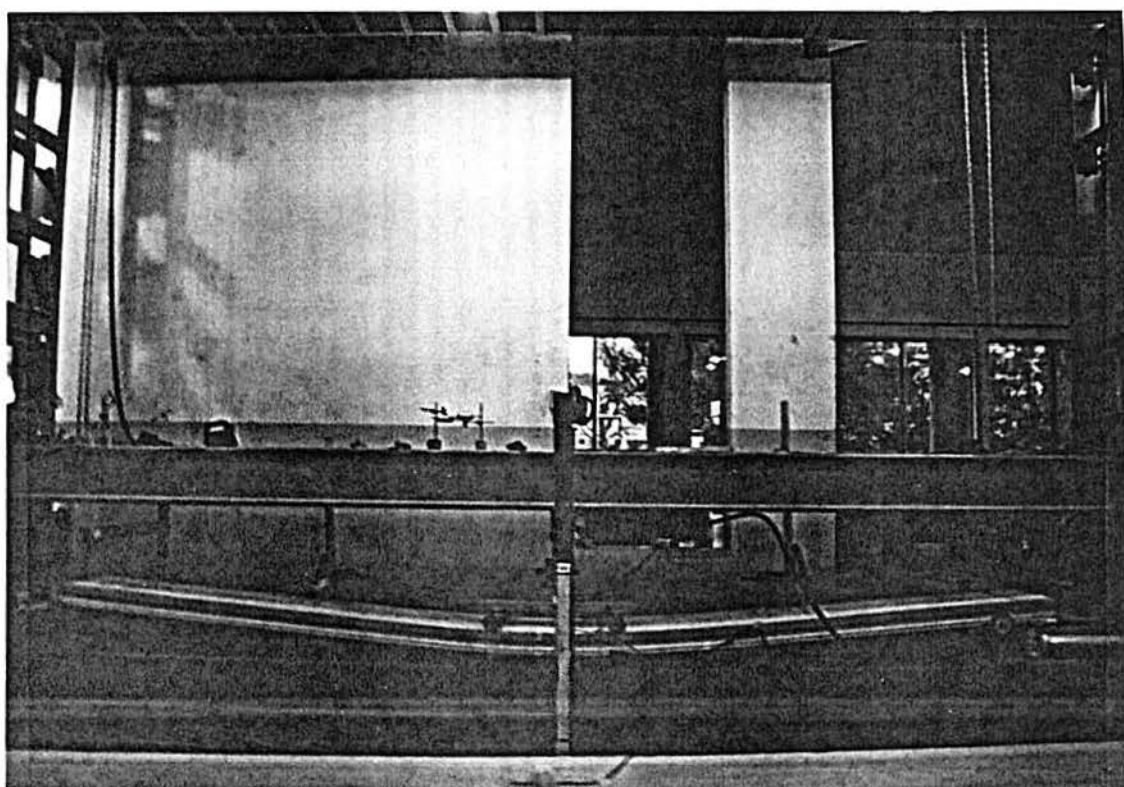


Foto 4.7 - Vista do protótipo B1, fletido em torno de 15 cm no centro



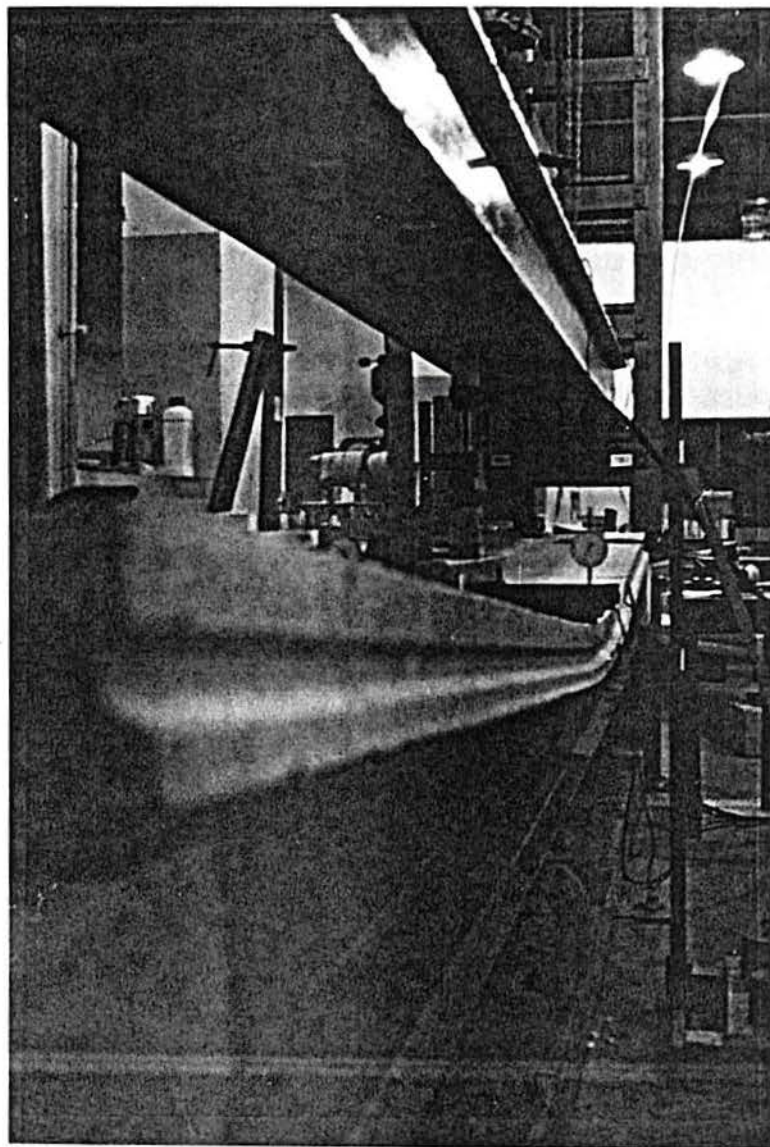


Foto 4.8 - Vista do protótipo B1 durante o ensaio com carregamento concentrado

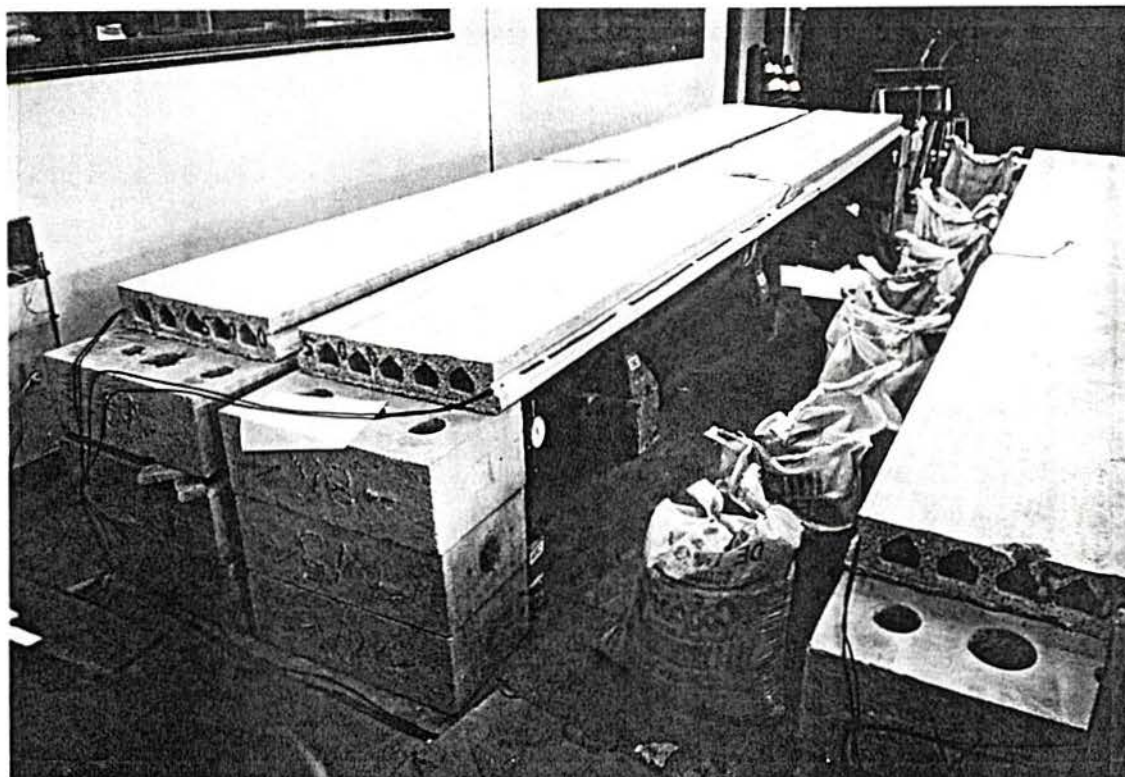


Foto 4.9 - Vista dos protótipos instrumentados e preparação dos protótipos A1 e B2 para receber o carregamento de serviço

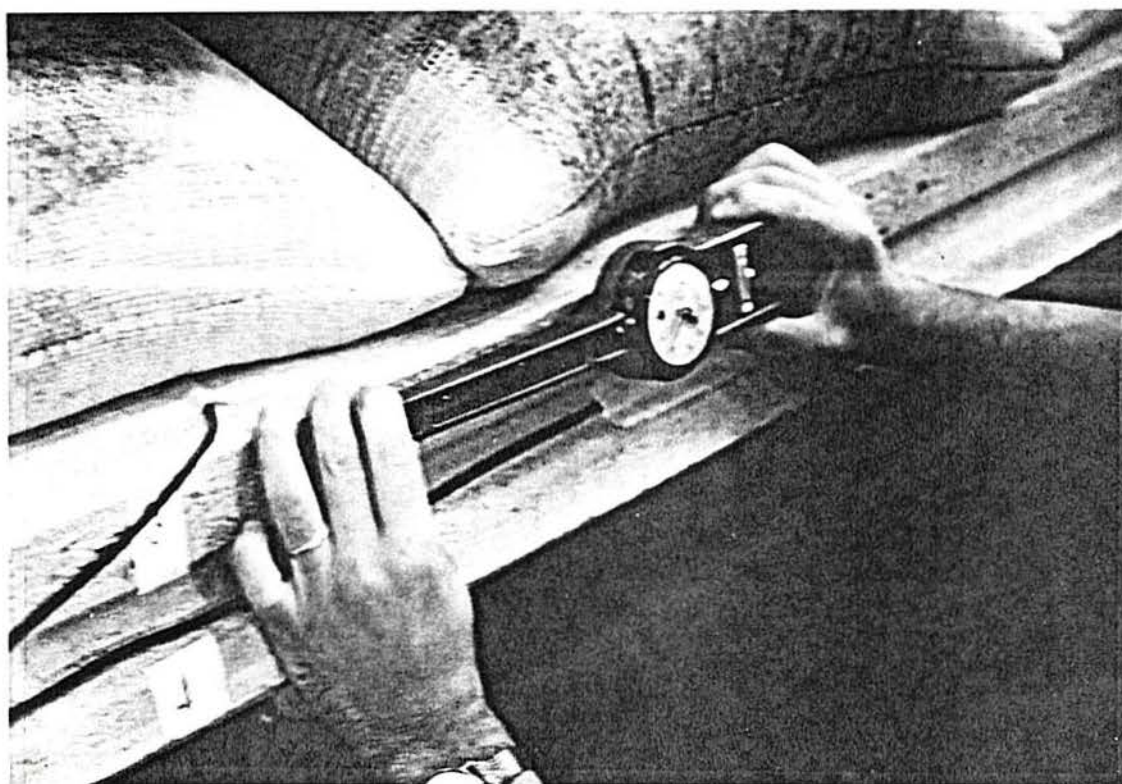


Foto 4.10 - Vista do protótipo B2, após receber um carregamento de 1 KN/m em duas etapas e leitura do alongamento na parte superior da face lateral



Foto 4.11 - Vista do protótipo B2, com carga de serviço total (1,65 KN/m) e execução de leituras no protótipo A1, após a segunda etapa de carregamento (1,0 KN/m). Vista dos equipamentos para a leitura das deformações dos strain gages



Foto 4.12 - Vista dos protótipos A1 e B2, mantidos com o carregamento de serviço por um período aproximado de 4 meses e C1 e A2, somente com o peso próprio, pelo mesmo período

## 5 - MODELO NUMÉRICO E PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO

Neste capítulo são tecidas considerações sobre o modelo computacional utilizado para a análise numérica e descritos os procedimentos para os cálculos analíticos de deslocamentos e solicitações.

### 5.1 - Modelo numérico

Para a análise numérica foi utilizado o modelo computacional implementado por Prates Jr. (1992) e as normas NBR 6118 (1982) e NBR 7197 (1989).

O modelo computacional implementado por Prates Jr., e apresentado na dissertação de mestrado, desenvolvida no CPGEC/UFRGS, intitulada UM MODELO ELASTO-VISCOPLÁSTICO PARA ANÁLISE DE PEÇAS DE CONCRETO ESTRUTURAL, SUBMETIDAS A ESTADOS PLANOS DE TENSÃO, ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS, aqui referenciado simplesmente por VISCO, abrange situações de carga de curta e longa duração, onde consideram-se fluência e retração do concreto e relaxação do aço.

Trata-se de um modelo bidimensional para análise de peças de concreto armado e protendido submetidas a um estado plano de tensões. Para modelar o concreto é utilizado um elemento isoparamétrico quadrático de 8 nós, da família Serendipity. A armadura é incluída no modelo de elementos finitos através de um modelo incorporado. As barras de armadura podem ser dispostas em qualquer posição no interior do elemento de concreto.

Para descrever o comportamento dos materiais são utilizados modelos constitutivos elasto-viscoplásticos. O comportamento do concreto é representado por um modelo de camadas superpostas, onde estas sofrem a mesma deformação. Cada camada possui diferentes características físicas e a tensão total é obtida pela soma das diferentes contribuições de cada camada.

Para a fissuração do concreto é utilizado um modelo de fissuras distribuídas, que leva em conta a contribuição do concreto entre fissuras.

Tanto a armadura passiva como a de protensão são introduzidas no modelo como uma linha de material mais rígido dentro do elemento de concreto. Os deslocamentos ao longo da armadura são referenciados aos deslocamentos nodais do elemento de concreto. A matriz de rigidez do elemento concreto-aço é a soma das duas matrizes.

Considera-se aderência perfeita entre o concreto e o aço.

Detalhes sobre a entrada de dados encontram-se muito bem explicitados no referido trabalho.

Para testar o comportamento das lajes face a este modelo computacional foi elaborada uma malha de elementos finitos de concreto com 12 elementos de 8 nós, fig. 5.1, uma vez que os protótipos apresentam simetria de carga e geometria.

Como entrada de dados, utilizou-se os referentes à geometria da peça, tipo de carregamento e as propriedades do concreto, do aço e do ambiente. Adotou-se uma umidade relativa do ar de 80% e uma temperatura constante de 20<sup>o</sup> C .

Tal como Prates Jr. (1992), em seu trabalho, fixou-se parâmetros referentes ao processo de integração no tempo, tais como: fator  $k = 1,5$ ;  $\theta = 0,5$ ; comprimento inicial de passo de tempo  $\Delta t_0 = 1$  dia; fator de incremento de tempo  $\Delta t = 1$ ; coeficiente de Poisson  $\nu = 0,2$  e cimento de endurecimento normal.

As análises foram feitas considerando as características físicas individuais médias de cada protótipo, ou seja, a seção transversal dos protótipos foi aproximada para uma seção I, com idênticas áreas de concreto e de armadura às dos protótipos. A armadura foi considerada como sendo composta de duas barras de diâmetros equivalentes, uma superior e uma inferior, com cobrimentos tomados respectivamente das médias superior e inferior de cada protótipo. A tabela 5.1 mostra as posições médias das cordoalhas para os protótipos. As características dos materiais, por diferirem de forma insignificante dos valores nominais descritos no item 2.2, foram tomadas iguais a estas.

Como já descrito, as lajes tipo ROTH sofrem um processo de cura acelerada, o que faz com que o concreto atinja altas resistências já no momento do corte. A resistência do primeiro dia de idade das lajes é equivalente à que seria

atingida pelo concreto, em condições normais, numa idade mais avançada. Tendo as lajes sofrido este processo de cura a vapor, não previsto no programa computacional denominado VISCO, considerou-se o primeiro dia de idade dos protótipos e das lajes correspondente aos 28 dias no programa, para efeitos de equivalência da resistência atingida pelo concreto após a cura.

No que se refere aos protótipos, os valores de deslocamentos e deformações comparados são valores líquidos, ou seja, estão descontadas as parcelas correspondentes ao peso próprio, pois não é possível avaliar experimentalmente as deformações e deslocamentos devidos ao peso próprio.

Cada protótipo originou uma análise diferente no programa, uma vez que algumas características, tais como o posicionamento das cordoalhas e a data de ensaio, são próprias de cada protótipo e outras, tais como o sistema de carregamento, são iguais para cada grupo de dois protótipos. Os protótipos D e E, entretanto, receberam o mesmo sistema de carregamento que os protótipos B1 e C2.

As análises foram denominadas com a mesma referência dada aos protótipos, ou seja, A1, A2, B1, B2, C1, C2, D e E, perfazendo um total de oito casos. Os casos dos tipos A, B e C correspondem a protótipos originados de uma determinada partilha e os casos D e E correspondem a protótipos de uma partilha de data posterior (ver item 2.1).

Tabela 5.1 - Cobrimento das cordoalhas (cm)

COBRI- MENTO	P R O T Ó T I P O S								média
	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D	E	
superior	2,670	1,970	2,350	2,070	2,870	2,970	3,150	3,070	2,640
inferior	2,100	2,160	2,330	2,500	2,500	2,580	1,910	1,840	2,240
média	2,385	2,065	2,340	2,285	2,685	2,775	2,530	2,455	2,440

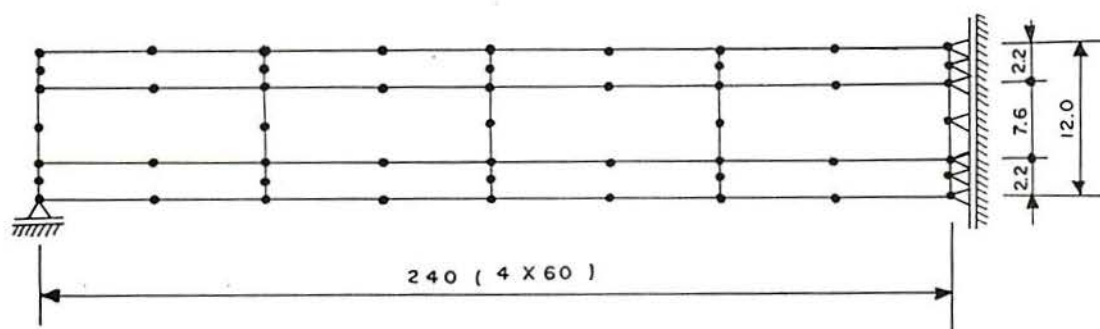


Figura 5.1 - Malha de elementos finitos adotada (cotas em cm)

## 5.2 Procedimentos de cálculo

### 5.2.1 - Cálculo do momento fletor último

O momento último foi calculado utilizando um programa apresentado por Campos  $F^0$  (trabalho a ser publicado). Este verifica as seções de concreto protendido submetidas à solicitações normais, conforme as recomendações da NBR 7197 (1989) e NBR 6118 (1982). Neste trabalho, os resultados obtidos através deste programa estão referenciados simplesmente por NBR.

### 5.2.2 - Determinação do fator R, ações de longa duração

De acordo com Sussekind (1980, p.171-172), a atuação de cargas de longa duração acarreta, para o concreto, o fenômeno da deformação lenta, isto é, ao longo do tempo, a deformação específica imediata  $\epsilon_c$  no bordo da peça comprimido pela flexão se transformará em  $(1+\varphi_t)\epsilon_c$ , sendo  $\varphi_t$  o coeficiente de deformação lenta, mantendo-se praticamente constante a deformação  $\epsilon_s$  da armadura tracionada.

No caso das lajes em estudo, para ações de longa duração, foi determinado um fator R, que relaciona flecha ao longo do tempo por flecha instantânea (tab.6.19, item 6.2.4). Através do programa VISCO foi aplicado, nas lajes, para

determinados vãos, o carregamento de serviço distribuído, permanecendo este por um período de 5 anos. Foram obtidas, do programa numérico, as flechas no centro dos vãos livres, para diversas datas ao longo dos 5 anos (tab. 6.5 a 6.18). O fator R, para cada uma das lajes, é a razão entre a flecha ao final dos 5 anos e a flecha instantânea. Através do programa numérico também foram determinadas as curvaturas da seção de concreto, ao longo do tempo, apresentadas nas mesmas tabelas.

### 5.2.3 - Cálculo dos vãos máximos admissíveis para as lajes ROTH e critérios de limitação

No item 6.2.5 são apresentadas diversas tabelas com dados a cerca do desempenho das lajes de concreto protendido tipo ROTH. Para confeccioná-las, diversos critérios foram adotados e explicitados nos itens abaixo.

#### 5.2.3.1 - Cálculo dos vãos máximos admissíveis para as lajes ROTH, pelo critério de deformações

A norma NBR 6118 (1982) estabelece, para flechas em lajes, salvo cálculo mais rigoroso, que as flechas medidas a partir do plano que contém os apoios, quando atuarem todas as ações, não devem ultrapassar 1/300 do vão teórico e que para somente cargas acidentais não devem ultrapassar 1/500 do vão teórico.

Para uma laje simplesmente apoiada, da resistência dos materiais vem que:

$$f_i = \frac{5 p l^4}{384 E_c I} \quad (5.1)$$

em ações de longa duração:

$$f_t = R \frac{5 p l^4}{384 E_c I} \quad (5.2)$$

Onde  $f_i$  é a flecha instantânea, p o carregamento por metro linear, l o comprimento do vão teórico,  $E_c$  o módulo de deformação longitudinal do concreto, I o momento de inércia da seção,  $f_t$  a flecha ao longo do tempo e R o fator que relaciona flecha ao longo do tempo por flecha instantânea (tab. 6.19,



item 6.2.4).

Combinando a limitação da norma com a expressão 5.2, foi determinado o vão admissível para cada um dos carregamentos desejados. Estes resultados são apresentados nas tabelas 6.20 a 6.22. Na tabela 6.20, o fator R incide somente sobre o peso próprio da laje, na tabela 6.21, o fator R incide sobre o peso próprio e 50% da sobrecarga e, na tabela 6.22, o fator R incide sobre a carga total.

#### 5.2.3.2 - Cálculo dos vãos máximos admissíveis para as lajes ROTH, pelo critério de flexão

Sendo que o momento máximo para as peças em questão é dado por

$$M = \frac{p l^2}{8} \quad (5.3)$$

e considerando seu estado limite último, através do momento último de projeto (tabela 6.4), minorado pelo fator 1,4, NBR 6118 (1982) determinou-se o vão admissível para os carregamentos desejados, utilizando-se a expressão 5.3. Os resultados constam na tabela 6.23.

#### 5.2.3.3 - Cálculo dos vãos máximos admissíveis para as lajes ROTH, pelo critério do esforço cortante

Os vãos máximos admissíveis para as lajes ROTH, verificando o esforço cortante, foram determinados de acordo com o que prescreve a NBR 7197 (1989) no item A-2.4.2.3 lajes submetidas à flexo-compressão. Os resultados constam na tabela 6.24.

## 6 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e comentados os resultados obtidos numérica e experimentalmente. O item 6.1 refere-se à análise numérica e experimental dos protótipos, enquanto que no item 6.2 o estudo numérico é estendido às diferentes seções de lajes tipo ROTH que fazem parte da linha de produção, face ao carregamento uniformemente distribuído de curta e longa duração.

No que se refere às deformações, as legendas dos gráficos correspondentes indicam, de forma abreviada, resultados obtidos para as faces superior e inferior da seção central, através da leitura de extensômetros elétricos, extensômetros mecânicos e os originados do programa VISCO. Nos resultados apresentados a seguir o termo "carga" refere-se ao carregamento total das peças, incluindo o seu peso próprio, já o termo "sobrecarga" refere-se ao carregamento excedente ao peso próprio, carga total menos o peso próprio.

O programa VISCO fornece os resultados de forma incremental, de modo que, a carga de ruptura apresentada pelo programa nos gráficos seguintes corresponde ao último incremento de carga a apresentar convergência. Na verdade, a ruptura se dá entre o último incremento que converge e o seguinte, que não apresenta convergência, podendo estar embutida uma diferença na carga de ruptura da ordem de -10% , nas situações em que o carregamento é incrementado até a ruptura.

### 6.1 - Protótipos

Neste item comparam-se os valores determinados experimentalmente com os resultados obtidos através do programa computacional para os protótipos.

#### 6.1.1 - Ensaio de carregamento instantâneo, com carga de serviço distribuída

Os gráficos 6.1 a 6.4 apresentam os resultados correspondentes aos ensaios 02 e 03 (tabela 4.1), ensaios de

carregamento instantâneo, aplicado de forma distribuída. A carga total aplicada corresponde ao valor recomendado, para a carga de serviço, pela tabela fornecida pelo fabricante, totalizando 1,65 KN/m. O procedimento do ensaio encontra-se no item 4.1.2.

O protótipo B2 apresentou maiores deslocamentos verticais que o A1 pelo fato de já encontrar-se fissurado em região próxima ao centro, antes mesmo da aplicação do carregamento. Provavelmente esta fissura tenha ocorrido por retração na secagem do concreto, ainda na pista de concretagem. No momento em que as lajes foram serradas e a protensão transferida ao concreto, fechou-se a fissura e, após receber o carregamento de serviço (ensaio 03, tabela 4.1), esta tornou-se novamente visível a olho nu.

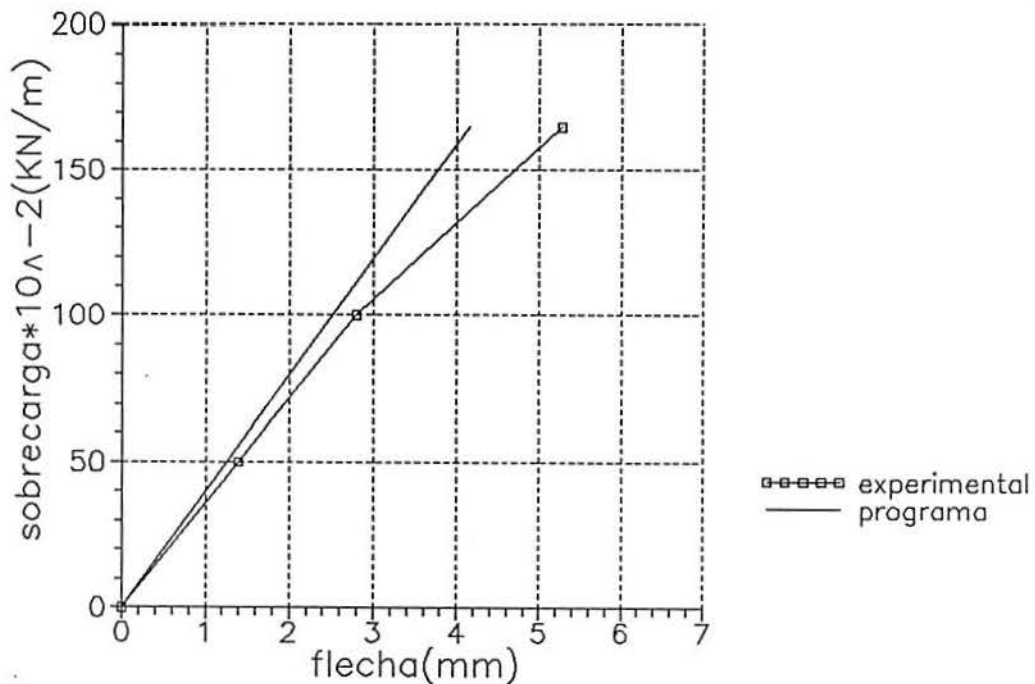


Gráfico 6.1 - Flechas na seção central do protótipo A1, mediante carregamento de serviço aplicado de forma distribuída, aos 12 dias de idade (primeiro ensaio no protótipo A1)

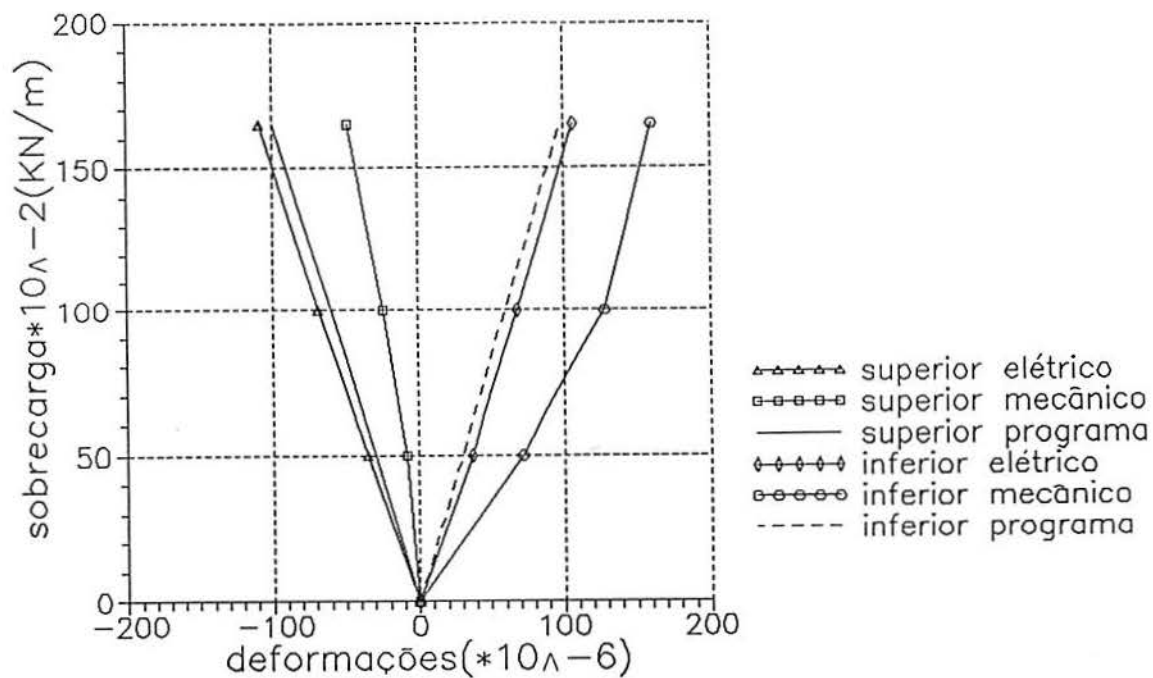


Gráfico 6.2 - Deformações na seção central, faces superior e inferior, protótipo A1, mediante carregamento de serviço aplicado de forma distribuída, aos 12 dias de idade (primeiro ensaio no protótipo A1)

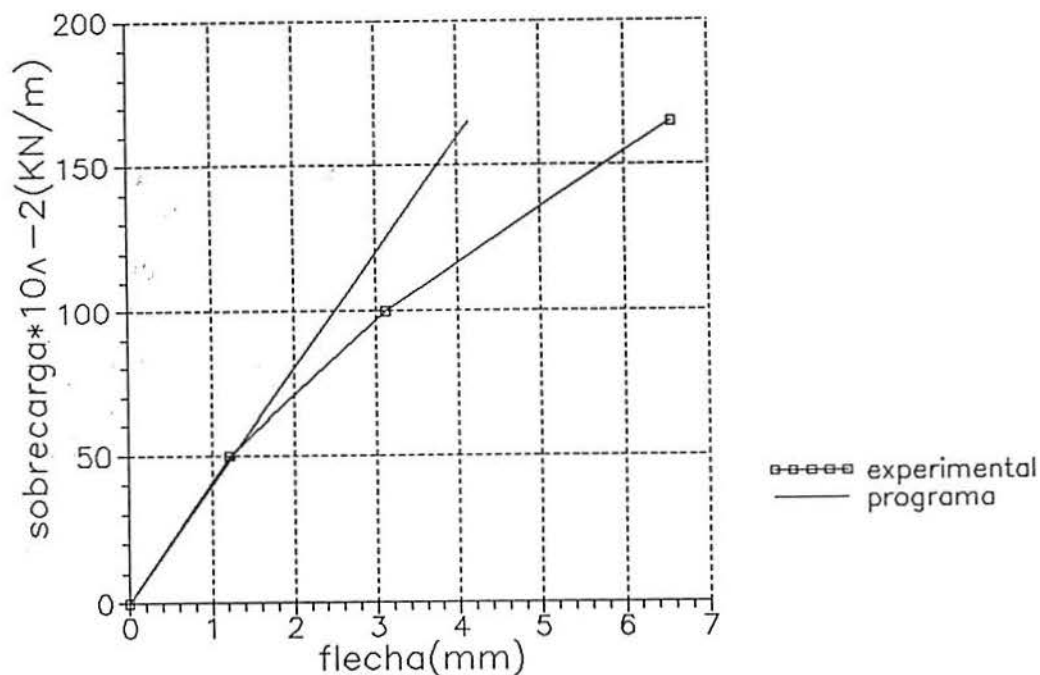


Gráfico 6.3 - Flechas na seção central do protótipo B2, mediante carregamento de serviço aplicado de forma distribuída, aos 12 dias de idade (primeiro ensaio no protótipo B2)

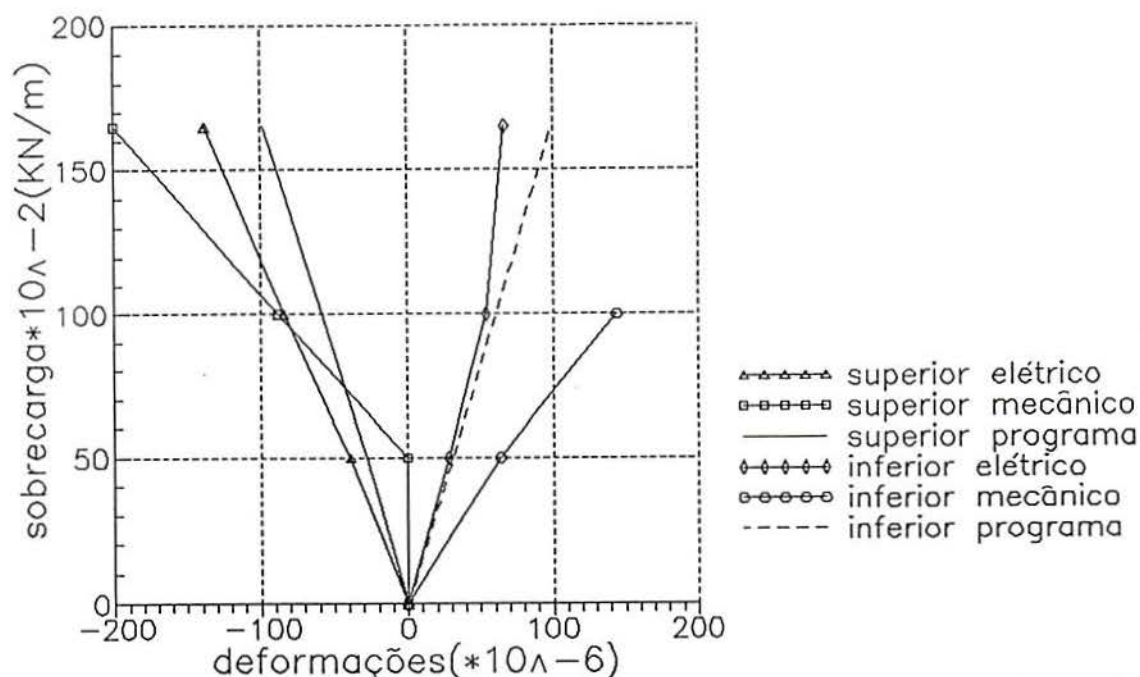


Gráfico 6.4 - Deformações na seção central, faces superior e inferior, protótipo B2, mediante carregamento de serviço aplicado de forma distribuída, aos 12 dias de idade (primeiro ensaio no protótipo B2)

#### 6.1.2 - Ensaio de carregamento permanente , com carga de serviço distribuída

Os gráficos 6.5 a 6.10 apresentam os resultados correspondentes aos ensaios 05 e 06 (tabela 4.1), ensaios de longa duração, com carga de serviço distribuída.

No gráfico 6.6 fica evidenciada a influência da fissura referida no item 6.1.1 no aumento do deslocamento vertical medido experimentalmente ao longo do tempo, protótipo B2.

É importante ser relatado que ocorreram dificuldades de acesso à face inferior dos protótipos para a medição das deformações através do elongômetro SOILTEST (extensômetro mecânico), o que pode ter sido fonte de erros de leitura. Nas leituras das deformações na face superior dos protótipos A1 e B2 pelo processo mecânico está embutido um pequeno erro, conforme foi explicado no item 3.3.4. Erros também podem ter sido gerados pelo próprio equipamento, que apresentava leitura induzida ou irreal, este problema transparece com maior

evidência em alguns gráficos de deformações por carregamento instantâneo (item 6.1.5). Isto explica-se pelo fato de o material do equipamento medidor (ponteira) ser muito mais resistente que o das pastilhas que formam a base onde se introduz a ponteira; com a série de medições efetuadas ao longo do tempo, o orifício das pastilhas se deforma, sendo então uma fonte de erros.

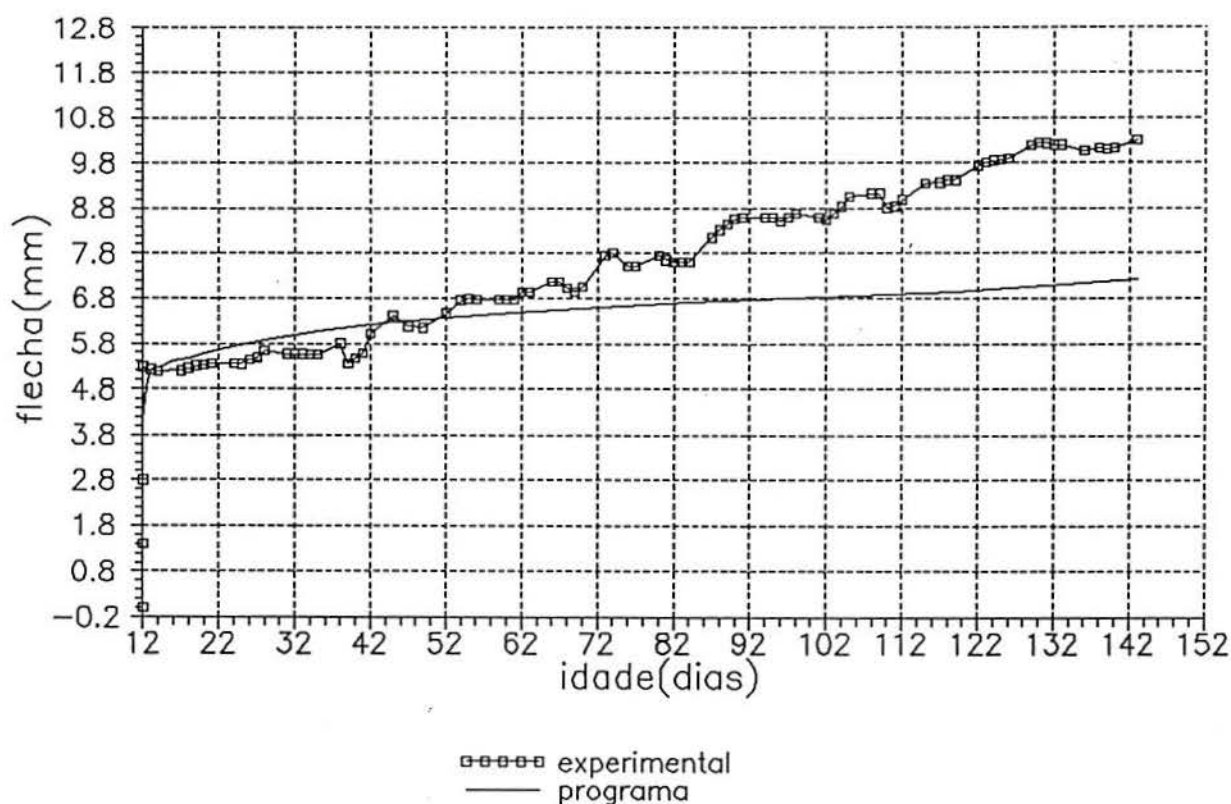


Gráfico 6.5 - Curva flecha na seção central-tempo obtida para o protótipo A1, sujeito ao carregamento de serviço distribuído, pelo período de 131 dias (segundo ensaio no protótipo A1)

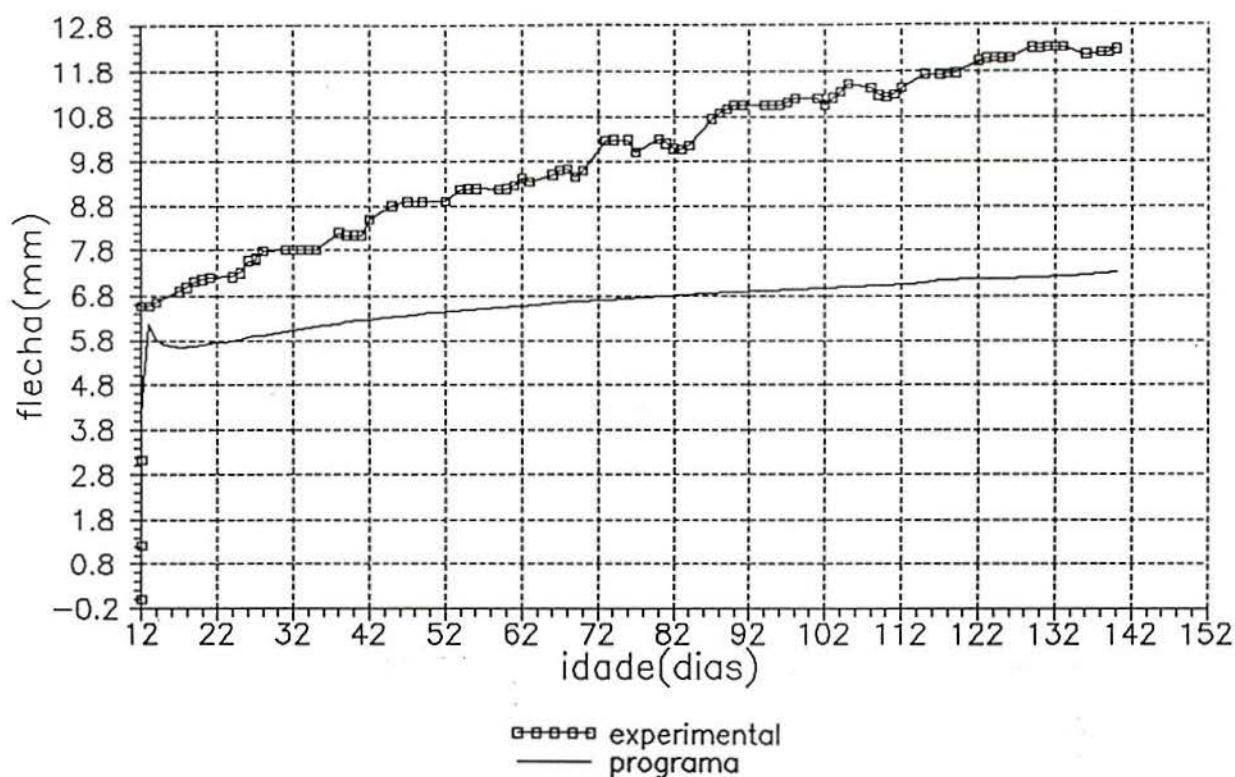


Gráfico 6.6 - Curva flecha na seção central-tempo obtida para o protótipo B2, sujeito ao carregamento de serviço distribuído, pelo período de 128 dias (segundo ensaio no protótipo B2)

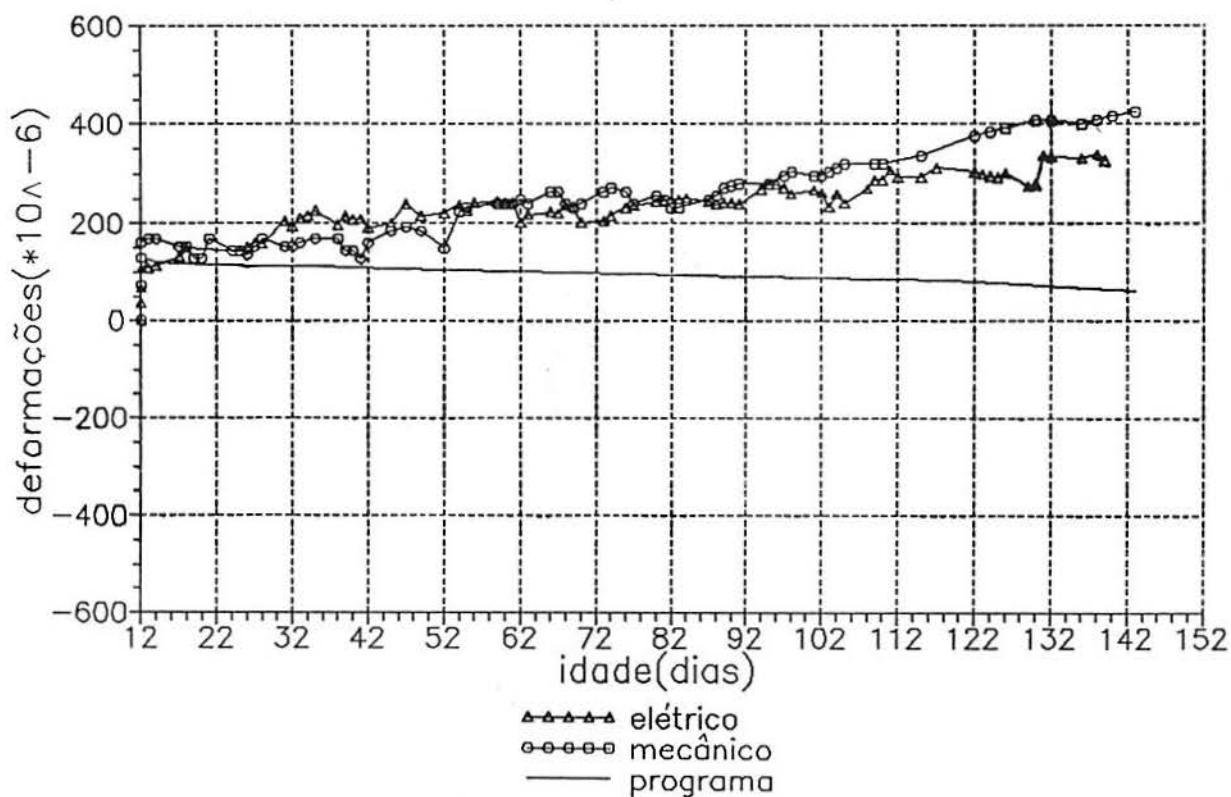


Gráfico 6.7 - Curva deformações na face inferior da seção central-tempo obtida para o protótipo A1, sujeito ao carregamento de serviço distribuído, pelo período de 131 dias (segundo ensaio no protótipo A1)

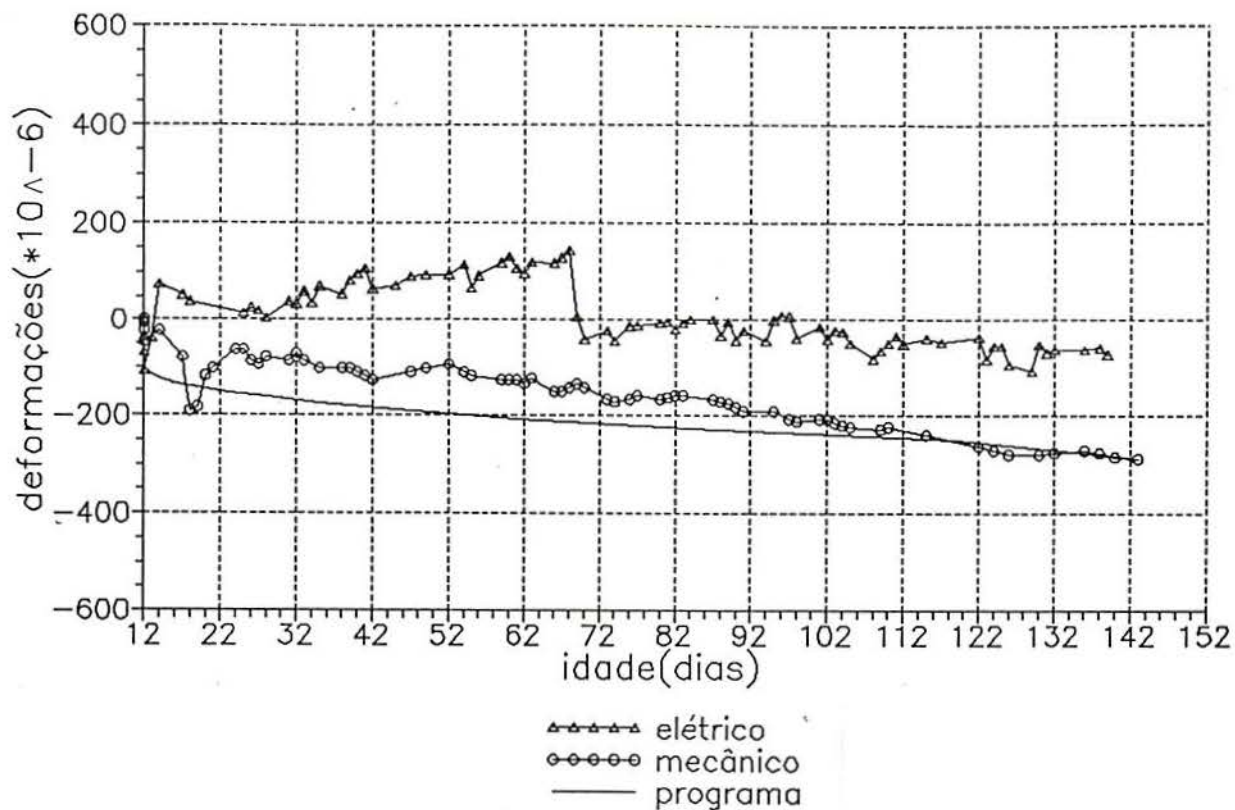


Gráfico 6.8 - Curva deformações na face superior da seção central-tempo obtida para o protótipo A1, sujeito ao carregamento de serviço distribuído, pelo período de 131 dias (segundo ensaio no protótipo A1)

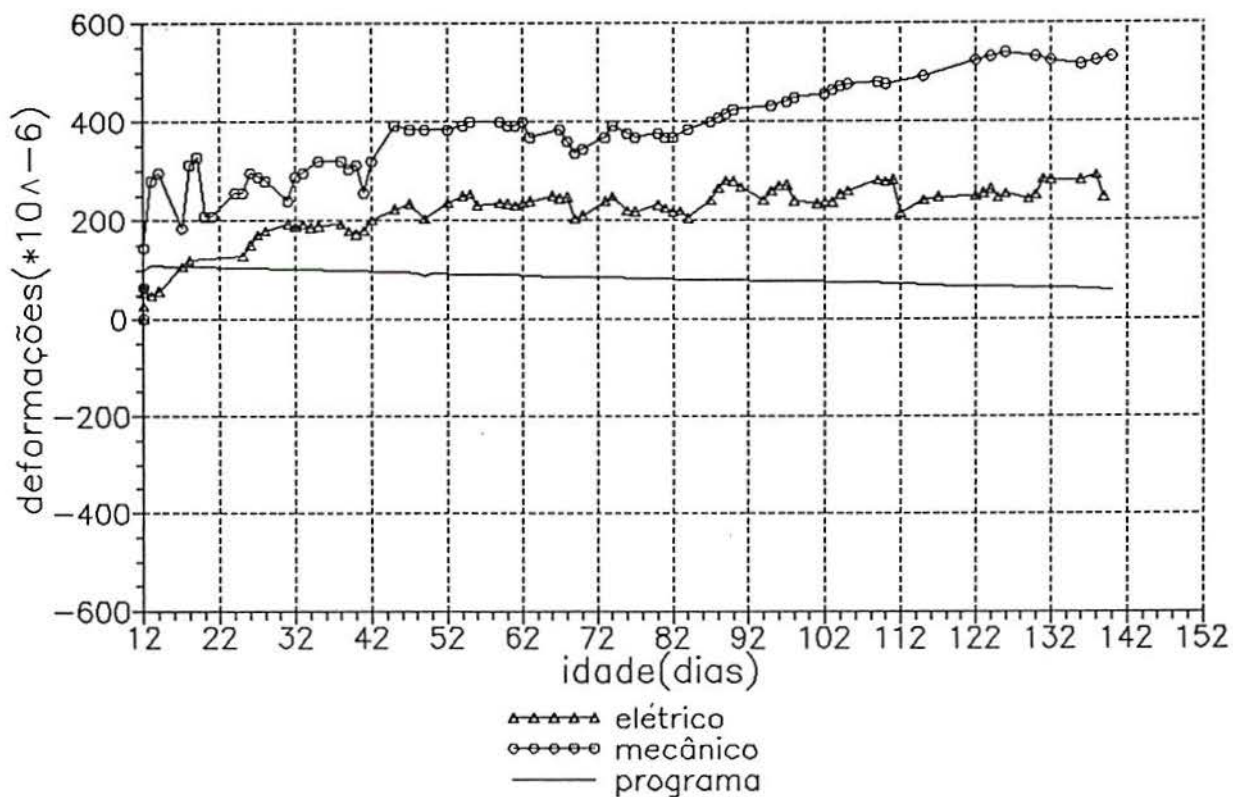


Gráfico 6.9 - Curva deformações na face inferior da seção central-tempo obtida para o protótipo B2, sujeito ao carregamento de serviço distribuído, pelo período de 128 dias (segundo ensaio no protótipo B2)



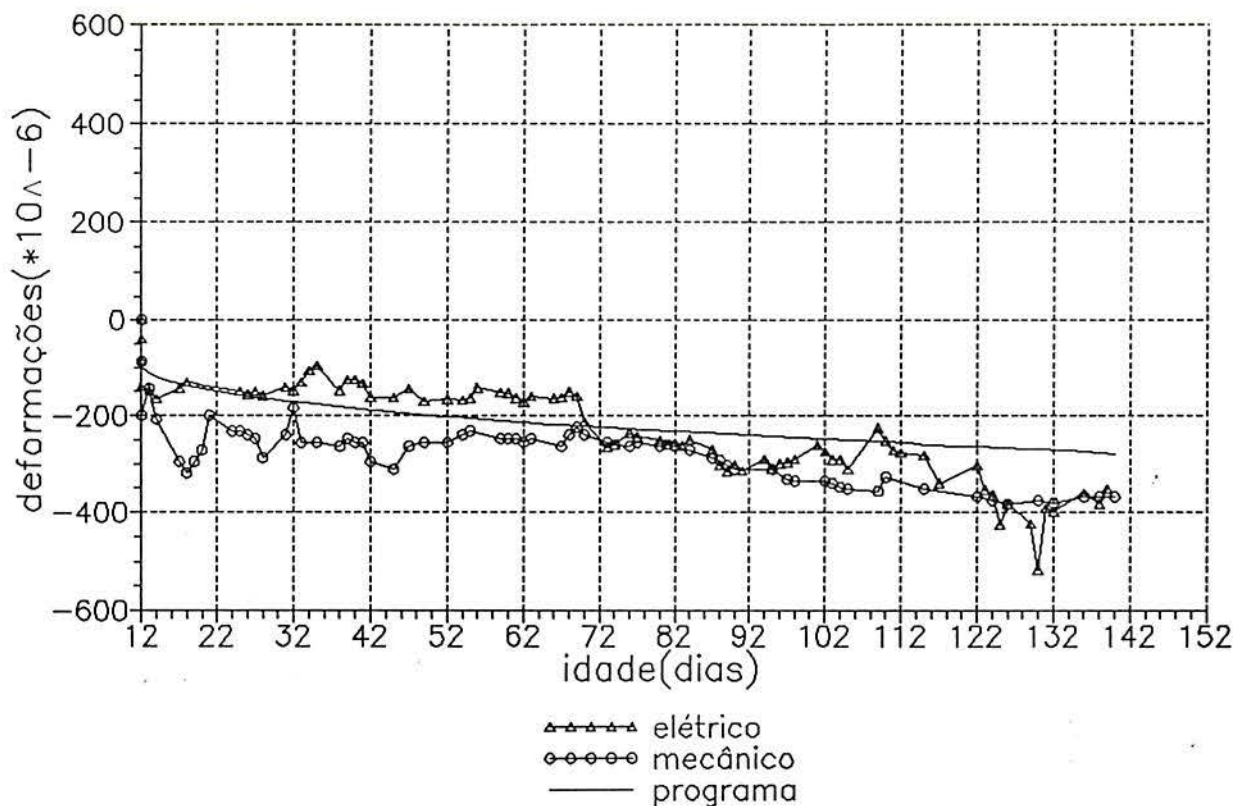


Gráfico 6.10 - Curva deformações na face superior da seção central-tempo obtida para o protótipo B2, sujeito ao carregamento de serviço distribuído, pelo período de 128 dias (segundo ensaio no protótipo B2)

### 6.1.3 - Ensaio de carregamento permanente, somente peso próprio

Os gráficos 6.11 a 6.16 apresentam os resultados correspondentes aos ensaios 07 e 08 (tabela 4.1), ensaios de longa duração, com os protótipos C1 e A2 sujeitos somente ao peso próprio.

Enquanto os resultados do programa para os deslocamentos verticais ao longo do tempo oscilam em torno de zero, experimentalmente observou-se um resultado diverso, não passando, contudo, de 1,8mm no centro do vão livre, para um período aproximado de 4 meses.

As observações feitas a respeito do elongômetro no item 6.1.2 são válidas também para este ensaio.

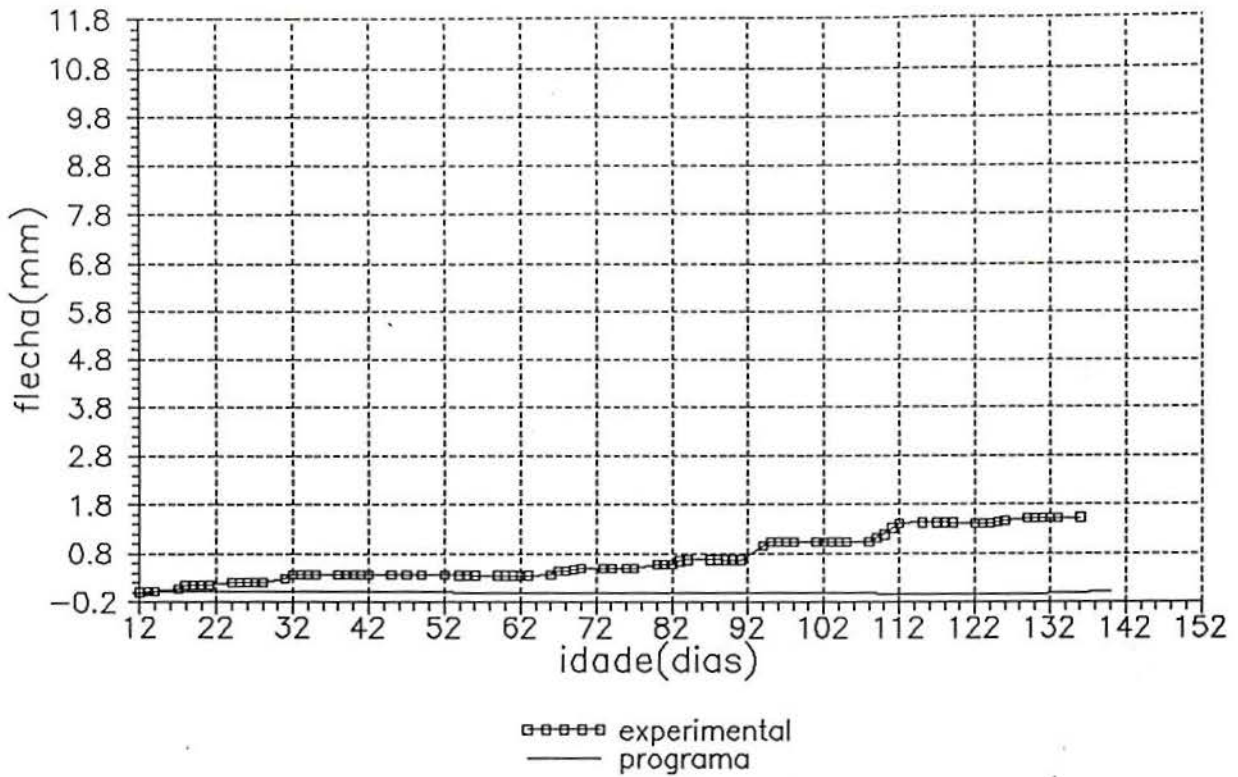


Gráfico 6.11 - Curva flecha na seção central-tempo obtida para o protótipo C1, sujeito somente ao peso próprio, pelo período de 124 dias (primeiro ensaio no protótipo C1)

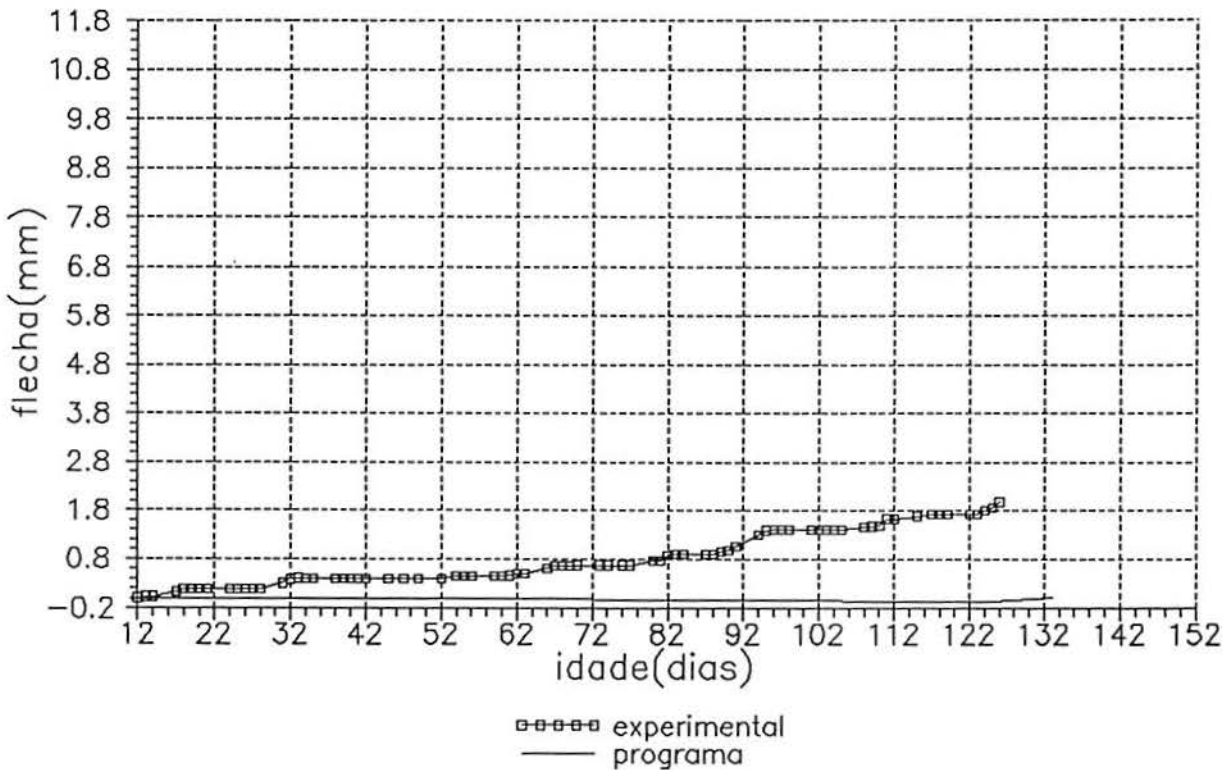


Gráfico 6.12 - Curva flecha na seção central-tempo obtida para o protótipo A2, sujeito somente ao peso próprio, pelo período de 114 dias (primeiro ensaio no protótipo A2)

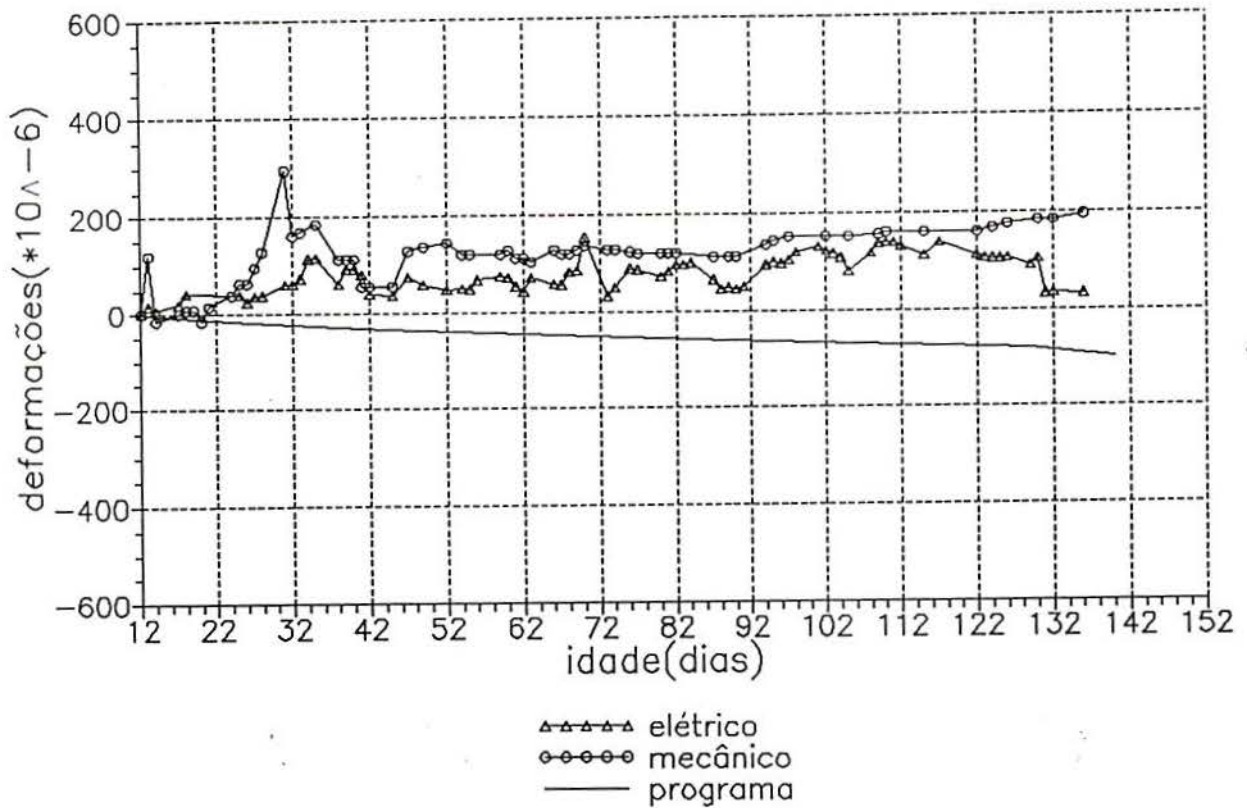


Gráfico 6.13 - Curva deformações na face inferior da seção central-tempo obtida para o protótipo C1, sujeito somente ao peso próprio, pelo período de 124 dias (primeiro ensaio no protótipo C1)

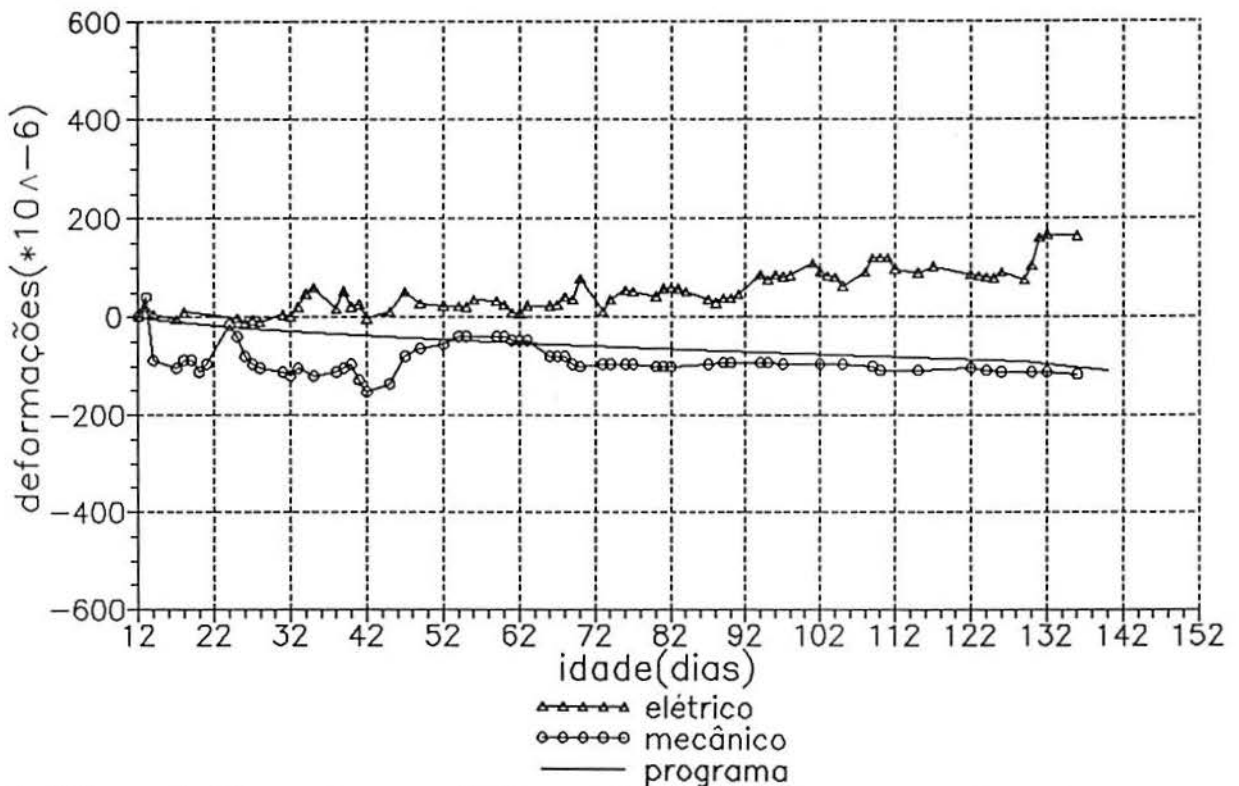


Gráfico 6.14 - Curva deformações na face superior da seção central-tempo obtida para o protótipo C1, sujeito somente ao peso próprio, pelo período de 124 dias (primeiro ensaio no protótipo C1)

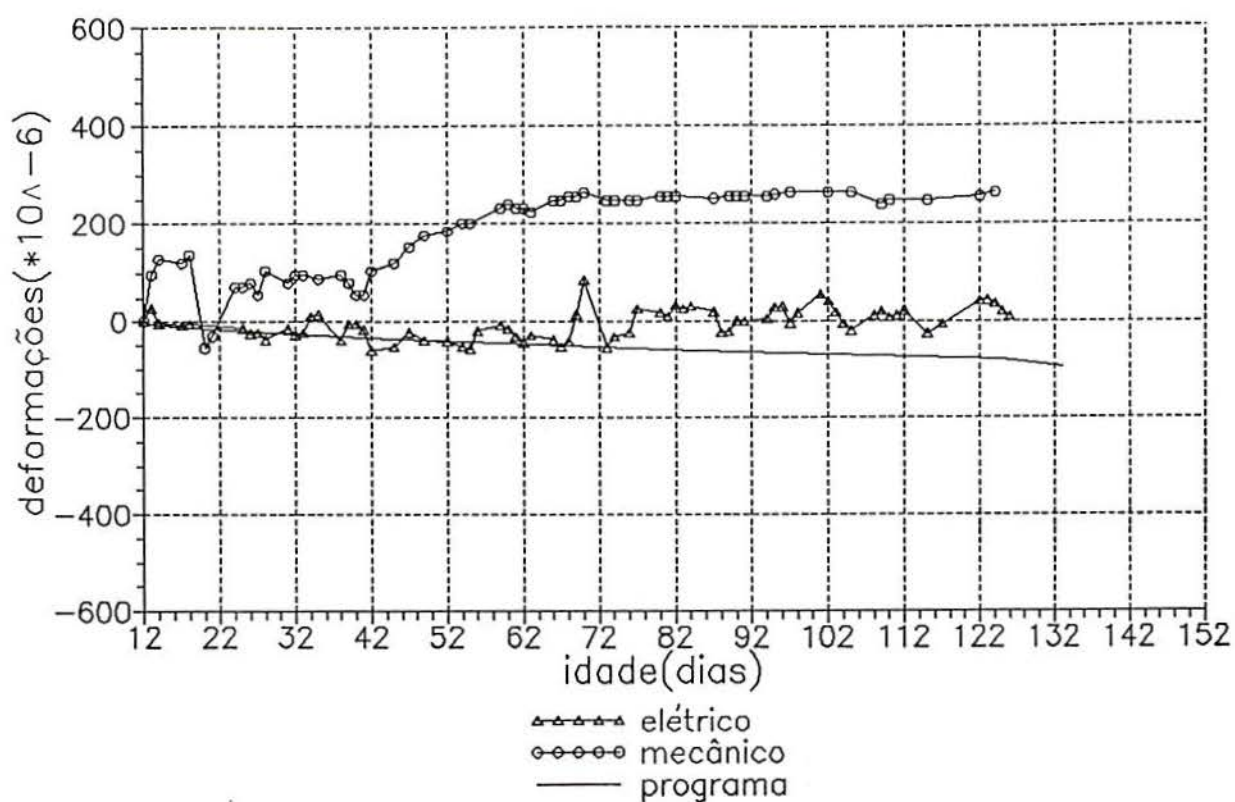


Gráfico 6.15 - Curva deformações na face inferior da seção central-tempo obtida para o protótipo A2, sujeito somente ao peso próprio, pelo período de 114 dias (primeiro ensaio no protótipo A2)

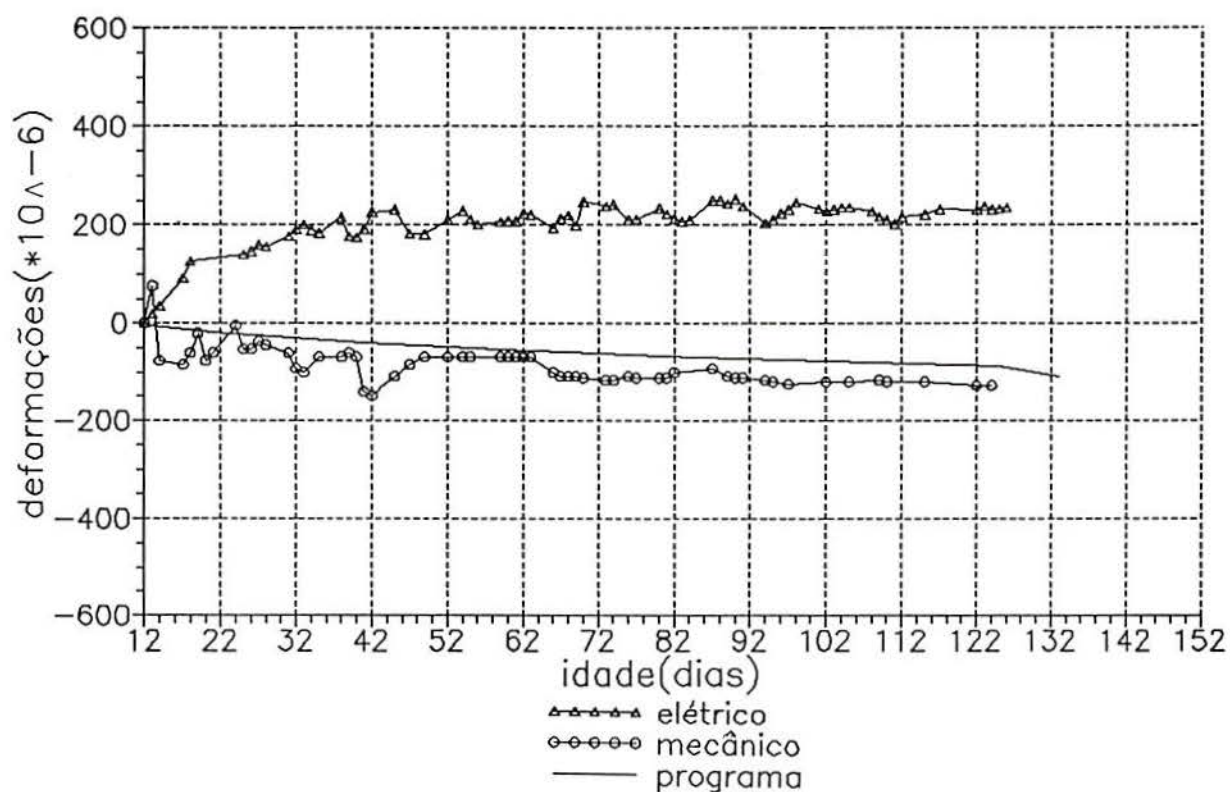


Gráfico 6.16 - Curva deformações na face superior da seção central-tempo obtida para o protótipo A2, sujeito somente ao peso próprio, pelo período de 114 dias (primeiro ensaio no protótipo A2)

#### 6.1.4 - Ensaio instantâneo, retirada da carga de serviço

Os gráficos 6.17 a 6.20 apresentam os resultados correspondentes aos ensaios 11 e 12 (tabela 4.1), ensaios instantâneos, com a retirada da carga de serviço dos protótipos A1 e B2. Também nestes ensaios as maiores diferenças detectadas entre os resultados do programa e os experimentais se referem ao protótipo B2, devido à situação descrita no item 6.1.1.

Nestes ensaios não foram tomadas as medidas das deformações através do elongômetro, pelas razões expostas no item 6.1.2.

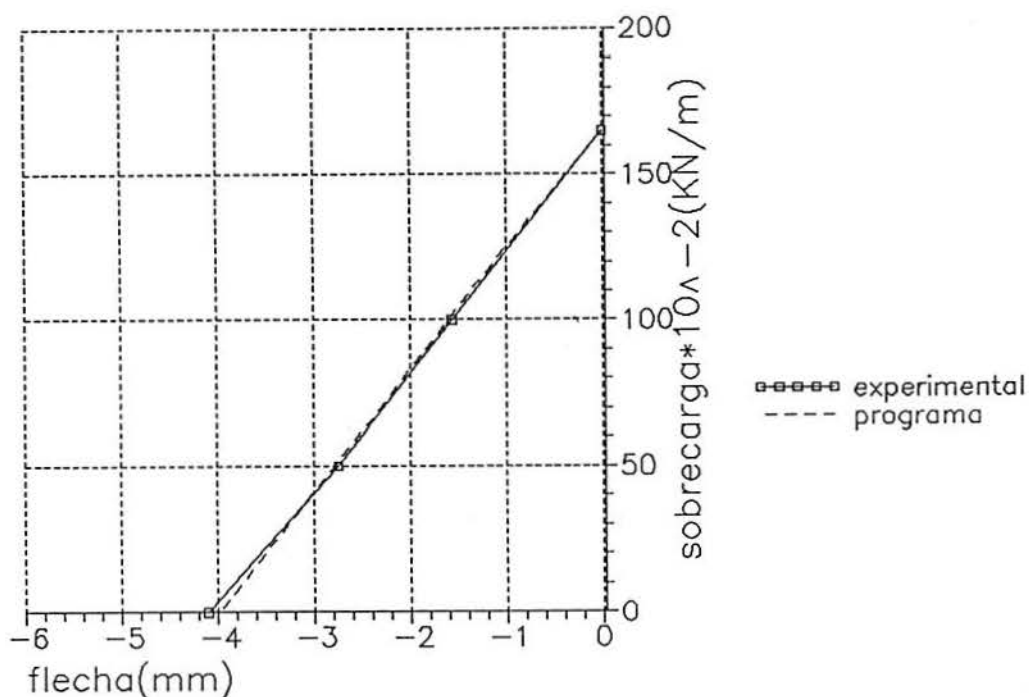


Gráfico 6.17 - Flechas na seção central do protótipo A1, mediante retirada do carregamento de serviço após atuar, de forma distribuída, pelo período de 131 dias (terceiro ensaio no protótipo A1)

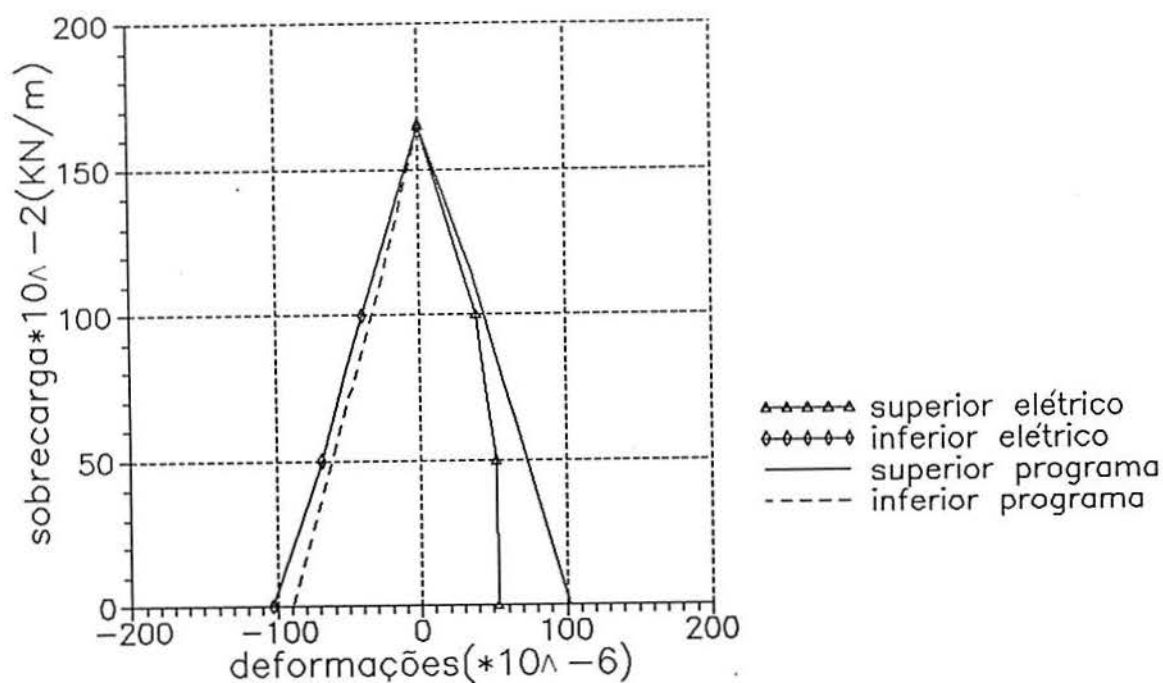


Gráfico 6.18 - Deformações na seção central, faces superior e inferior, protótipo A1, mediante retirada do carregamento de serviço após atuar, de forma distribuída, pelo período de 131 dias (terceiro ensaio no protótipo A1)

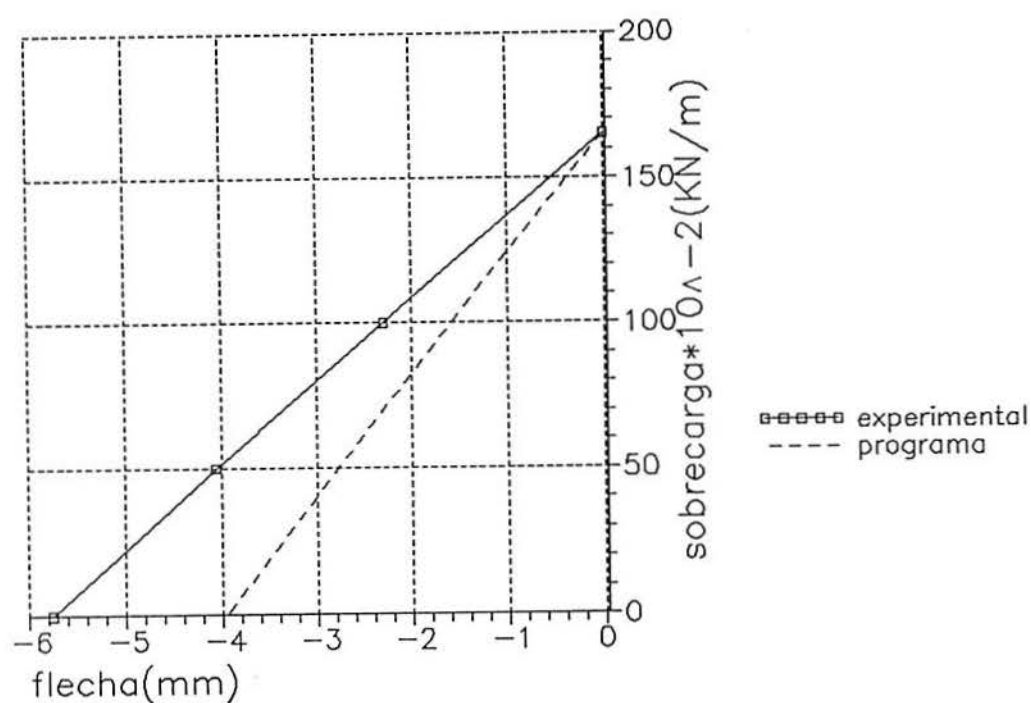


Gráfico 6.19 - Flechas na seção central do protótipo B2, mediante retirada do carregamento de serviço após atuar, de forma distribuída, pelo período de 128 dias (terceiro ensaio no protótipo B2)

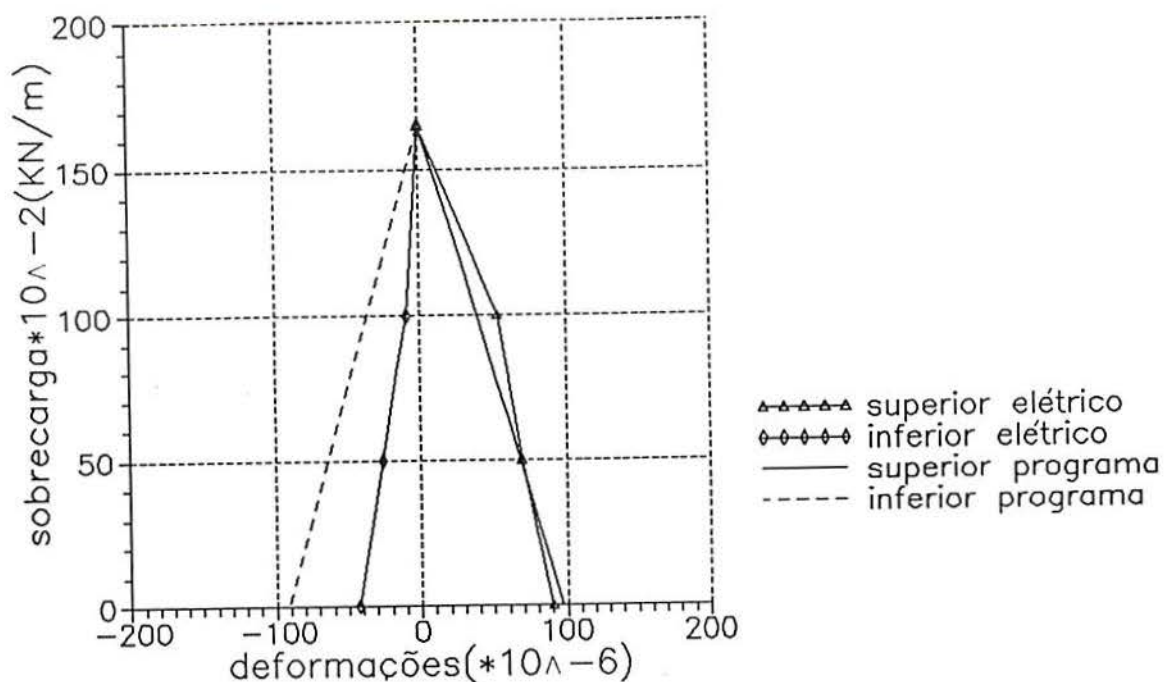


Gráfico 6.20 - Deformações na seção central, faces superior e inferior, protótipo B2, mediante retirada do carregamento de serviço após atuar, de forma distribuída, pelo período de 128 dias (terceiro ensaio no protótipo B2)

#### 6.1.5 - Ensaio de carregamento instantâneo, com carga concentrada até a ruptura

Os gráficos 6.21 a 6.50 apresentam os resultados correspondentes aos ensaios 01, 04, 09, 10, 13, 14, 15 e 16 (tabela 4.1), ou seja, cada um dos protótipos foi levado à ruptura mediante a aplicação de cargas concentradas, conforme descrito no item 4.1.1.

Nos gráficos 6.21 e 6.22 os resultados numéricos se confundem com os experimentais, até um certo nível de carregamento, onde é percebida a ocorrência da ruptura, pelo programa, próxima à sobrecarga de 10 KN.

Nos gráficos sobrecarga-flecha nas seções a um quarto do vão, os resultados experimentais não estão plotados até a ruptura, os defletômetros atuantes nestas posições foram retirados assim que seu curso total foi atingido, não sendo efetuadas leituras experimentais para estas posições a partir de então.

Nos gráficos 6.24, 6.28, 6.32, 6.40 e 6.43, as

deformações medidas através do extensômetro mecânico apresentaram valores bem diversos dos esperados, emprestando aos gráficos um aspecto inadequado. Nos ensaios mostrados nos gráficos 6.49 e 6.50 este equipamento não foi utilizado.

Os gráficos sobrecarga-flecha na seção central apresentam também a carga para a qual foi percebida a primeira fissura, a olho nu, e a carga de ruptura obtida pelo processo analítico.

Os protótipos D e E foram ensaiados em idade desconhecida, pois foram tomados de forma aleatória, de uma partilha diferente da que faziam parte os demais protótipos.

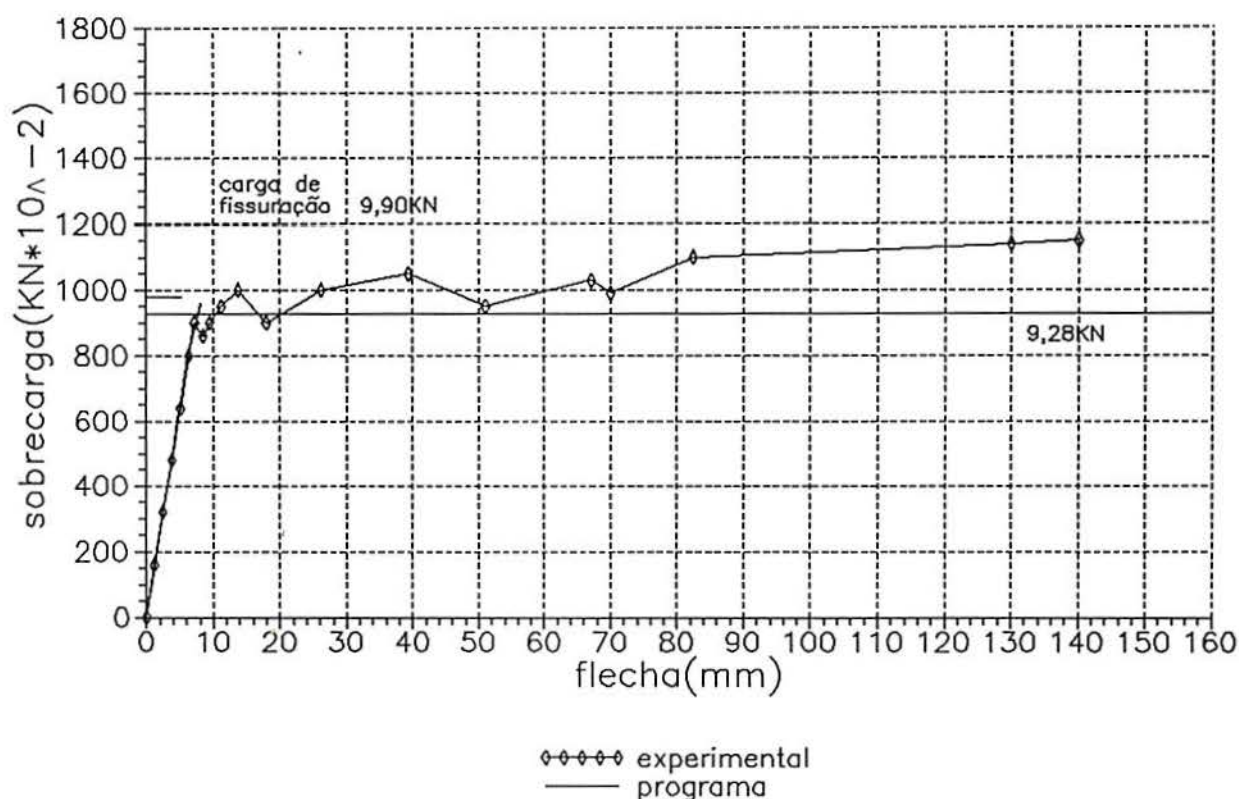


Gráfico 6.21 - Flechas na seção central do protótipo A1, mediante carregamento concentrado aplicado aos 144 dias de idade, após retirada da carga de serviço distribuída (quarto ensaio no protótipo A1)



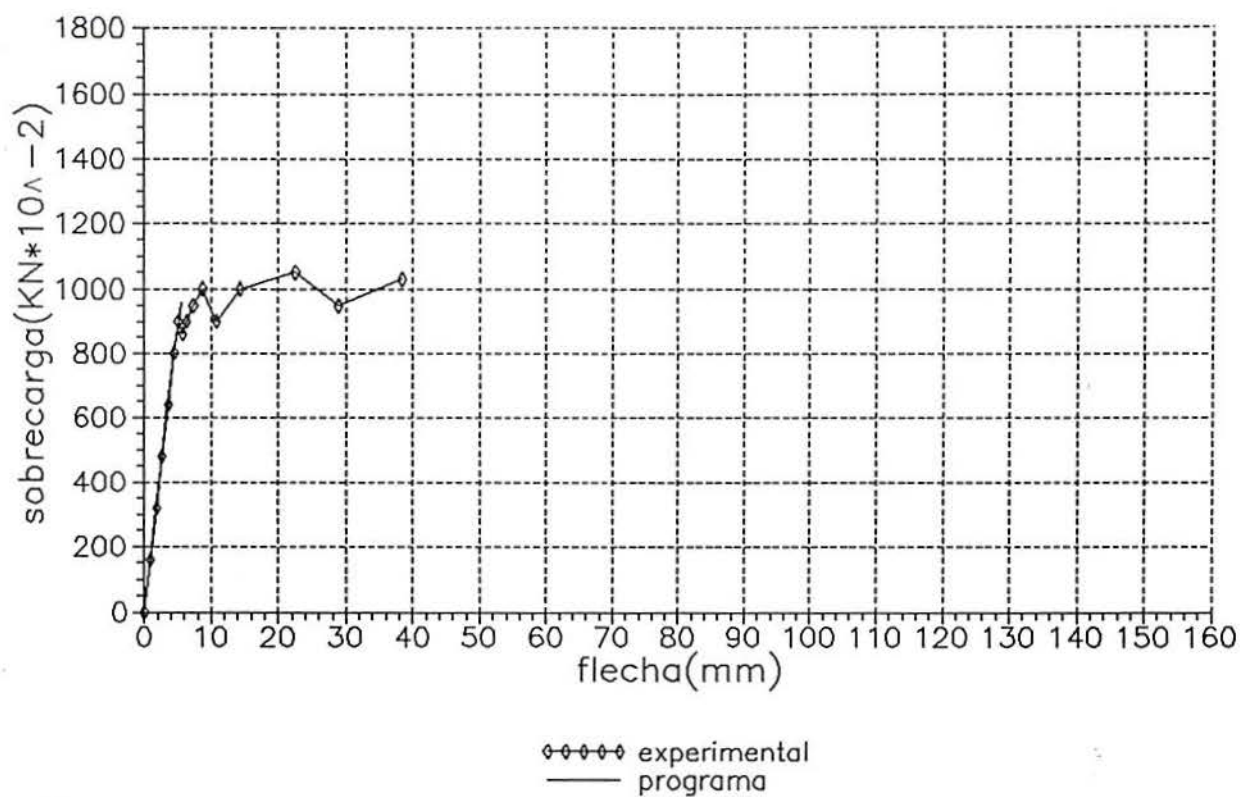


Gráfico 6.22 - Flechas na seção a um quarto do vão (quarto ensaio no protótipo A1)

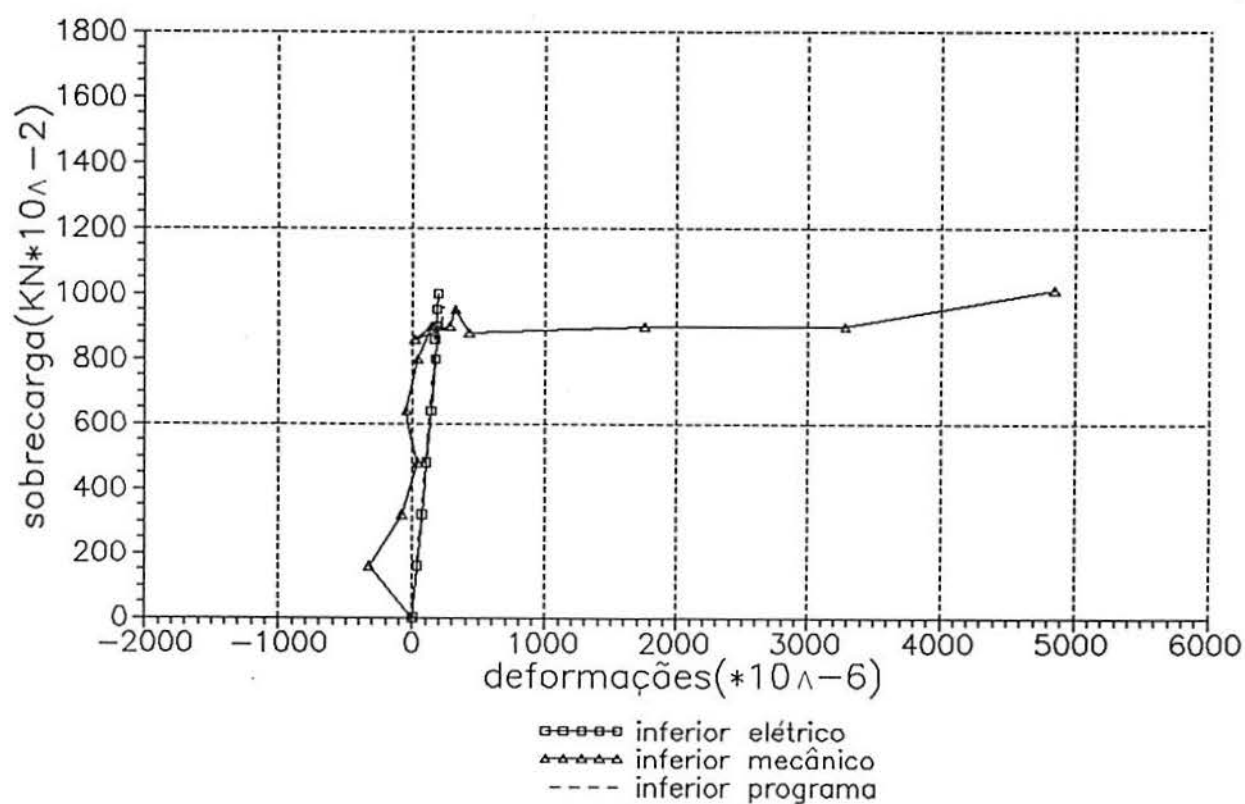


Gráfico 6.23 - Curva sobrecarga-deformações na face inferior da seção central (quarto ensaio no protótipo A1)

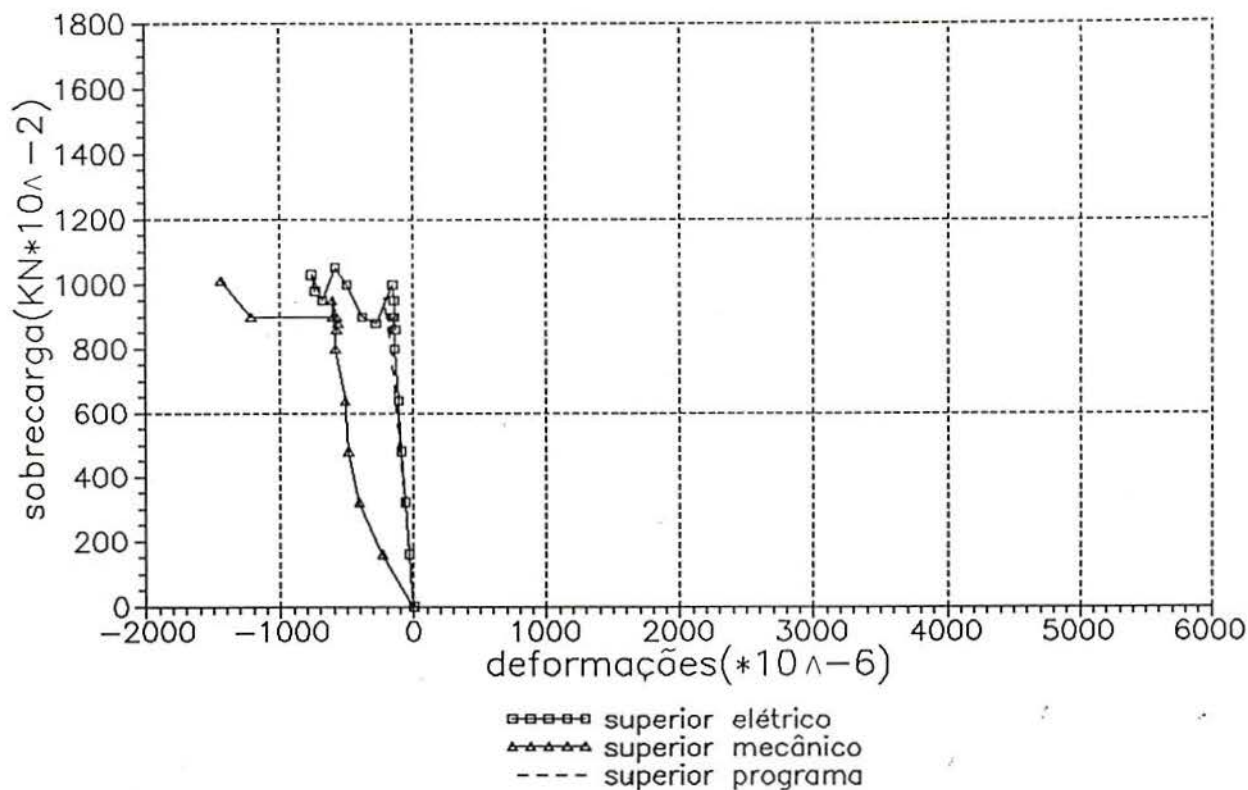


Gráfico 6.24 - Curva sobrecarga-deformações na face superior da seção central (quarto ensaio no protótipo A1)

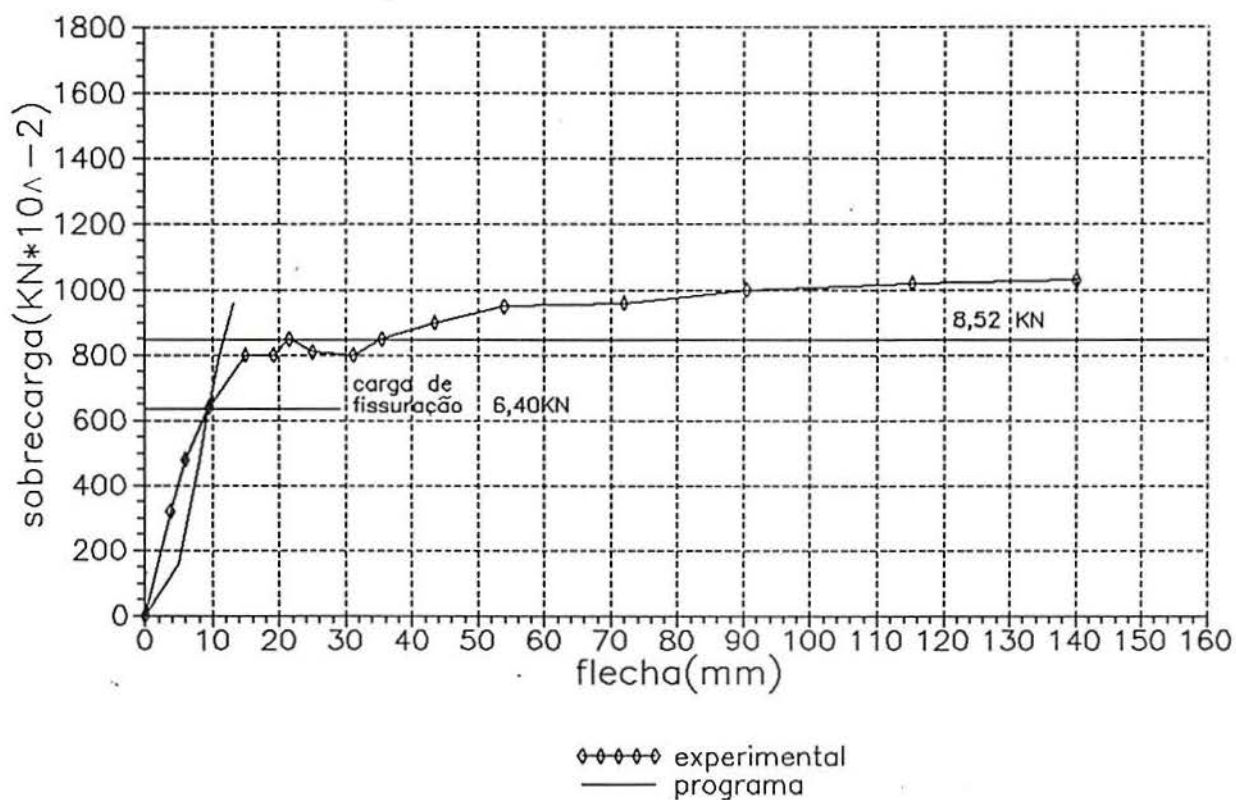


Gráfico 6.25 - Flechas na seção central do protótipo B2, mediante carregamento concentrado aplicado aos 144 dias de idade, após retirada da carga de serviço distribuída (quarto ensaio no protótipo B2)

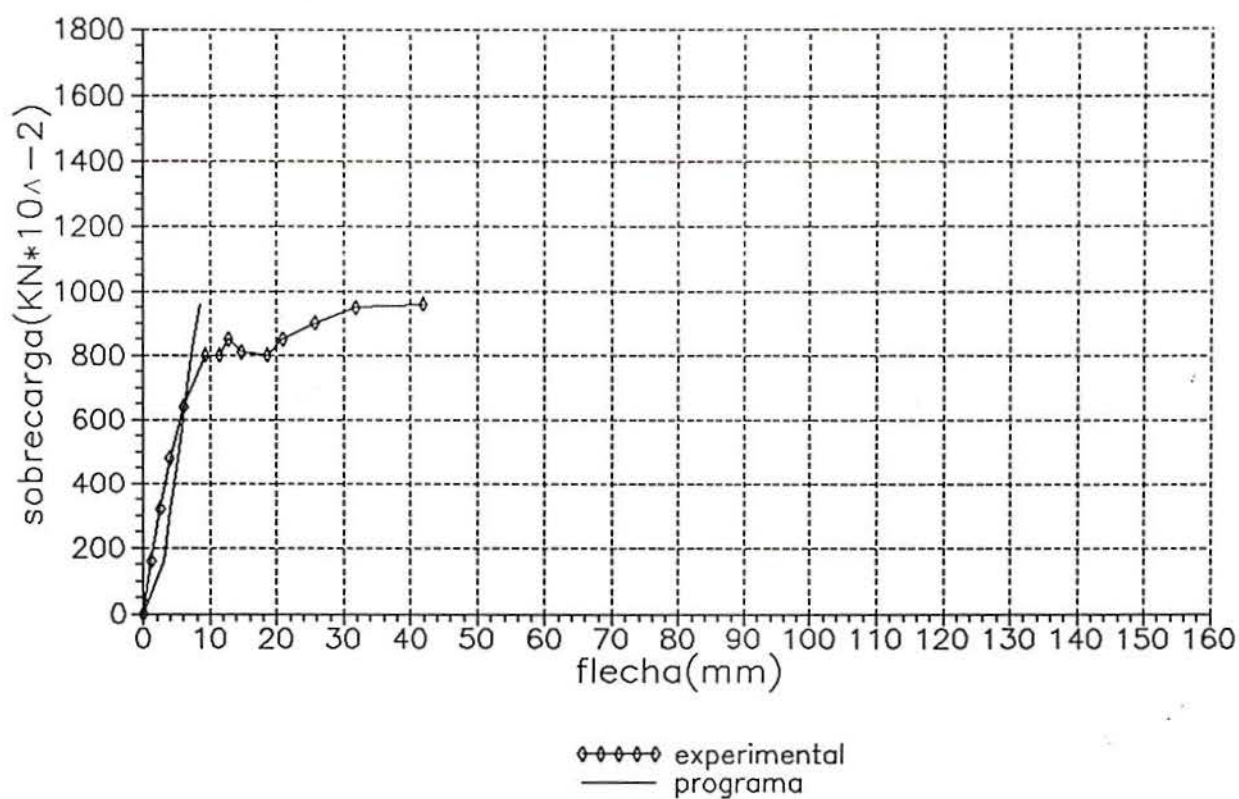


Gráfico 6.26 - Flechas na seção a um quarto do vão (quarto ensaio no protótipo B2)

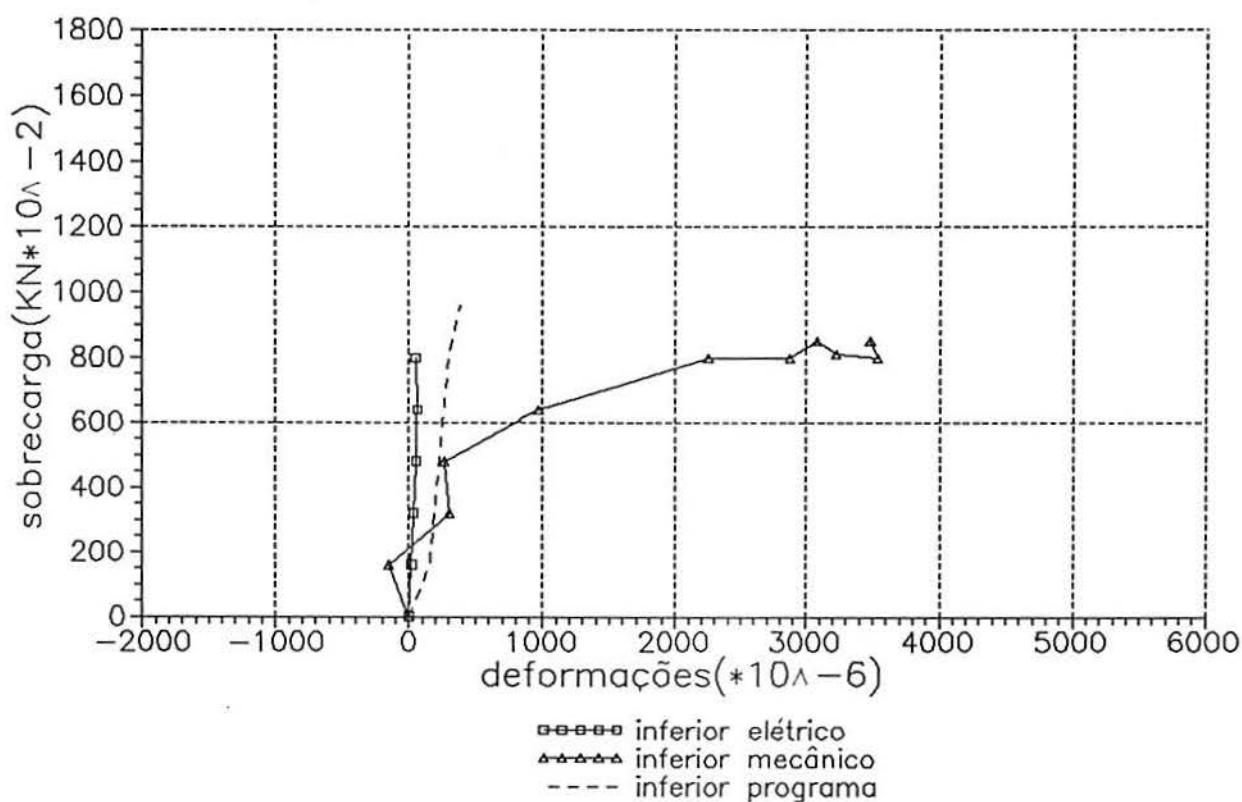


Gráfico 6.27 - Curva sobrecarga-deformações na face inferior da seção central (quarto ensaio no protótipo B2)

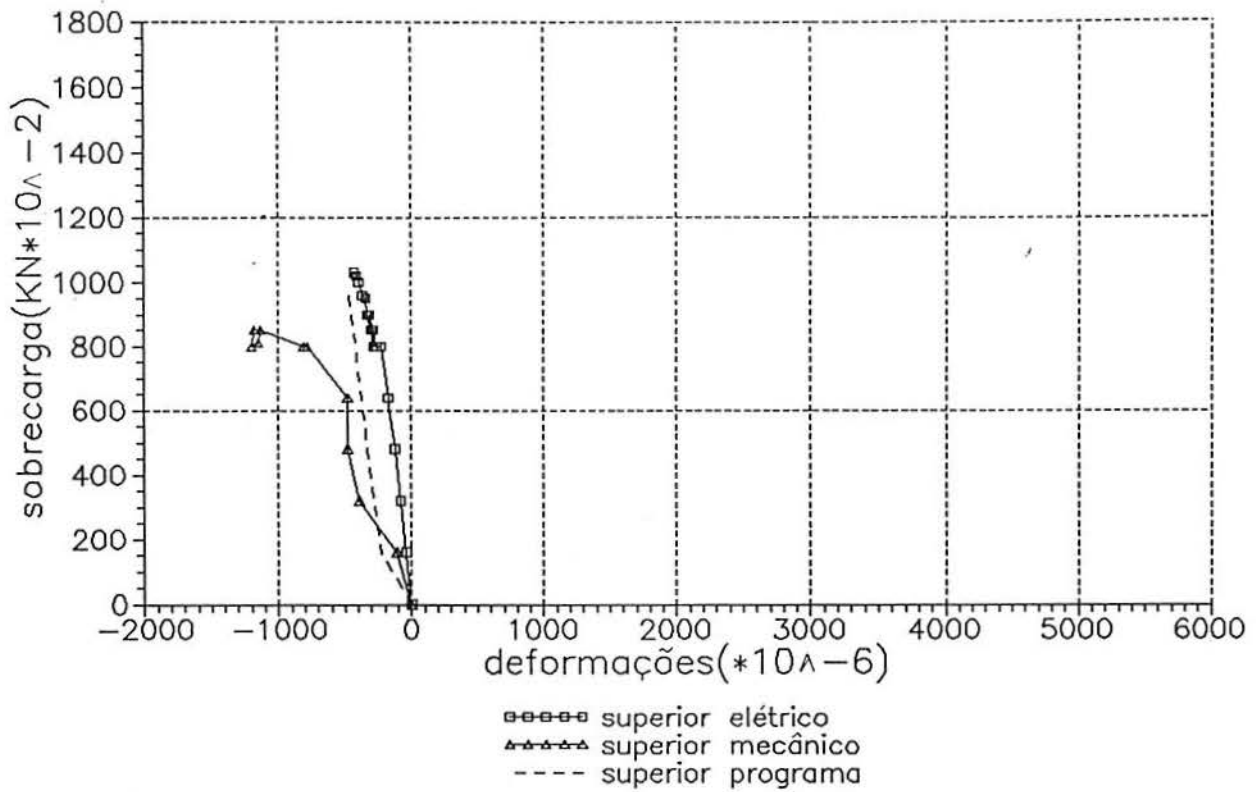


Gráfico 6.28 - Curva sobrecarga-deformações na face superior da seção central (quarto ensaio no protótipo B2)

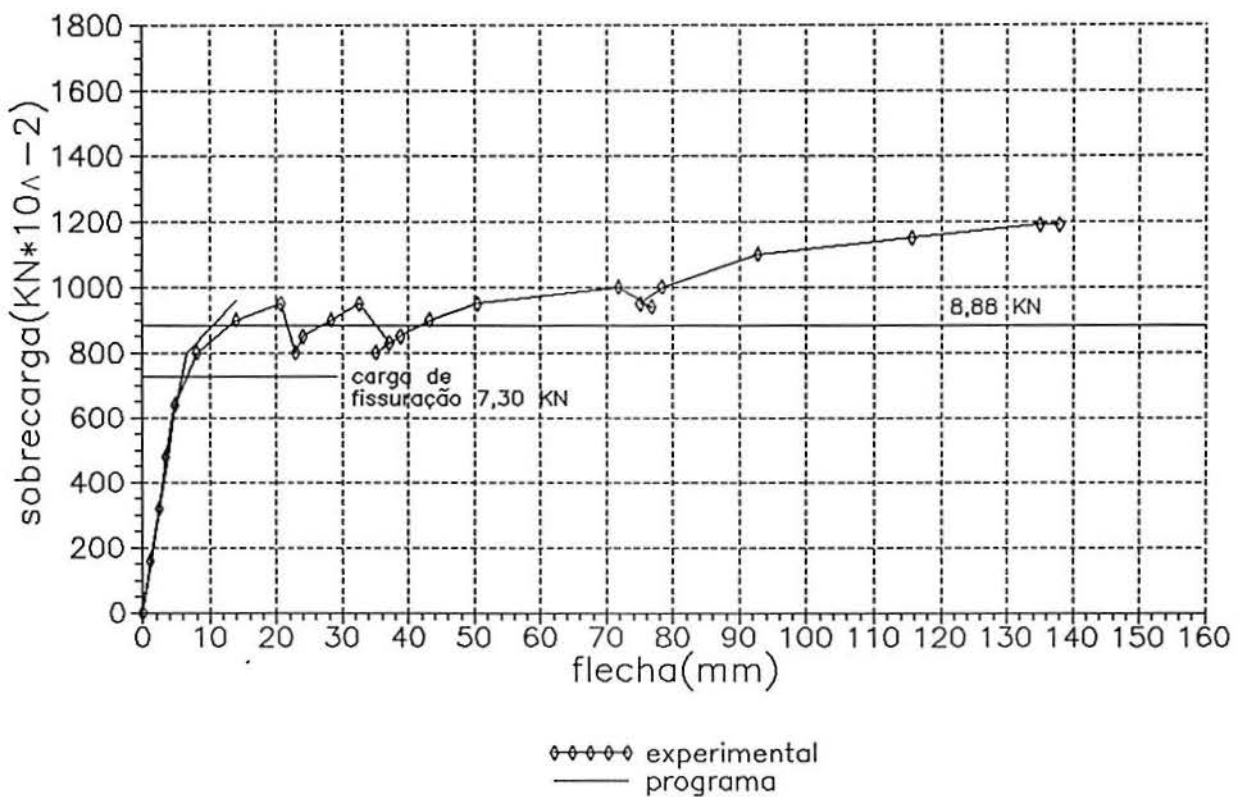


Gráfico 6.29 - Flechas na seção central do protótipo C1, mediante carregamento concentrado aplicado aos 140 dias de idade, após 124 dias sujeito somente ao peso próprio (segundo ensaio no protótipo C1)

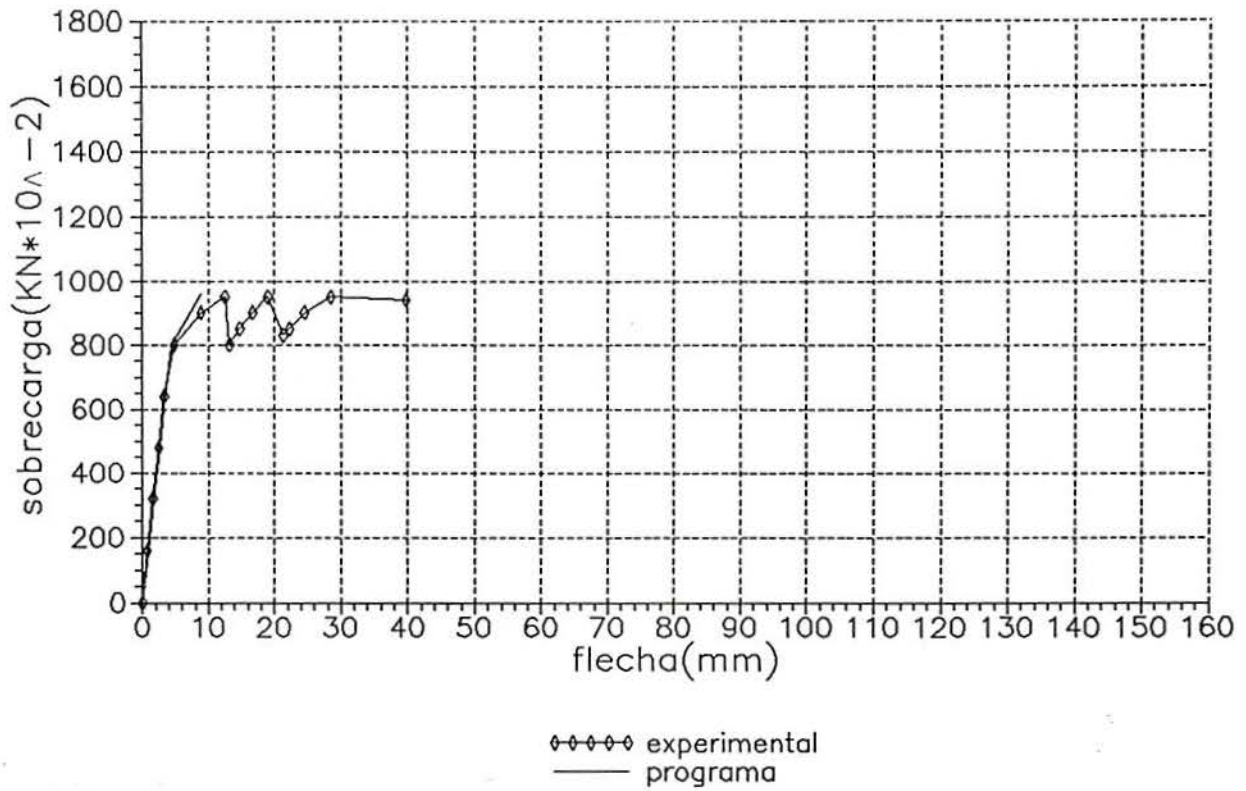


Gráfico 6.30 - Flechas na seção a um quarto do vão (segundo ensaio no protótipo C1)

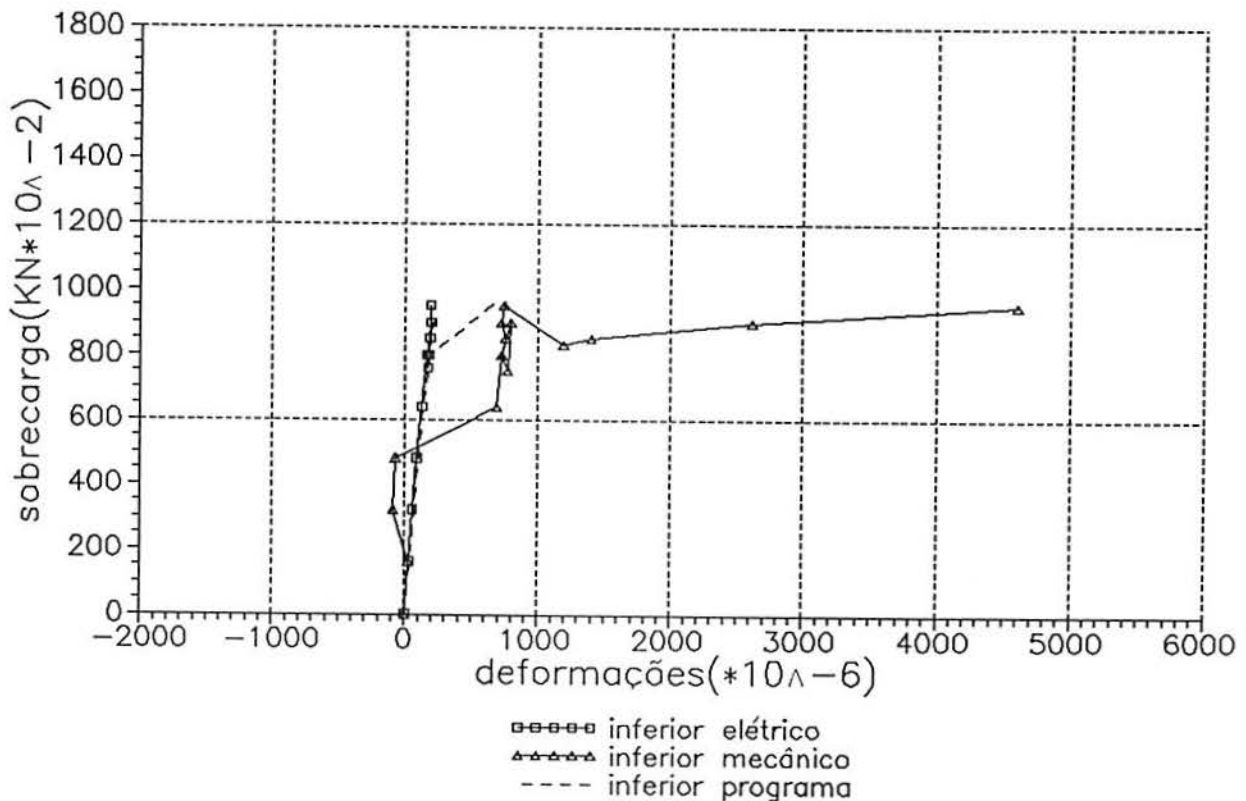


Gráfico 6.31 - Curva sobrecarga-deformações na face inferior da seção central (segundo ensaio no protótipo C1)

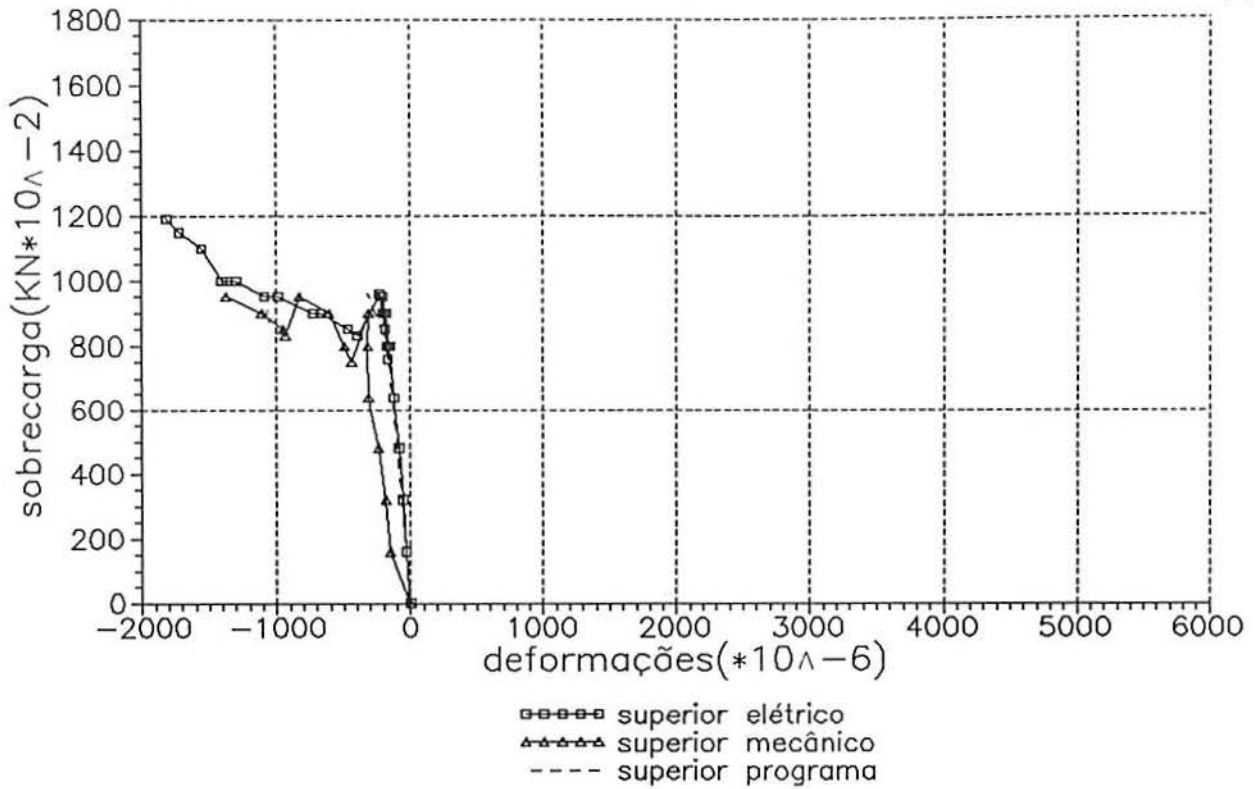


Gráfico 6.32 - Curva sobrecarga-deformações na face superior da seção central (segundo ensaio no protótipo C1)

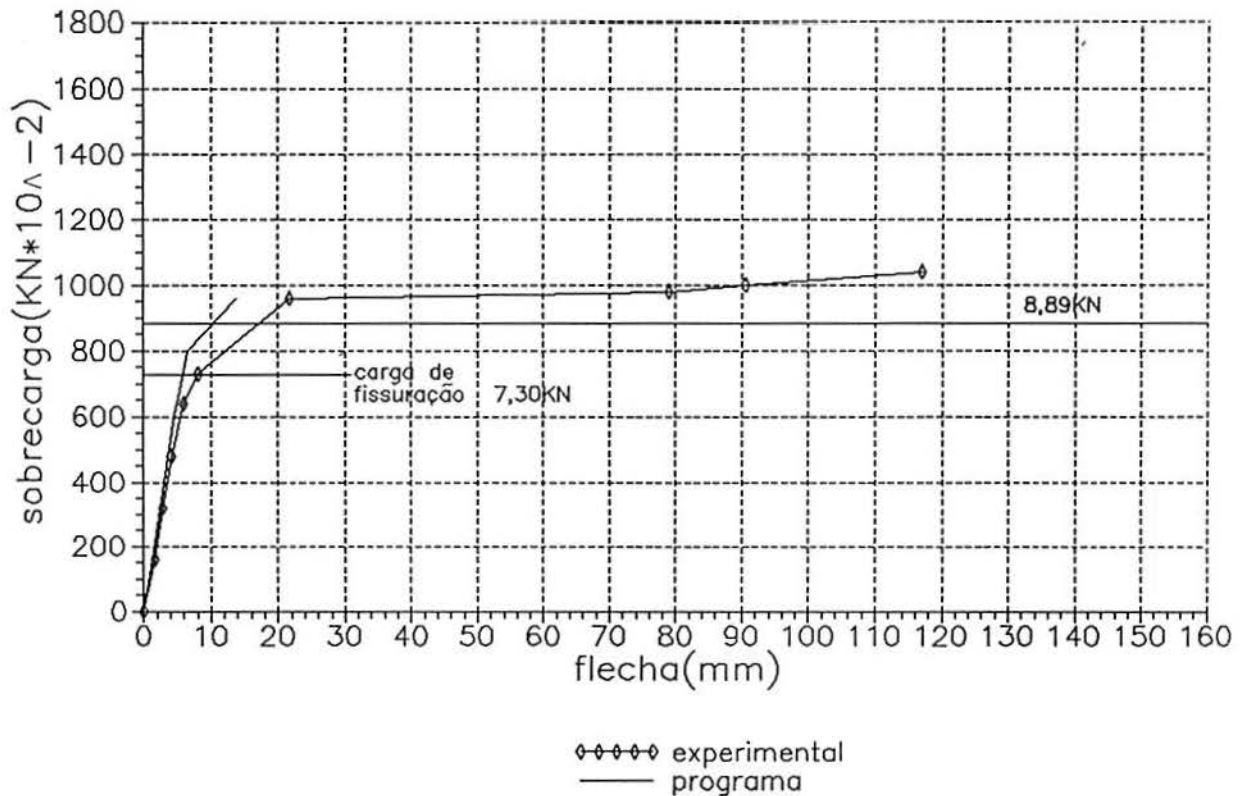


Gráfico 6.33 - Flechas na seção central do protótipo A2, mediante carregamento concentrado aplicado aos 133 dias de idade, após 136 dias sujeito somente ao peso próprio (segundo ensaio no protótipo A2)

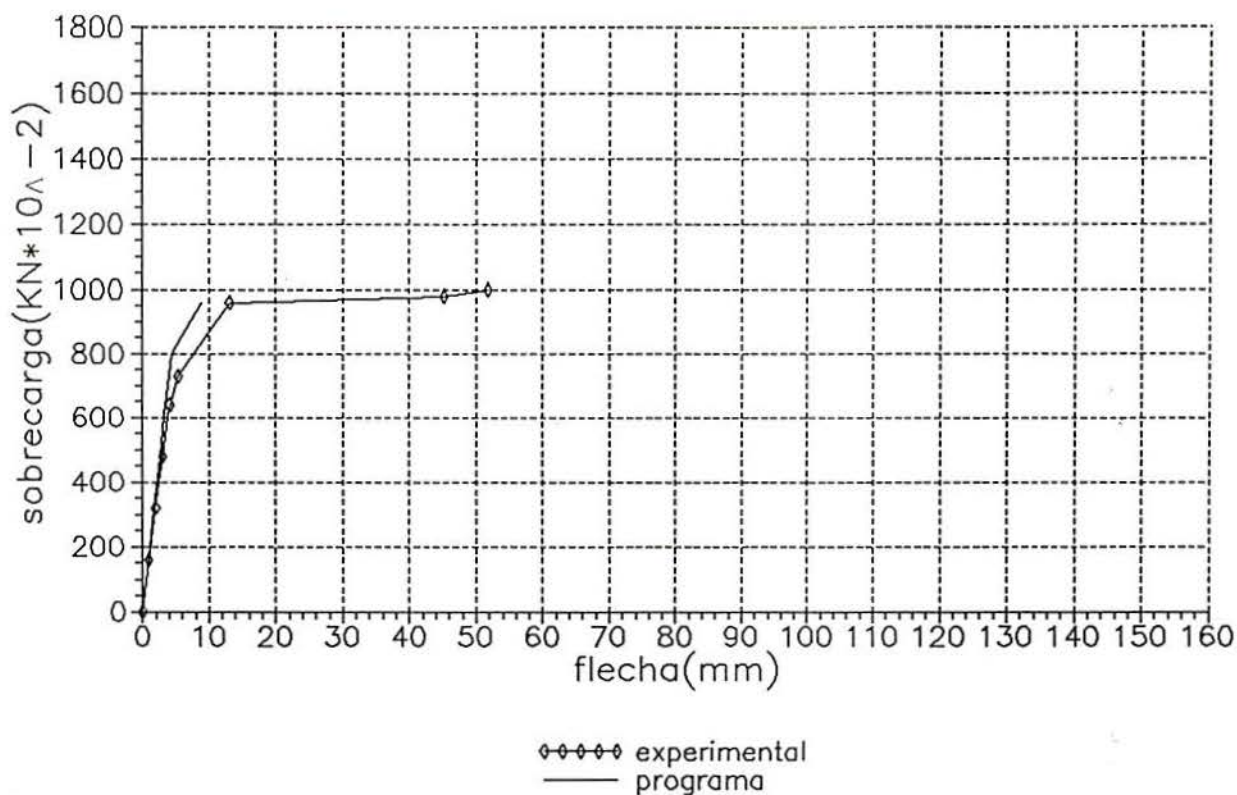


Gráfico 6.34 - Flechas na seção a um quarto do vão (quarto ensaio no protótipo A2)

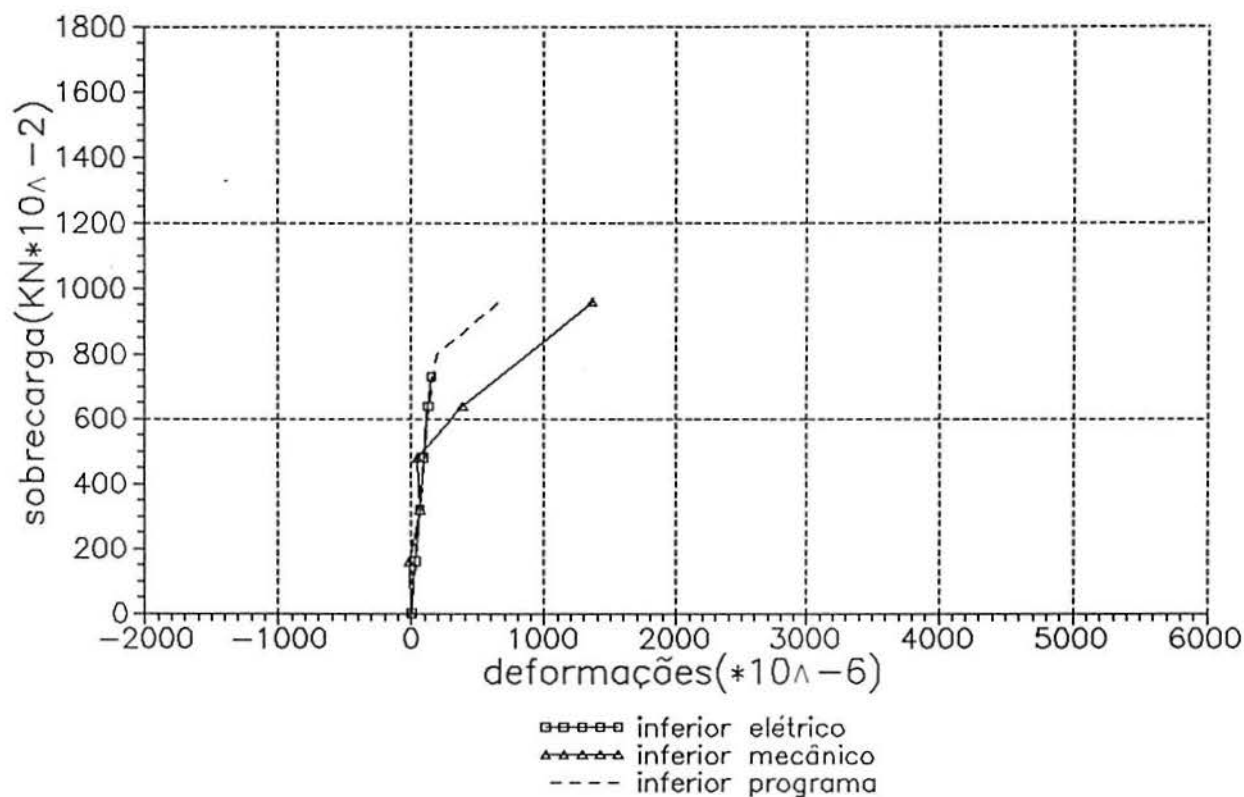


Gráfico 6.35 - Curva sobrecarga-deformações na face inferior da seção central (segundo ensaio no protótipo A2)

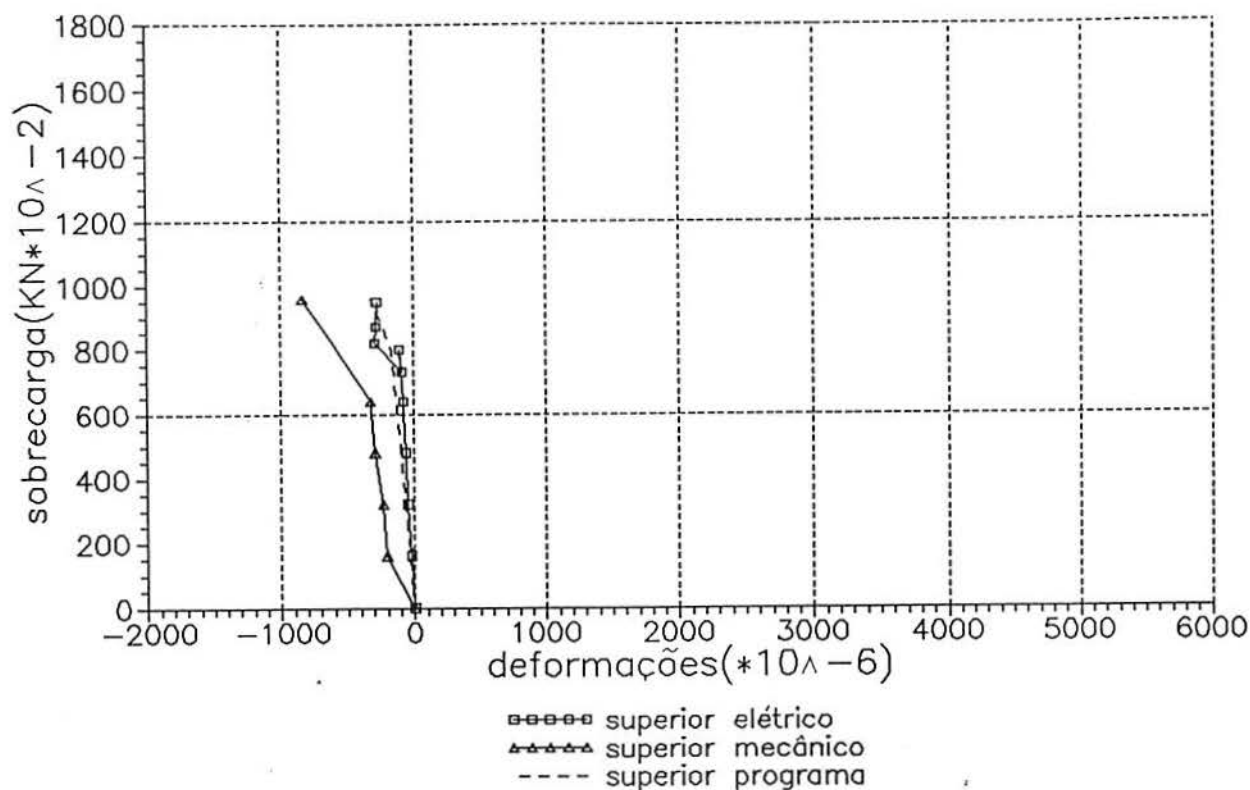


Gráfico 6.36 - Curva sobrecarga-deformações na face superior da seção central (segundo ensaio no protótipo A2)

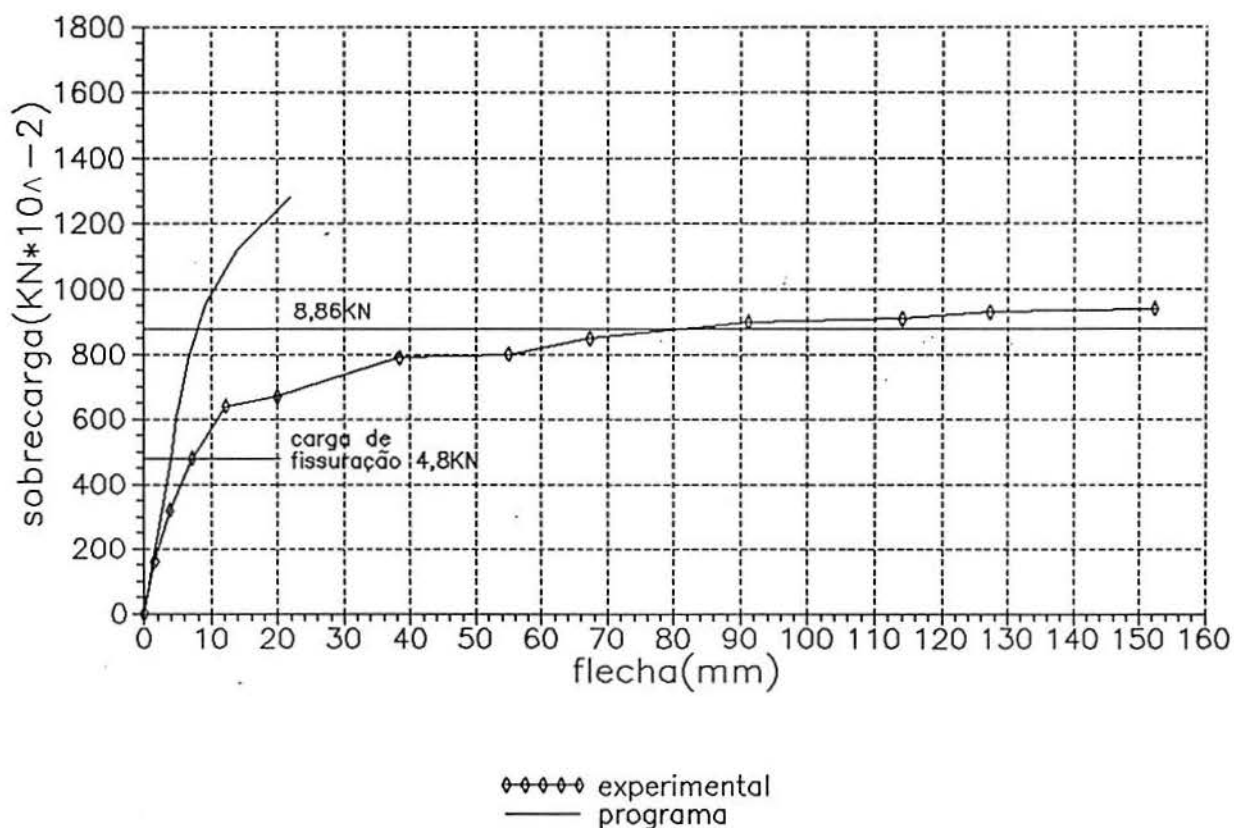


Gráfico 6.37 - Flechas na seção central do protótipo B1, mediante carregamento concentrado aplicado aos 12 dias de idade (ensaio único no protótipo B1)



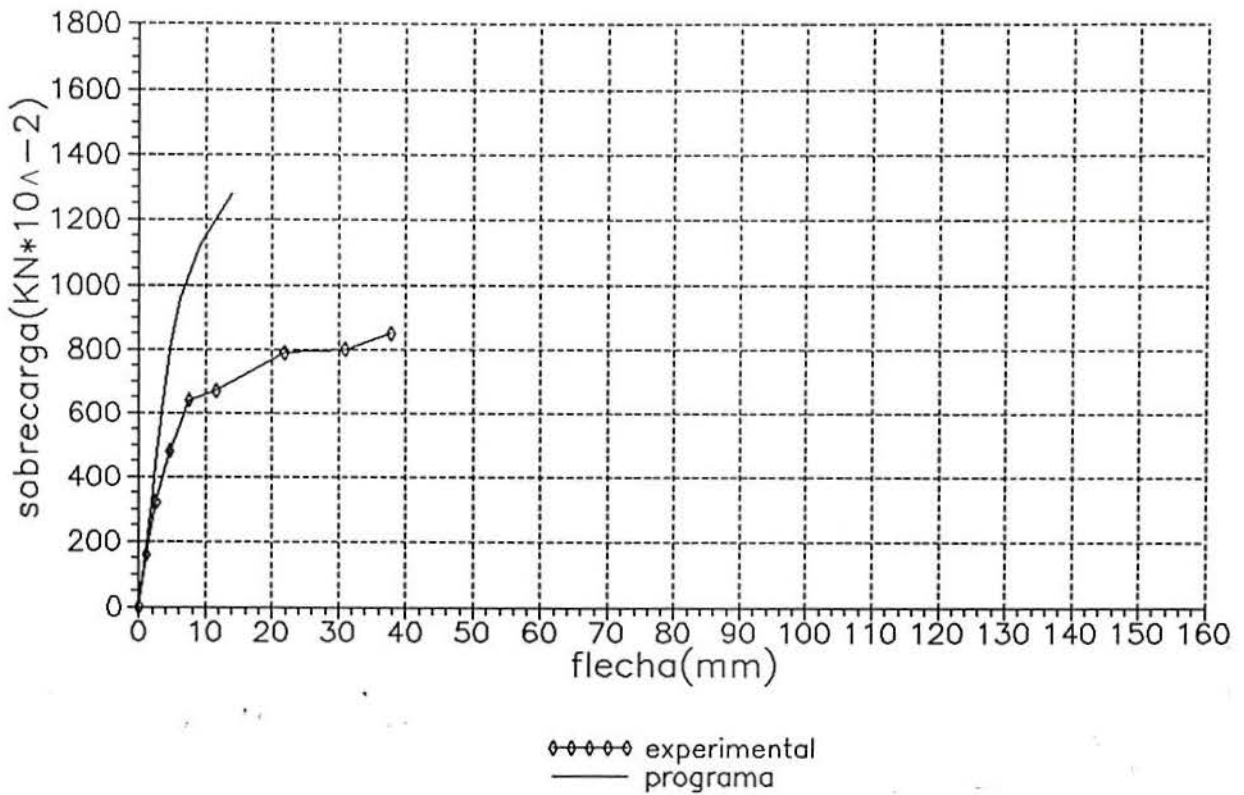


Gráfico 6.38 - Flechas na seção a um quarto do vão (ensaio único no protótipo B1)

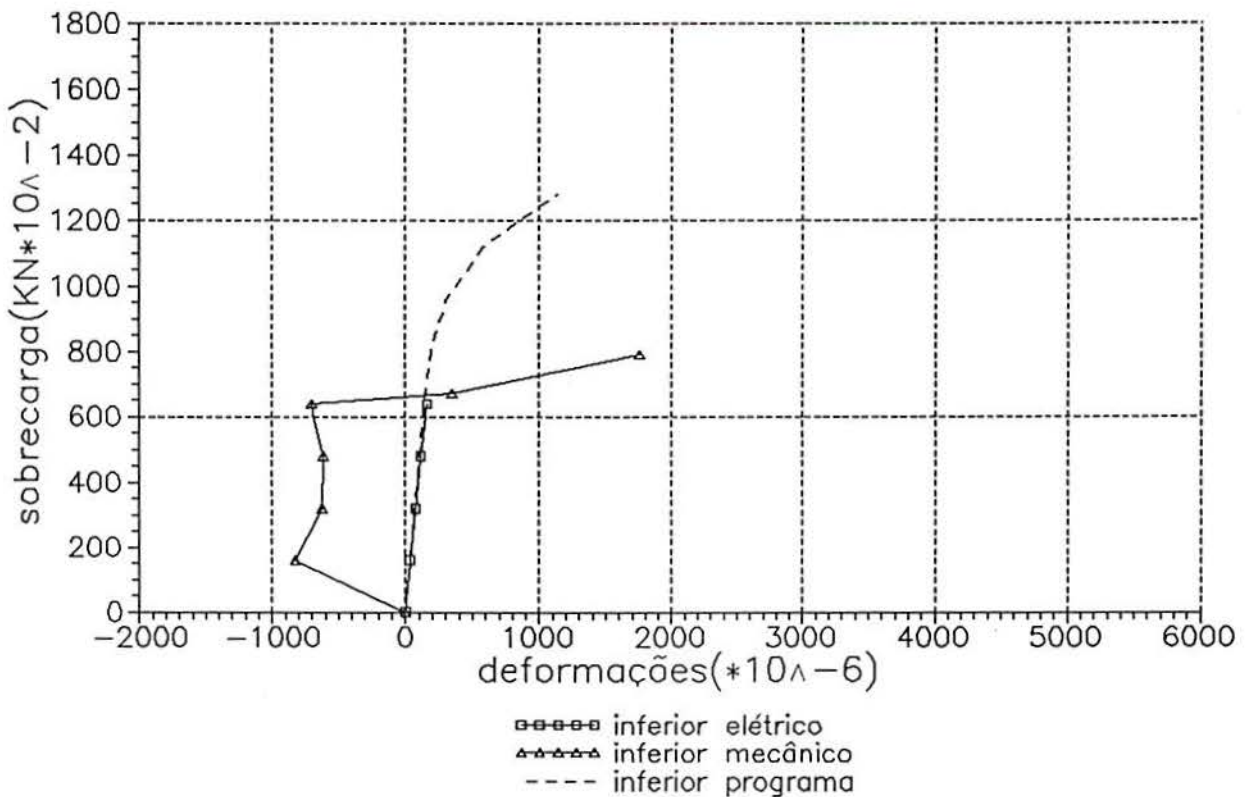


Gráfico 6.39 - Curva sobrecarga-deformações na face inferior da seção central (ensaio único no protótipo B1)

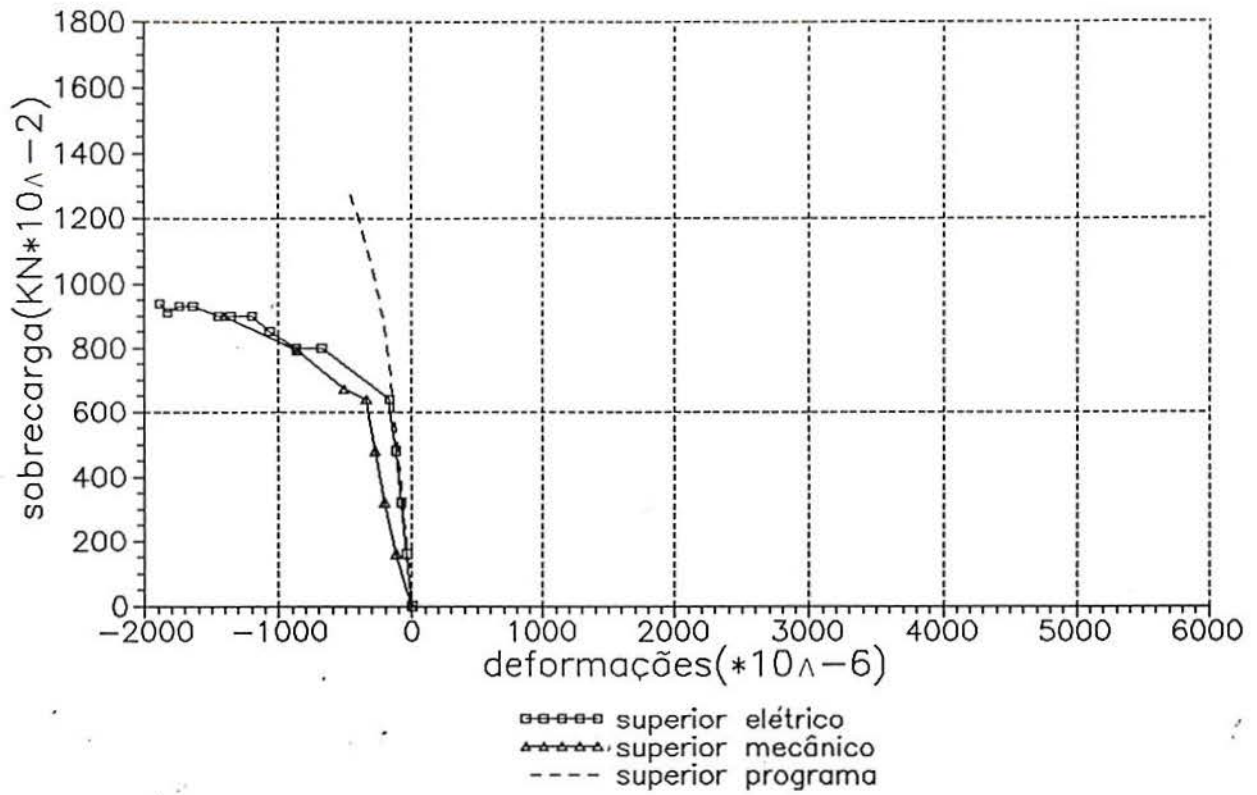


Gráfico 6.40 - Curva sobrecarga-deformações na face superior da seção central (ensaio único no protótipo B1)

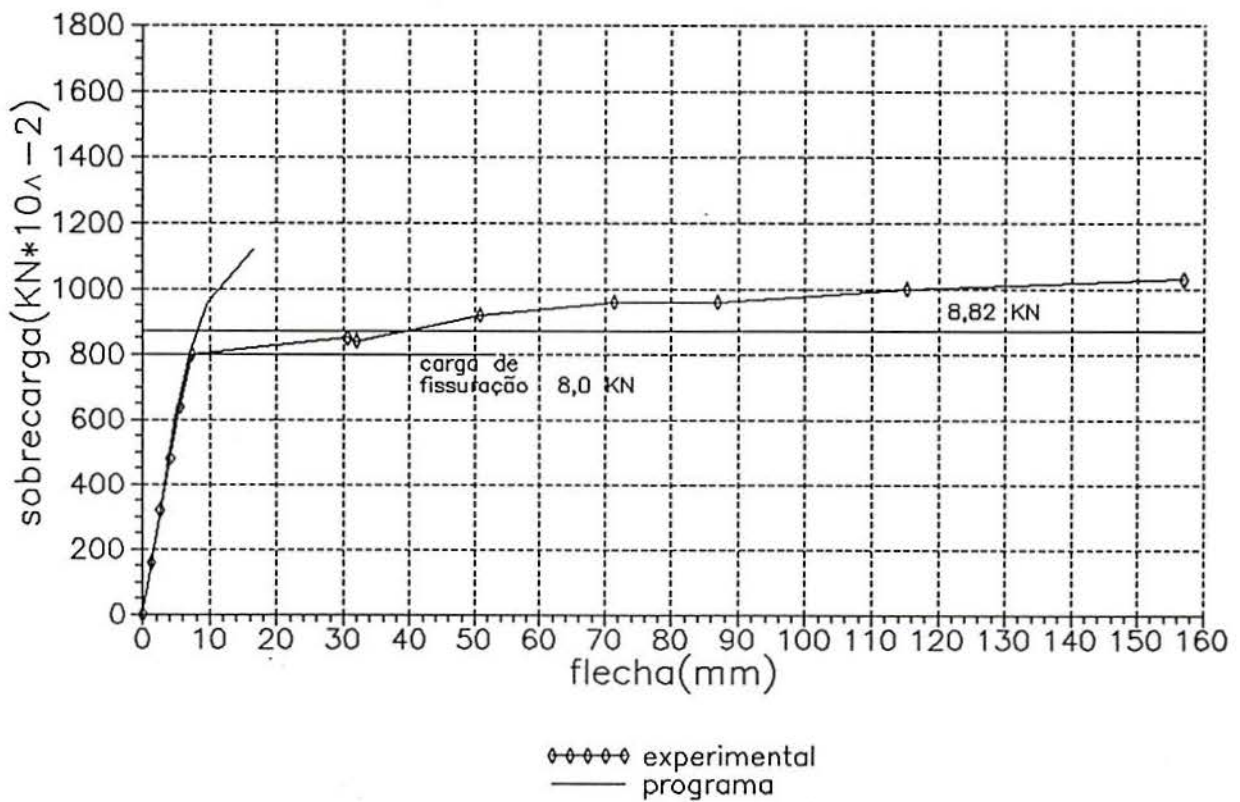


Gráfico 6.41 - Flechas na seção central do protótipo C2, mediante carregamento concentrado aplicado aos 19 dias de idade (ensaio único no protótipo C2)

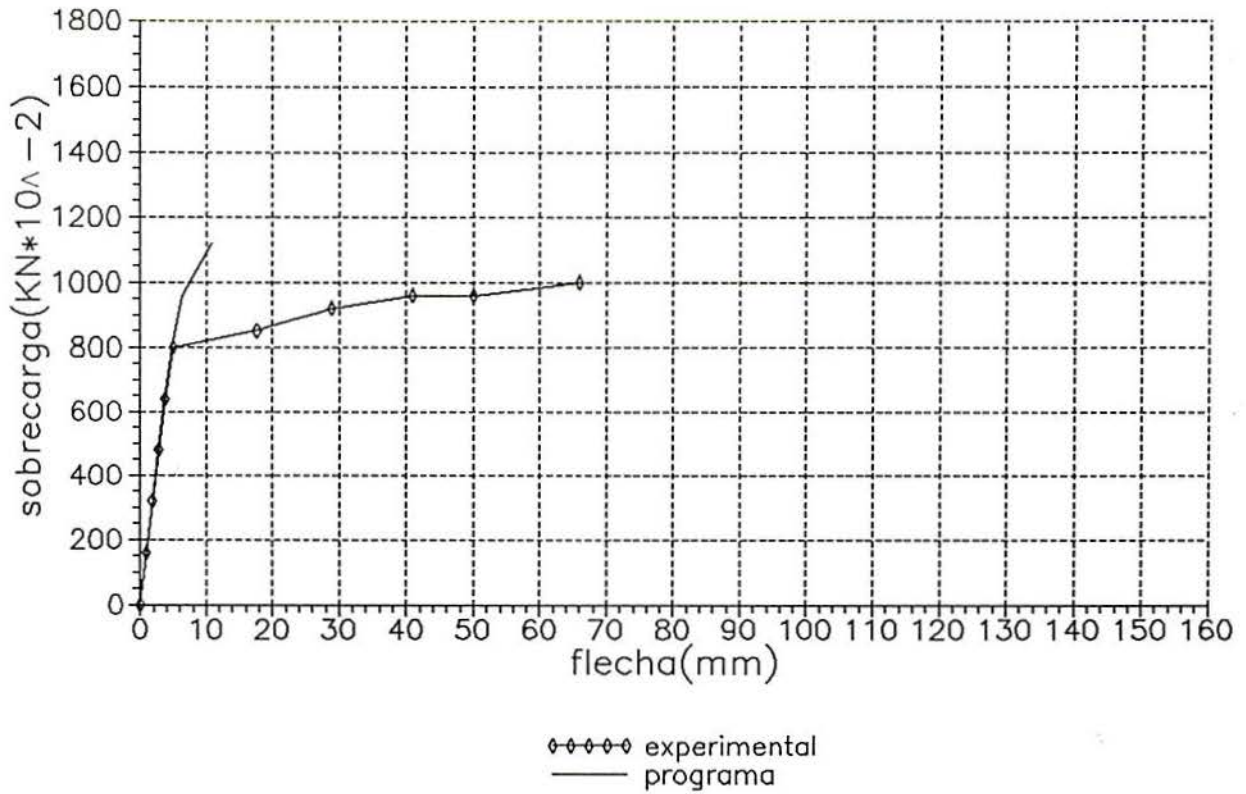


Gráfico 6.42 - Flechas na seção a um quarto do vão (ensaio único no protótipo C2)

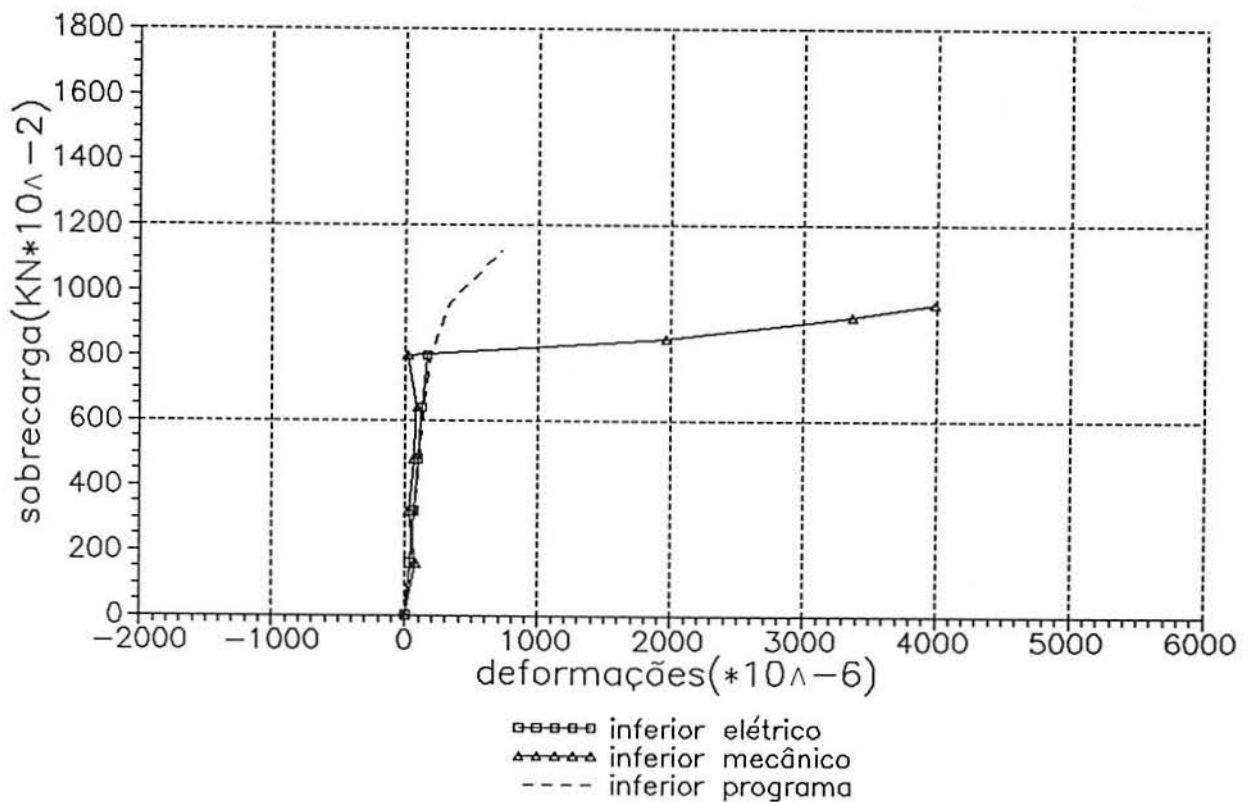


Gráfico 6.43 - Curva sobrecarga-deformações na face inferior da seção central (ensaio único no protótipo C2)

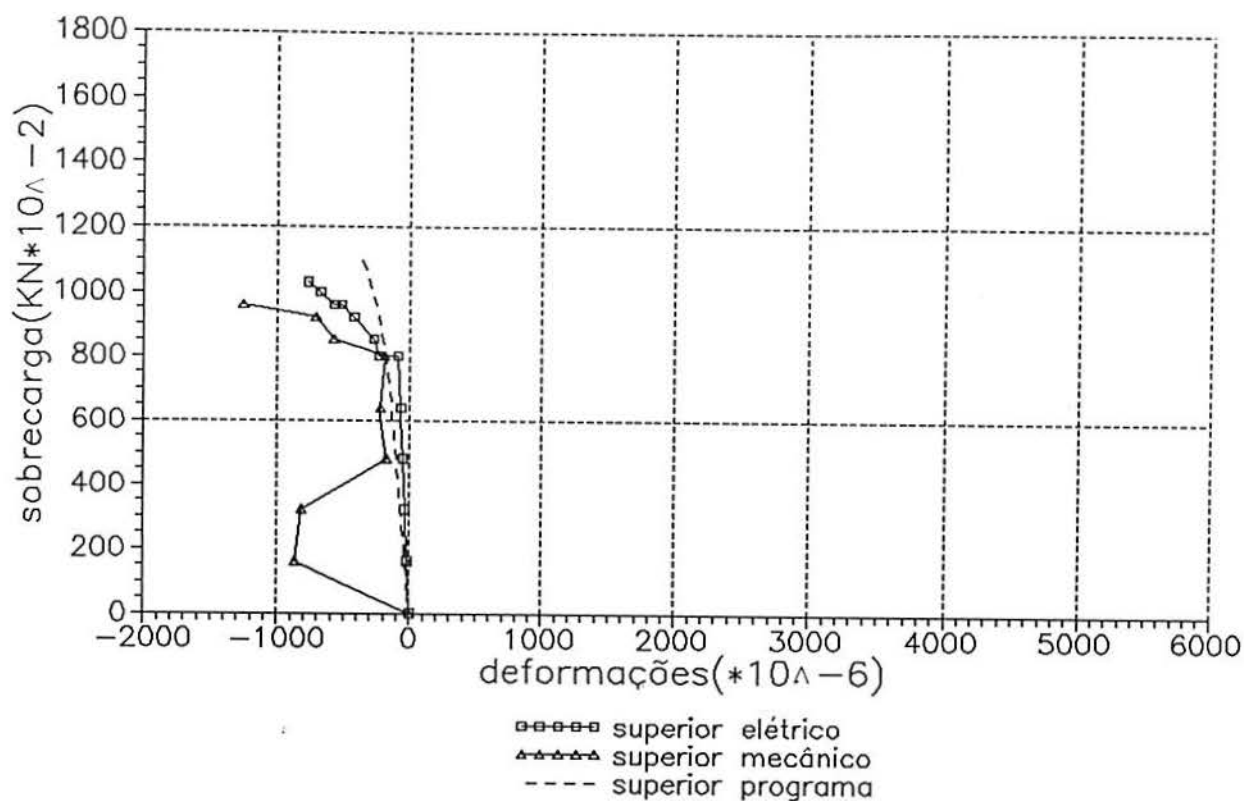


Gráfico 6.44 - Curva sobrecarga-deformações na face superior da seção central (ensaio único no protótipo C2)

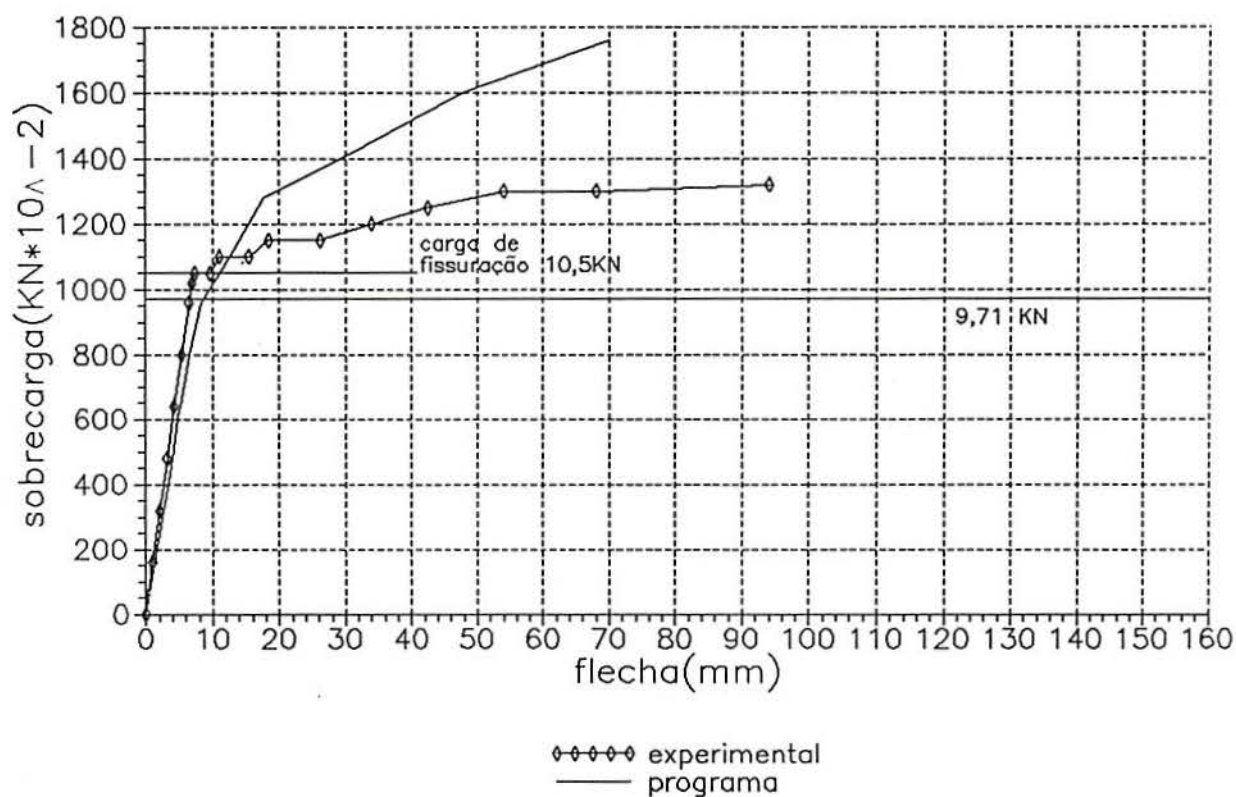


Gráfico 6.45 - Flechas na seção central do protótipo D, mediante carregamento concentrado aplicado (ensaio único no protótipo D)

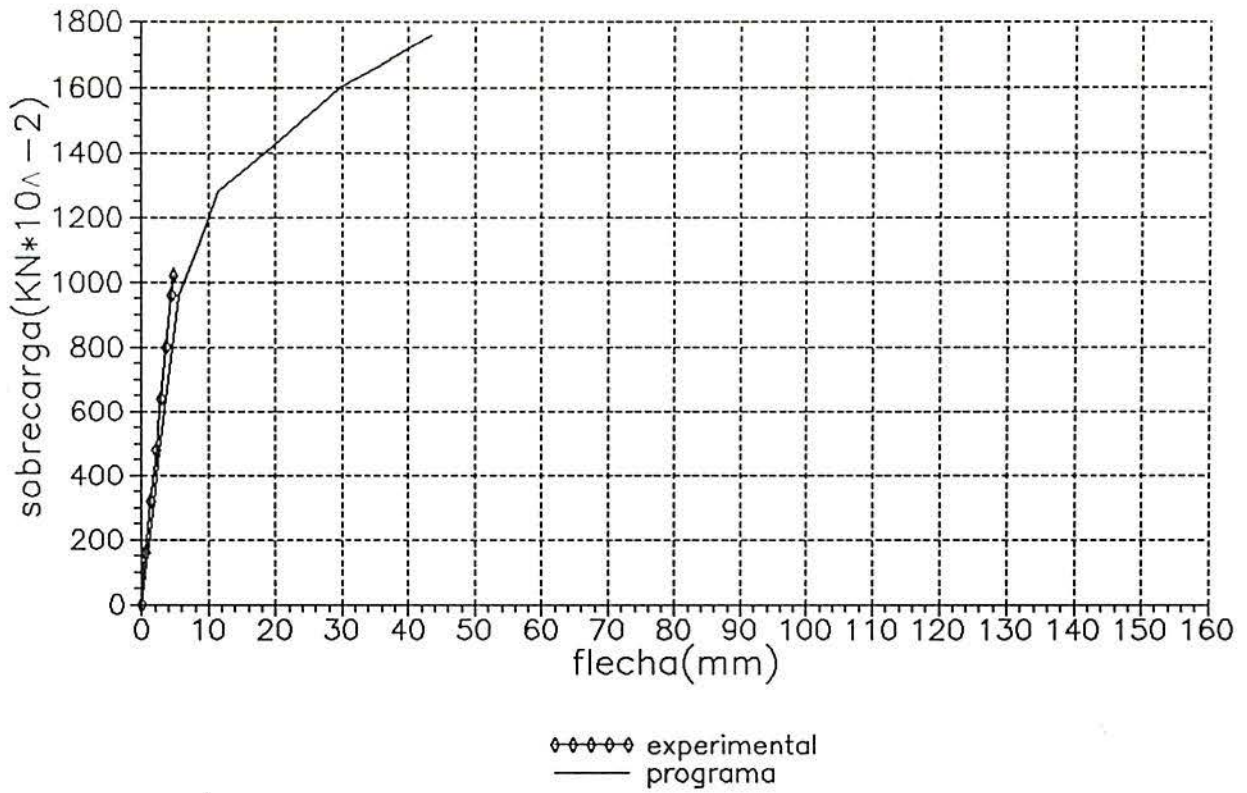


Gráfico 6.46 - Flechas na seção a um quarto do vão (ensaio único no protótipo D)

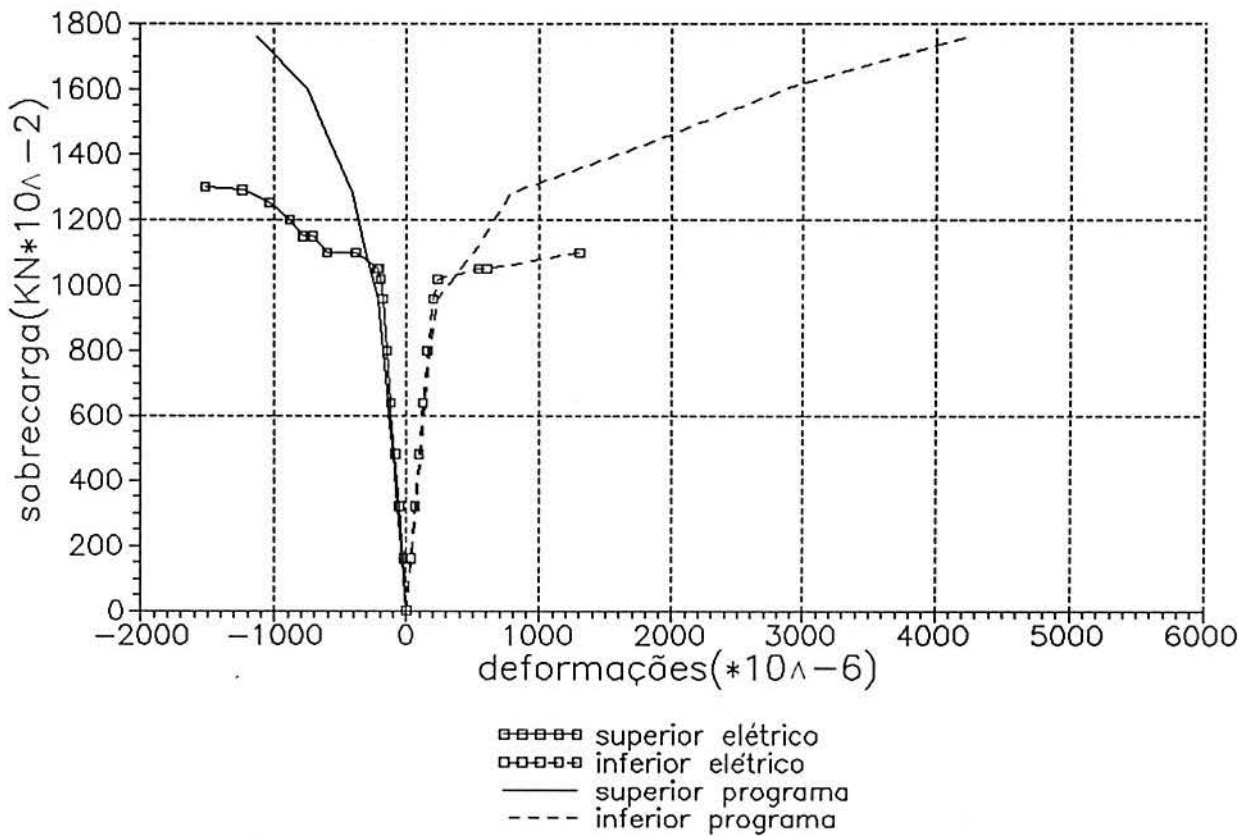


Gráfico 6.47 - Curva sobrecarga-deformações na seção central, faces superior e inferior (ensaio único no protótipo D)

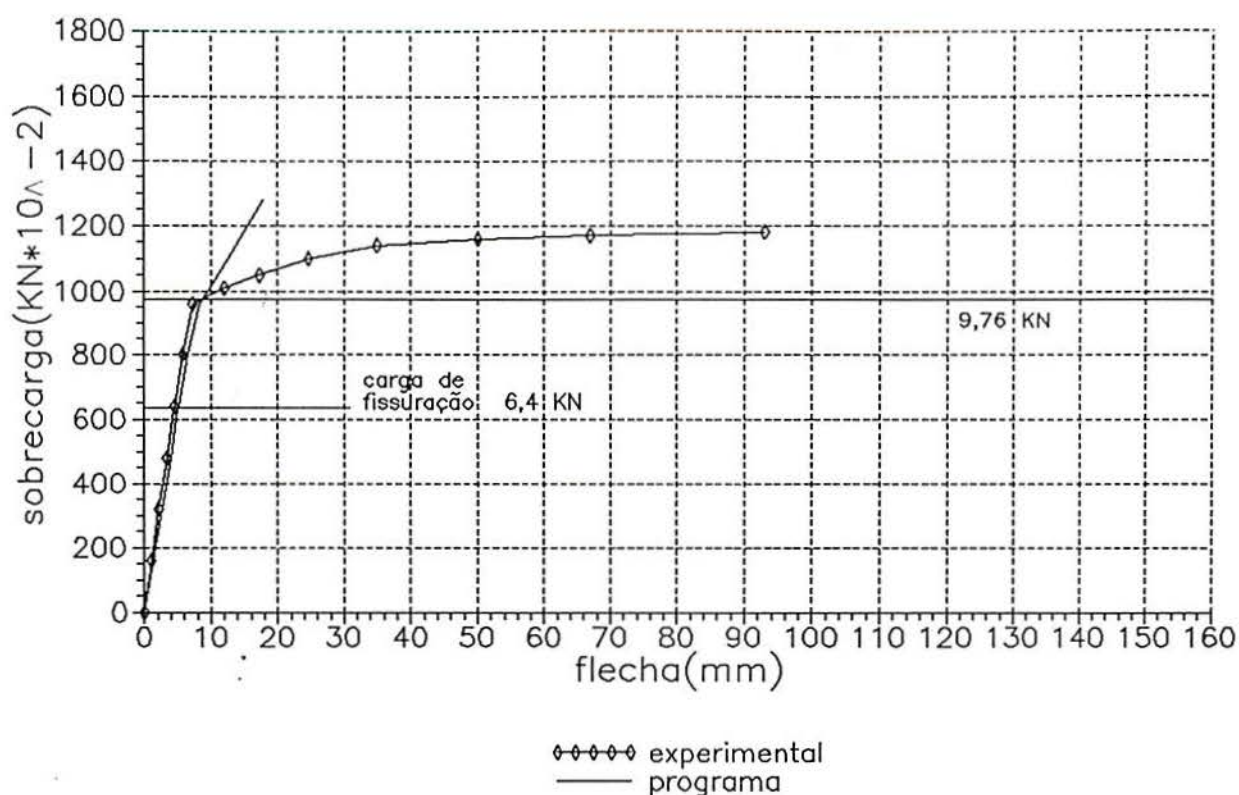


Gráfico 6.48 - Flechas na seção central do protótipo E, mediante carregamento concentrado aplicado (ensaio único no protótipo E)

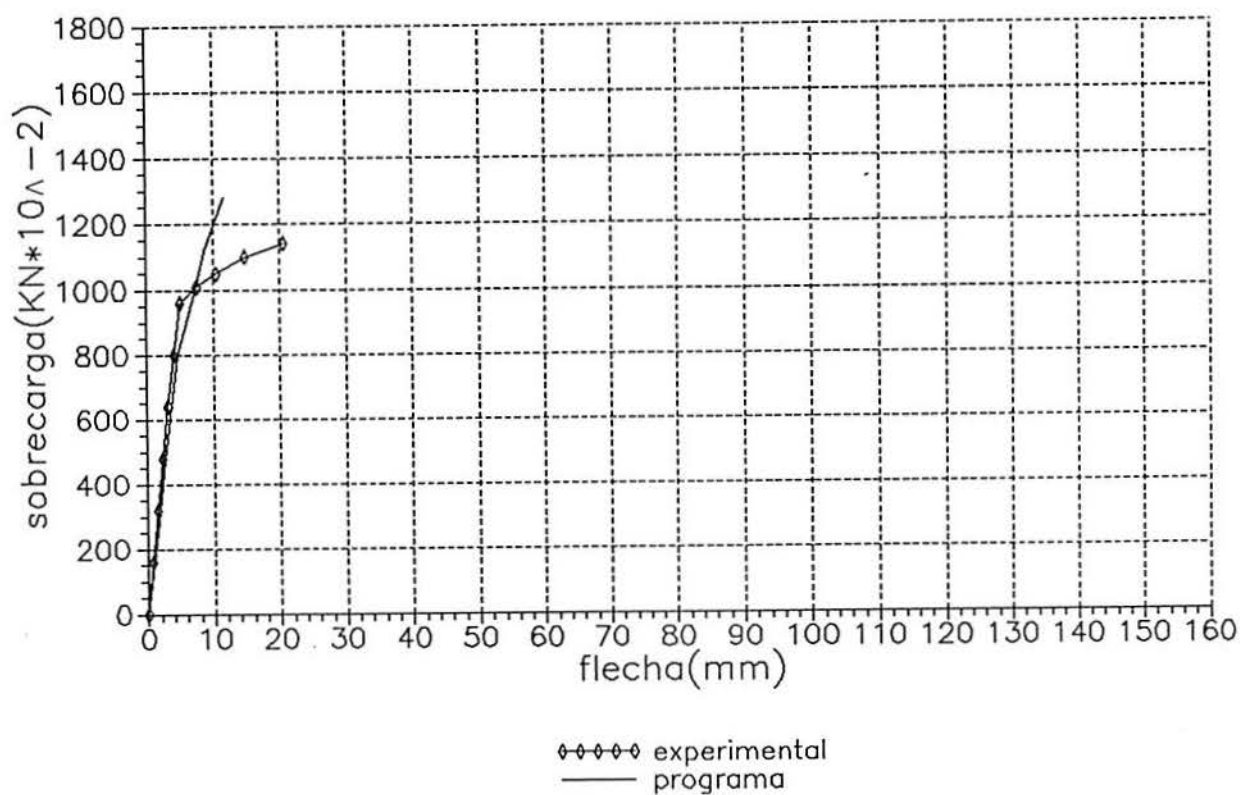


Gráfico 6.49 - Flechas na seção a um quarto do vão (ensaio único no protótipo E)

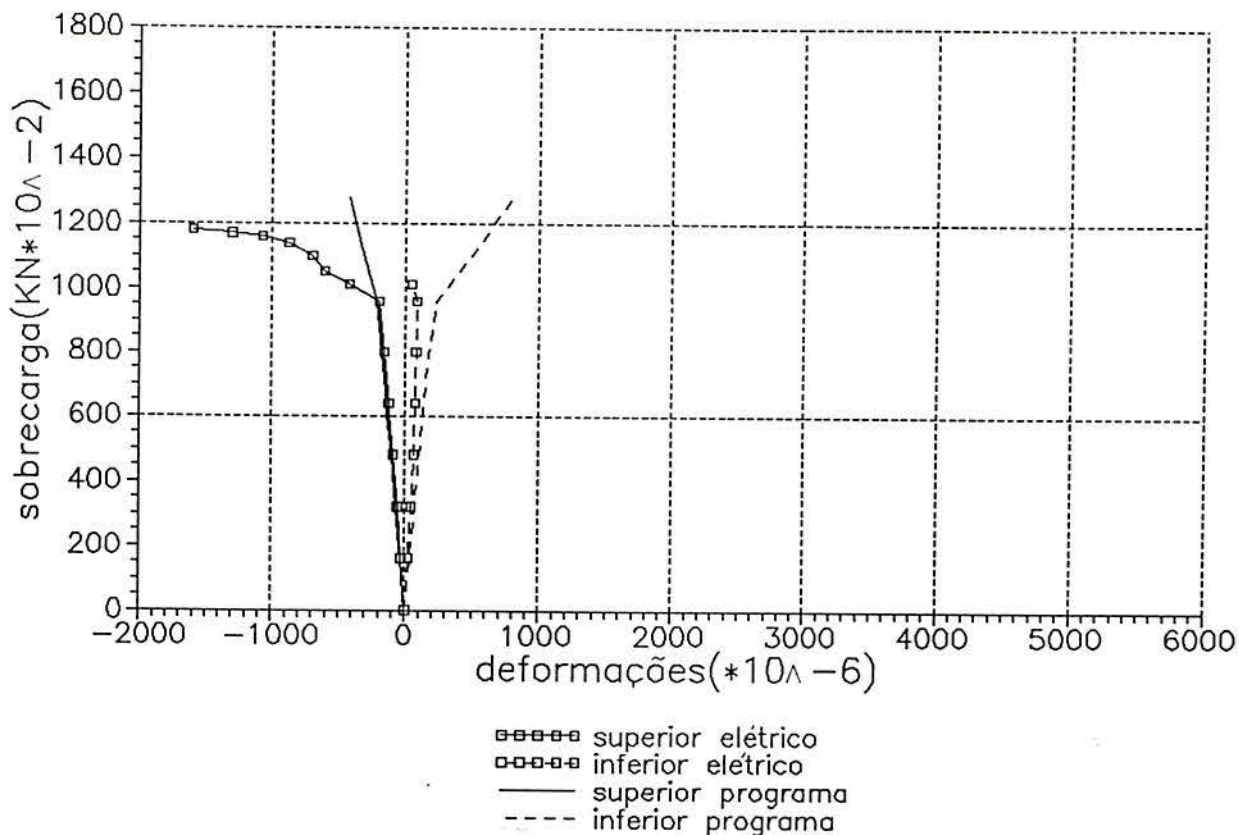


Gráfico 6.50 - Curva sobrecarga-deformações na seção central, faces superior e inferior (ensaio único no protótipo E)

#### 6.1.6 - Comparação entre momentos fletores últimos dos protótipos

A tabela 6.1 apresenta os momentos fletores últimos obtidos para os protótipos, reduzida a parcela relativa ao peso próprio e consideradas as características individuais quanto ao cobrimento (tabela 5.1). Os resultados fornecidos pelo programa VISCO consideram a história de carregamentos sofrida pelos protótipos (capítulo 4, tabela 4.1).

Para a laje 12, o valor do momento último obtido via NBR (item 5.2) é de 979,51 KN cm.

Tabela 6.1 - Comparação entre momentos fletores últimos

PROTÓTIPO	M O M E N T O Ú L T I M O (KN . cm)		
	EXPERIMENTAL	N B R	V I S C O
A1	1207,5	973,89	1008
A2	1092,0	933,44	1008
B1	987,0	929,81	1344
B2	1081,5	895,02	1008
C1	1249,5	932,08	1008
C2	1081,5	926,41	1176
D	1386,0	1019,56	1848
E	1239,0	1024,85	1344

## 6.2 - Lajes

Neste item são apresentados os resultados obtidos numericamente para os diversos tipos de lajes ROTH, cujas características nominais estão na tabela 1.1.

A tabela 6.2 fornece dados sobre a armadura contida nestas lajes.

Os resultados numéricos são comparados nas tabelas e os gráficos apresentam os resultados obtidos do programa VISCO.



Tabela 6.2 - Armadura das lajes ROTH

LAJE TIPO	A R M A D U R A			
	S U P E R I O R		I N F E R I O R	
	DESIGNAÇÃO (ABNT) $\phi$ nominal (mm)	NÚMERO DE CORDOALHAS	DESIGNAÇÃO (ABNT) $\phi$ nominal (mm)	NÚMERO DE CORDOALHAS
8	CP180RN 3X2,5	2	CP180RN 3X3,0	4
12	CP180RN 3X2,5	2	CP180RN 3X3,0	4
12 S	CP180RN 3X2,5	2	CP180RN 3X3,0	6
12SS	CP180RN 3X2,5	2	CP180RN 3X3,0	8
16	CP180RN 3X2,5	2	CP180RN 3X3,0	8
16 S	CP180RN 3X2,5	2	CP180RN 3X3,0	10
20	CP180RN 3X2,5	2	CP180RN 3X3,0	10
20 S	CP180RN 3X2,5	4	CP180RN 3X3,0	12
24	CP180RN 3X2,5	4	CP180RN 3X3,0	12
24 S	CP180RN 3X3,0	4	CP180RN 3X3,0 CP175RN 9,5 *	2 6
24SS	CP180RN 3X3,0	6	CP175RN 9,5 *	8

\* Cordoalha de 7 fios

### 6.2.1 - Influência da posição das armaduras no momento fletor último das lajes

Todas as lajes ROTH têm um cobrimento teórico fixado em 1,7 cm. Partindo dos cobrimentos médios observados para os protótipos (tabela 5.1) foi constatada a variabilidade máxima de 1,45 cm, além do valor teórico, ou seja, foram observados cobrimentos até 85% acima do valor teórico. Em nenhum dos protótipos entretanto, ocorreu cobrimento abaixo do valor teórico.

A NBR 7197 (1989) prevê, no caso da pré-tração, que devem ser respeitadas as exigências da NBR 9062, contudo, o cobrimento não deve ser menor do que 1,5 cm (Wolff, 1990).

As tabelas 6.3.a e 6.3.b apresentam os resultados obtidos para o momento último da seção, com aumento e com redução do cobrimento teórico, respectivamente, através do método referenciado no item 5.2.1. Com a redução do cobrimento teórico tem-se um aumento da altura útil da seção de concreto ( $d$ ) e, conseqüentemente, um aumento no momento fletor último, no entanto, como o cobrimento não deve ser menor do que 1,5 cm, a variação do cobrimento, fica limitada em -11,8% do valor

teórico, o que representa um aumento do momento último da seção em cerca de 1%.

Tabela 6.3.a - Influência da posição da armadura para as lajes, com aumento do cobrimento teórico

LAJE TIPO	MOMENTO ÚLTIMO (KN.CM) com cobrimento alterado em					
	0 %	+ 10 %	+ 15 %	+ 20 %	+ 50 %	+ 85 %
8	798,91	785,31	777,64	771,43	728,91	679,14
12	1307,83	1293,92	1286,17	1280,19	1239,68	1190,76
12 S	1897,32	1872,10	1858,37	1847,04	1772,95	1686,24
12SS	2464,15	2427,45	2407,68	2390,94	2282,53	2157,62
16	3488,16	3451,69	3432,02	3415,35	3307,05	3182,41
16 S	4295,27	4247,34	4221,61	4199,54	4056,91	3892,26
20	5568,24	5520,81	5495,33	5473,47	5331,99	5168,22
20 S	6570,13	6517,70	6489,25	6465,46	6309,93	6131,18
24	8102,46	8050,50	8022,28	7998,70	7844,20	7666,16
24 S	11256,53	11179,74	11138,18	11103,19	10875,06	10612,29
24SS	12929,67	12840,16	12791,17	12751,24	12487,78	12186,81

Tabela 6.3.b - Influência da posição da armadura para as lajes, com redução do cobrimento teórico

LAJE TIPO	MOMENTO ÚLTIMO (KNcm) cobrimento alterado em				
	0 %	- 10 %	- 15 %	- 20 %	- 50 %
8	798,91	812,81	819,00	826,99	871,09
12	1307,83	1321,90	1328,14	1336,13	1379,81
12 S	1897,32	1922,71	1934,30	1948,26	2025,89
12SS	2464,15	2501,02	2518,05	2538,08	2650,30
16	3488,16	3524,75	3541,61	3561,46	3672,30
16 S	4295,27	4343,33	4365,61	4391,51	4536,82
20	5568,24	5615,76	5637,76	5663,36	5806,71
20 S	6570,13	6622,76	6646,87	6675,59	6835,23
24	8102,46	8154,58	8178,41	8206,85	8364,56
24 S	11256,53	11333,57	11368,96	11410,87	11644,26
24SS	12929,67	13019,80	13061,20	13110,59	13387,33

### 6.2.2 - Influência da perda de protensão no momento fletor último das lajes

Denominam-se perdas de protensão todas as perdas verificadas nos esforços aplicados aos cabos de protensão (Pfeil, 1980).

As perdas podem ser classificadas, quanto ao agente causador, segundo Pfeil (1980), em:

- perdas por atrito;
- perdas nas ancoragens;
- perdas por encurtamento do concreto:
  - encurtamento imediato (elástico),
  - encurtamento retardado (fluência),
  - retração;
- perdas por relaxação do aço.

A tabela seguinte mostra a influência da perda de protensão no momento fletor último, sem identificar o agente causador. Observa-se que a partir da laje 16S a protensão passa a atuar de forma desfavorável, na situação última. Ocorre, entretanto, que as inúmeras vantagens da protensão se fazem sentir nas situações de carregamento, dentro dos limites de serviço. Na situação de estado limite último presume-se que a armadura tenha atingido o escoamento e o concreto esteja bastante fissurado e, neste estado, não há diferença considerável entre uma peça estrutural em concreto protendido ou em concreto armado.

A tabela 6.4 também apresenta os valores obtidos para o momento fletor último de projeto, ou seja, considerando os coeficientes de segurança para os materiais; 1,4 para o concreto e 1,15 para o aço. Observa-se que, ainda com uma perda total da protensão, as lajes apresentam momentos últimos superiores àqueles considerados na situação de projeto em no mínimo 16%.

Tabela 6.4 - Influência da perda de protensão para as lajes

LAJE	MOMENTO FLETOR ÚLTIMO ( KN.cm )			
	N B R			
	PERDA 0%	PERDA 50%	PERDA 100%	DE PROJETO
8	798,91	785,86	768,90	662,52
12	1307,83	1292,88	1275,60	1109,33
12 S	1897,32	1889,00	1878,50	1593,10
12SS	2464,15	2463,48	2460,50	2035,39
16	3488,16	3486,97	3483,80	2941,97
16 S	4295,27	4301,76	4304,70	3559,53
20	5568,24	5576,50	5581,00	4703,45
20 S	6570,13	6613,42	6638,50	5465,17
24	8102,46	8145,35	8170,80	6805,08
24 S	11256,53	11402,85	11495,53	9217,44
24SS	12929,67	13244,73	13423,80	10201,22

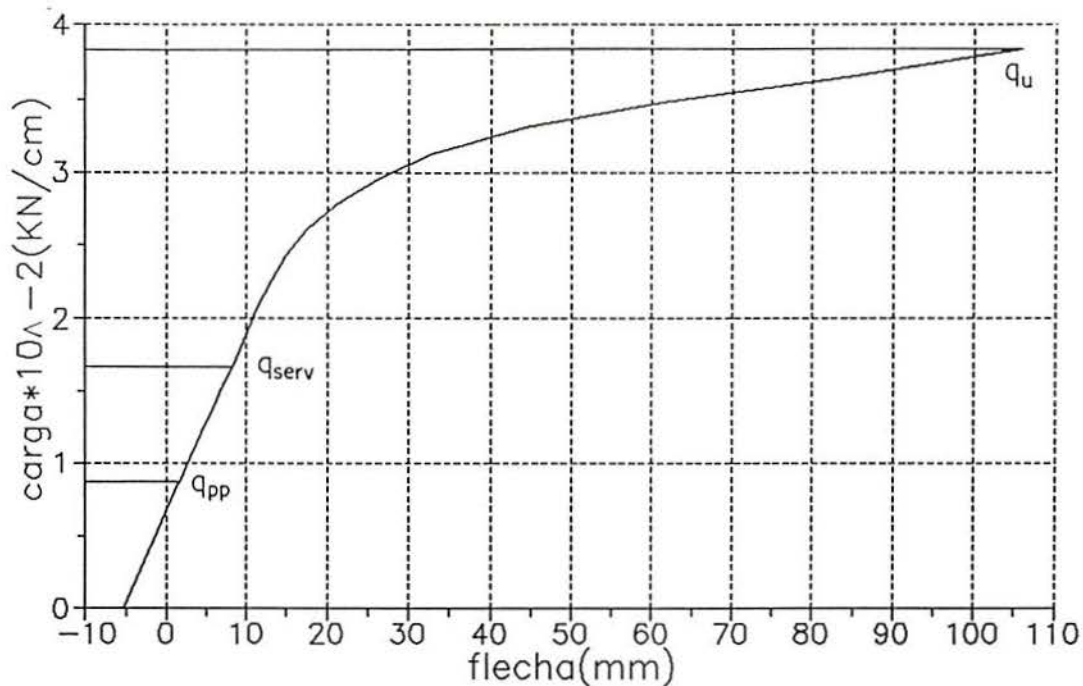
### 6.2.3 - Comportamento das lajes ROTH com carregamento distribuído, curta duração, através do programa VISCO

O momento último para todas as lajes foi determinado conforme o item 5.2.1 e, a partir daí, o carregamento de serviço correspondente.

O carregamento foi aplicado em um número de incrementos suficientes para levar a laje à ruptura, sendo que, ao final do quinto incremento foi atingido o carregamento de serviço total.

Através da análise dos gráficos carga-flecha, a seguir, é visto que as flechas para as cargas de serviço estão contidas na situação de regime elástico. Também é visto, pelos mesmos gráficos, o comportamento das lajes quanto ao incremento de flecha no centro do vão livre, até próximo à ruptura (item 6).

Os resultados são apresentados, para cada laje, considerando dois vãos diferentes por laje, nos gráficos 6.51 a 6.72.



$q_u$  - carga última  
 $q_{serv}$  - carga de serviço  
 $q_{pp}$  - carga de peso próprio

Gráfico 6.51 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 8, com 480 cm de vão livre

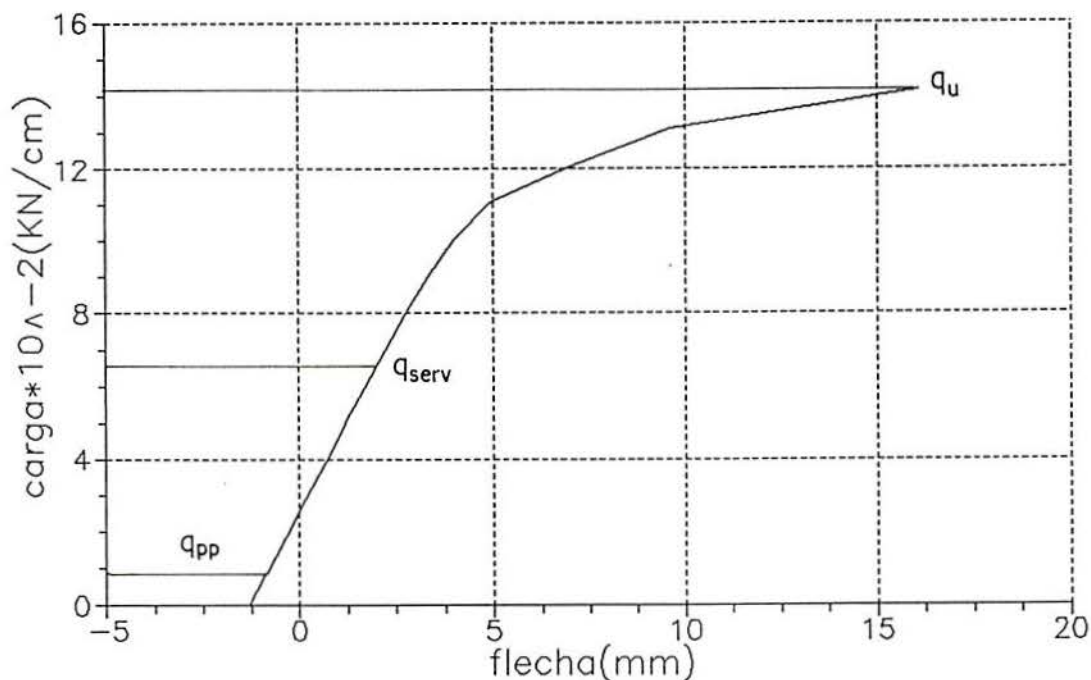


Gráfico 6.52 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 8, com 240 cm de vão livre

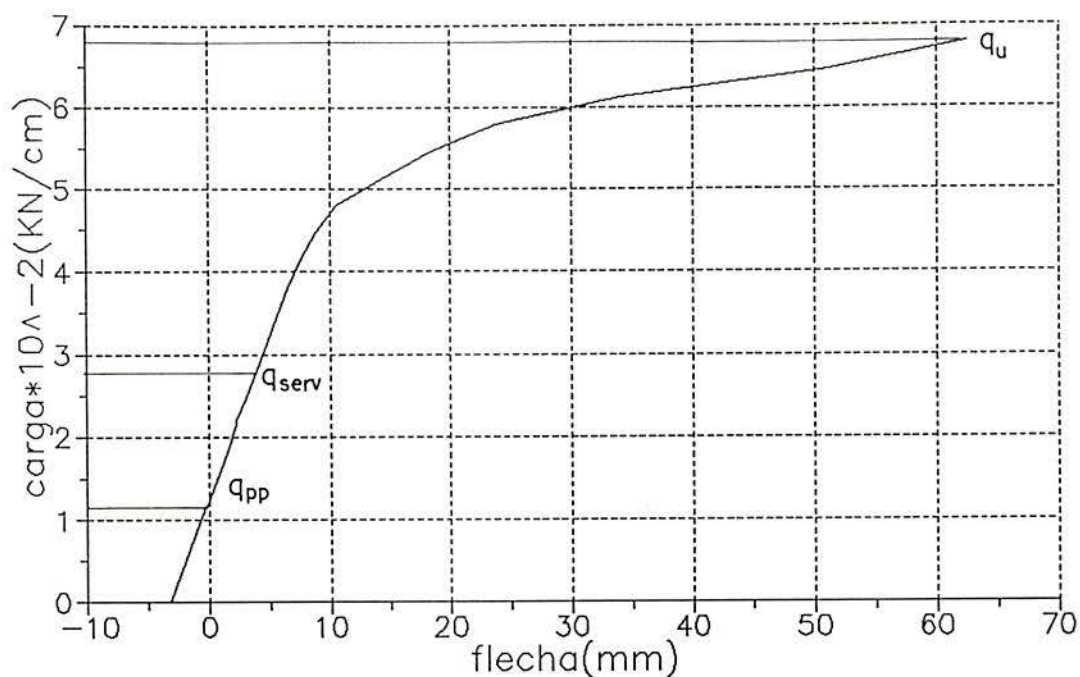


Gráfico 6.53 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 12, com 480 cm de vão livre

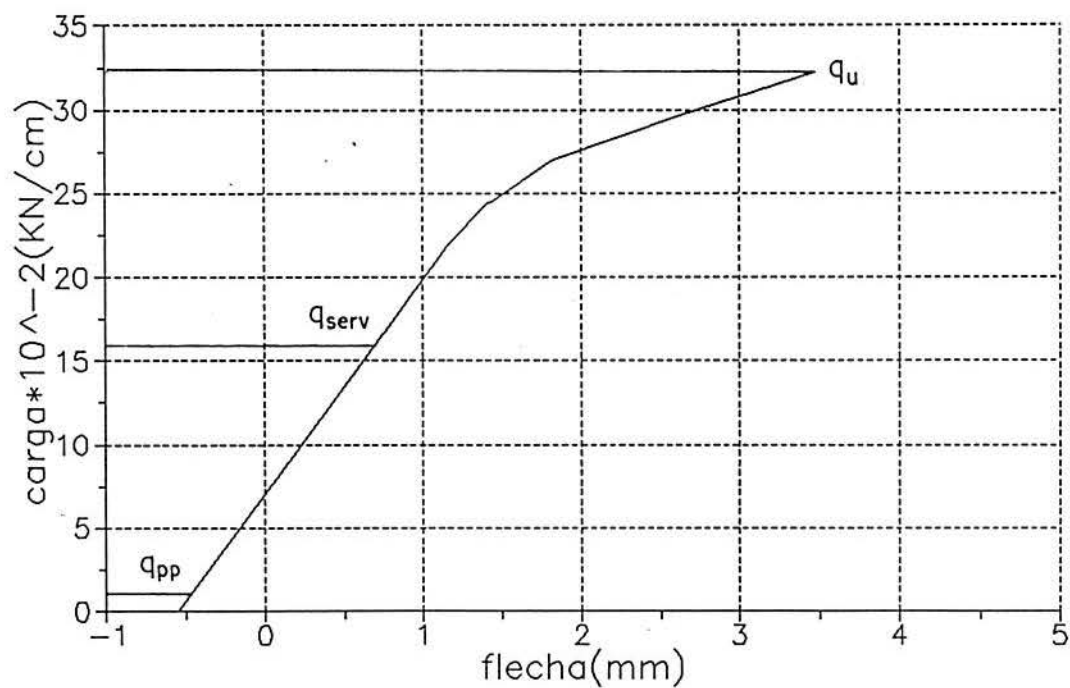


Gráfico 6.54 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 12, com 200 cm de vão livre

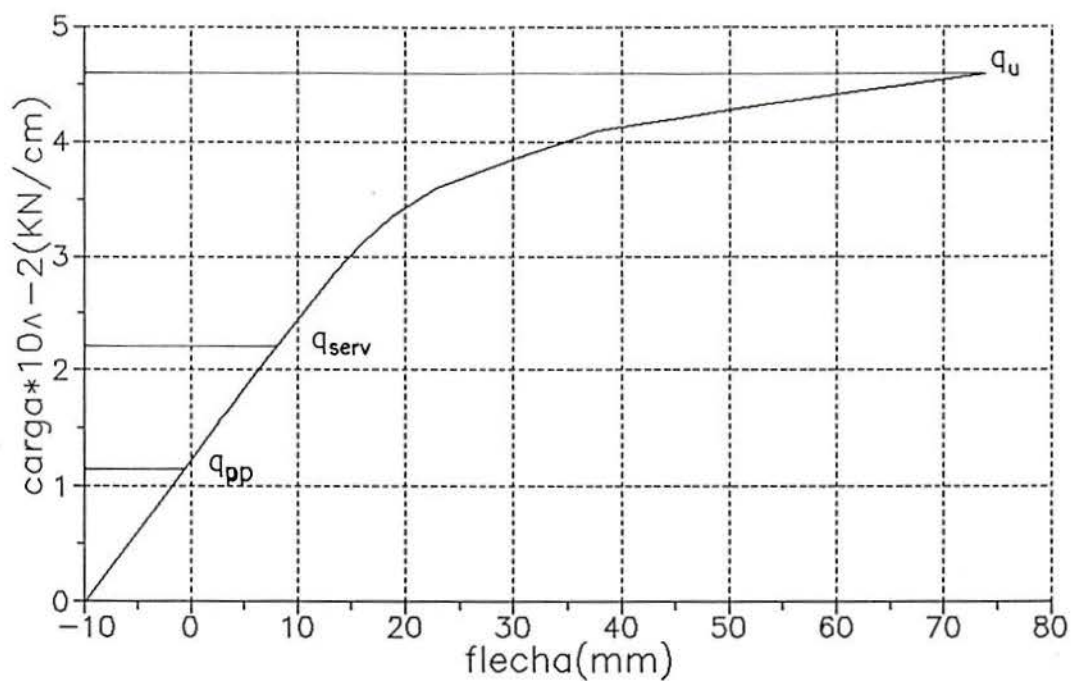


Gráfico 6.55 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 12S, com 642 cm de vão livre

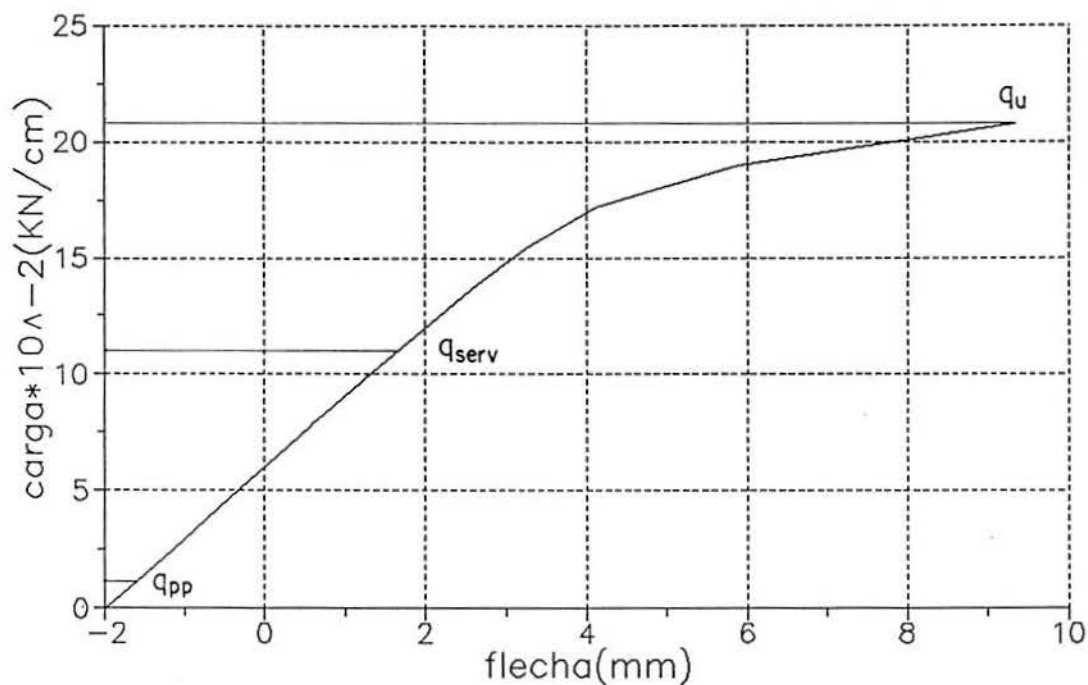


Gráfico 6.56 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 12S, com 288 cm de vão livre

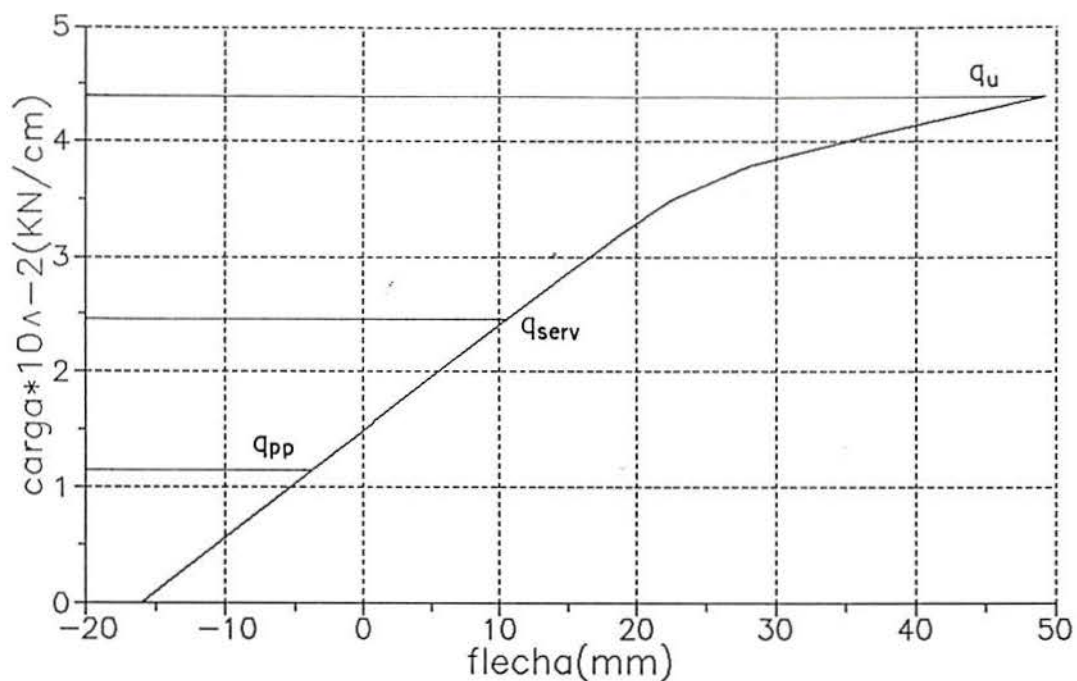


Gráfico 6.57 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 12SS, com 690 cm de vão livre

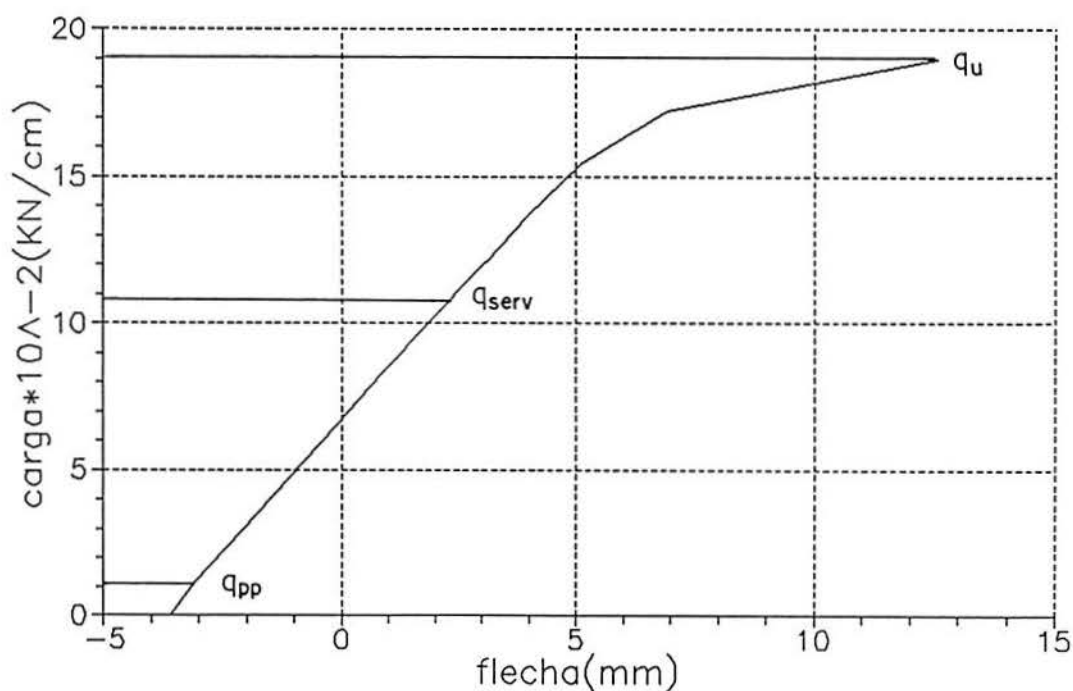


Gráfico 6.58 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 12SS, com 328 cm de vão livre



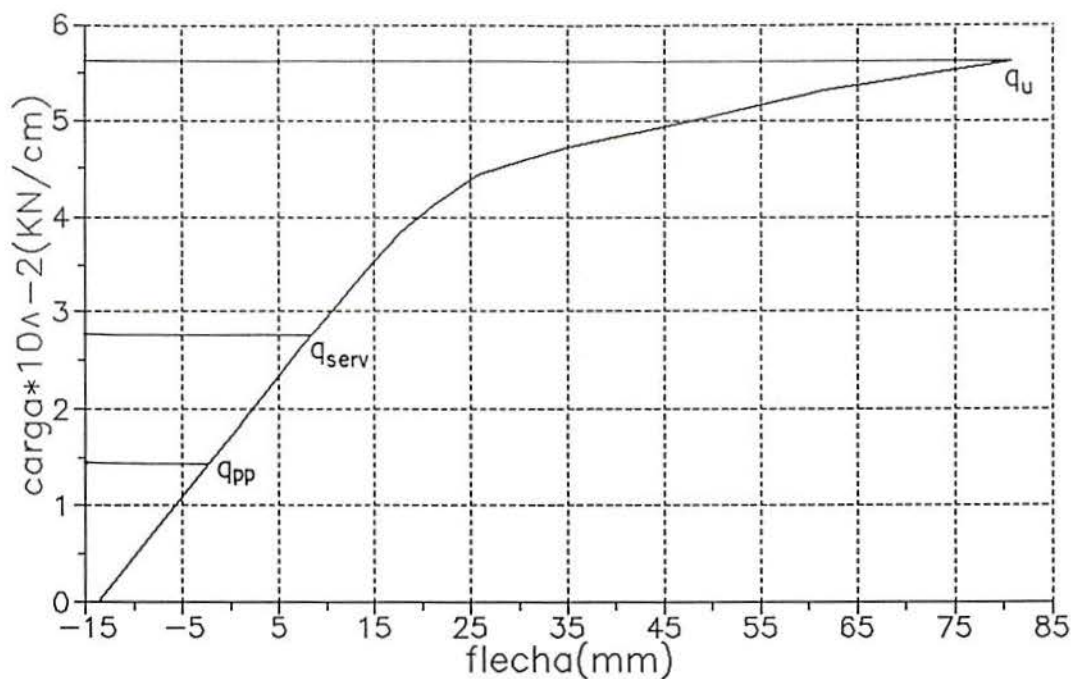


Gráfico 6.59 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 16, com 784 cm de vão livre

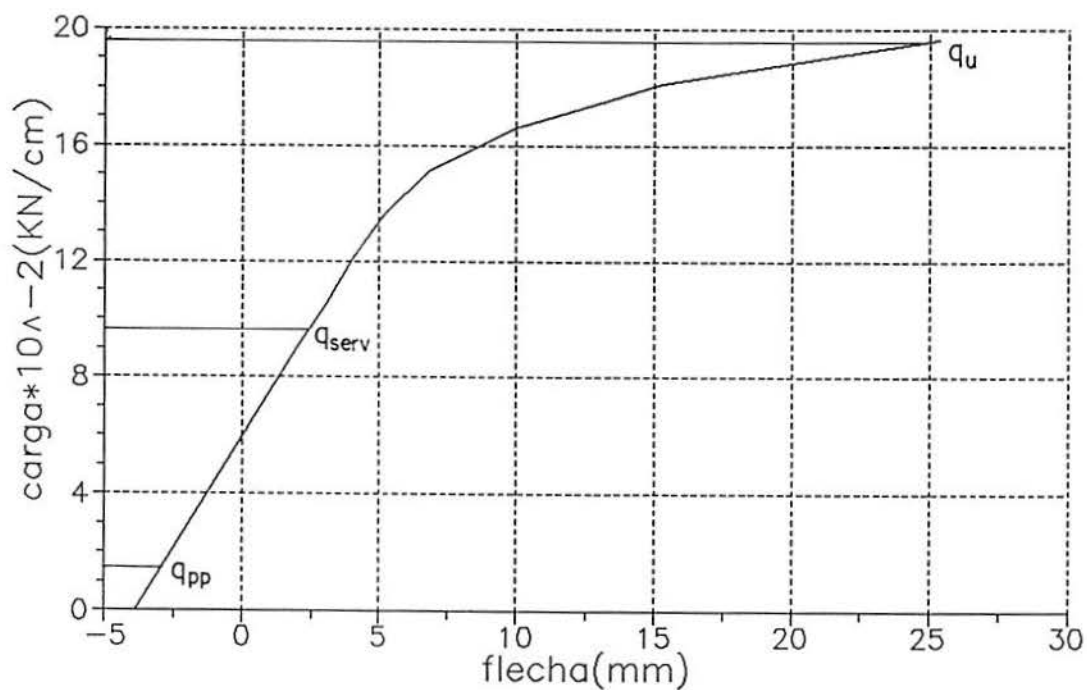


Gráfico 6.60 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 16, com 418 cm de vão livre

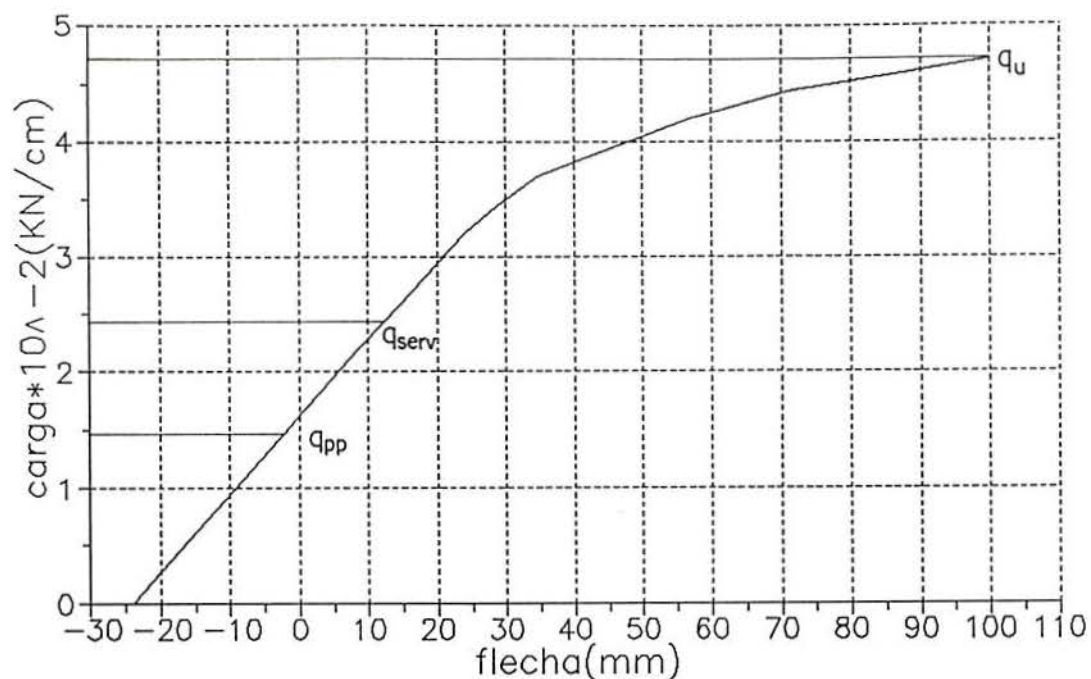


Gráfico 6.61 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 16S, com 916 cm de vão livre

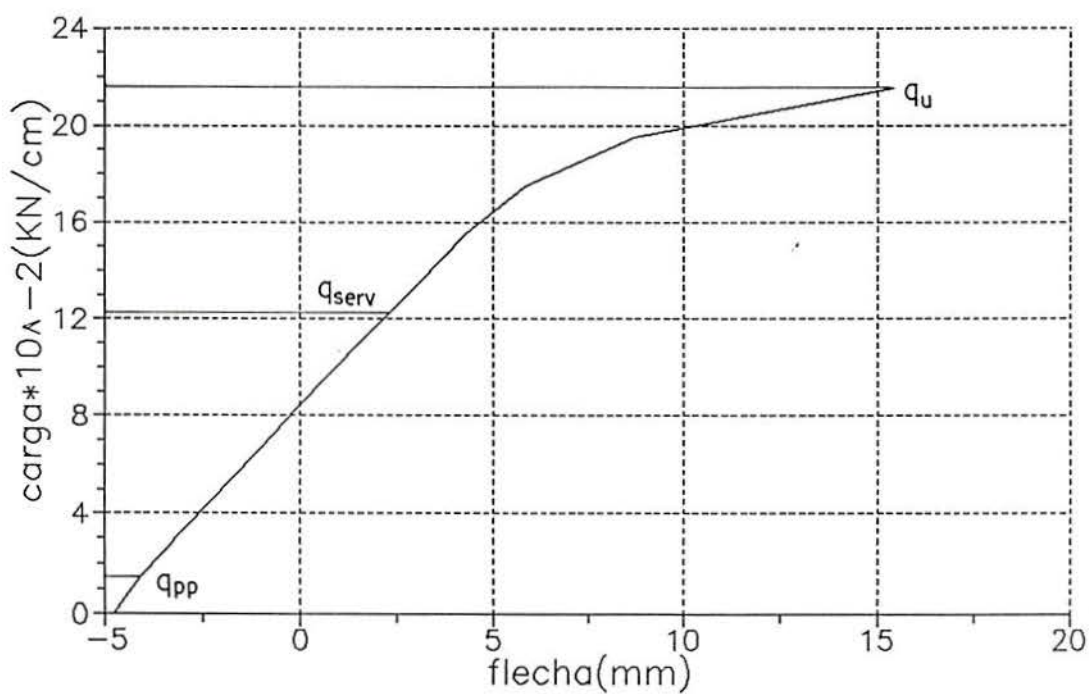


Gráfico 6.62 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 16S, com 408 cm de vão livre

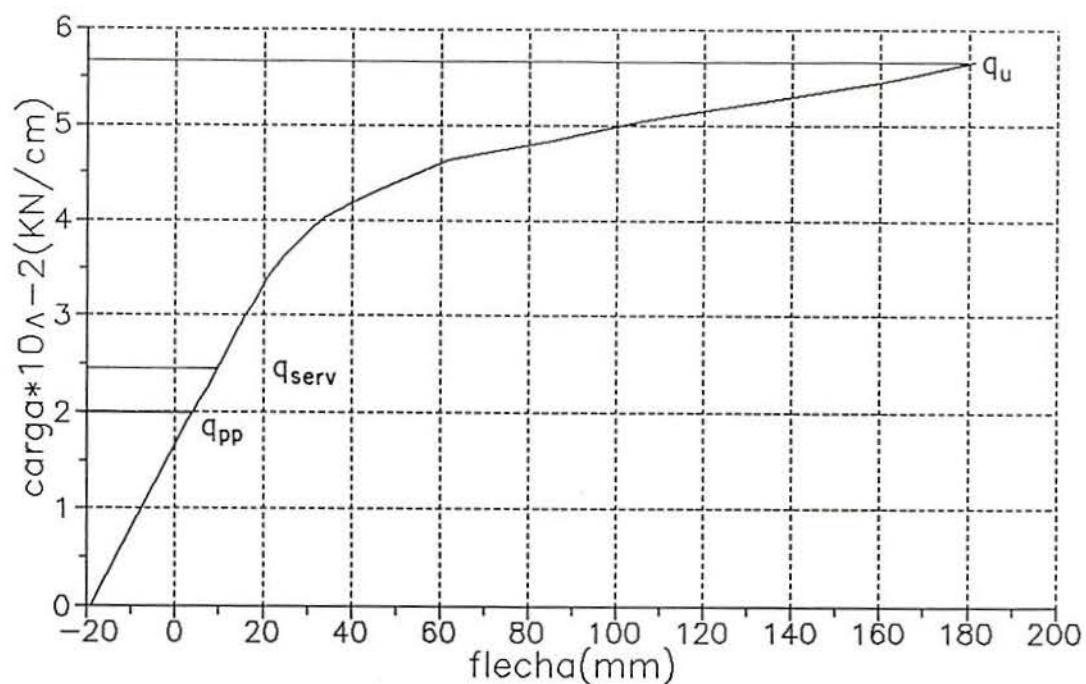


Gráfico 6.63 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 20, com 1048 cm de vão livre

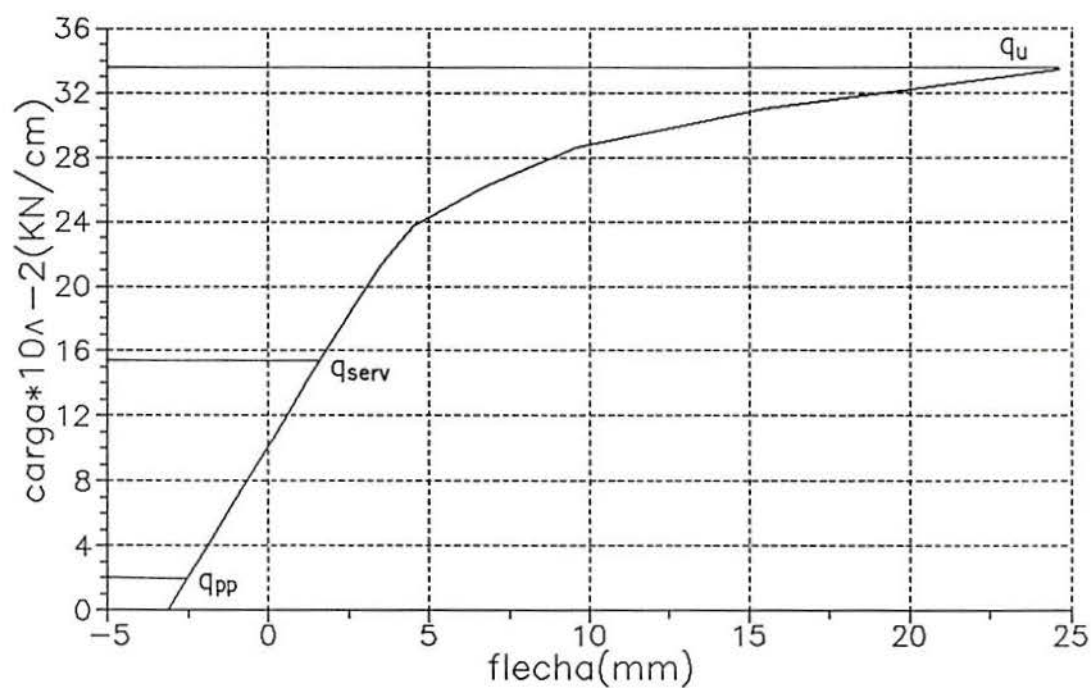


Gráfico 6.64 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 20, com 420 cm de vão livre

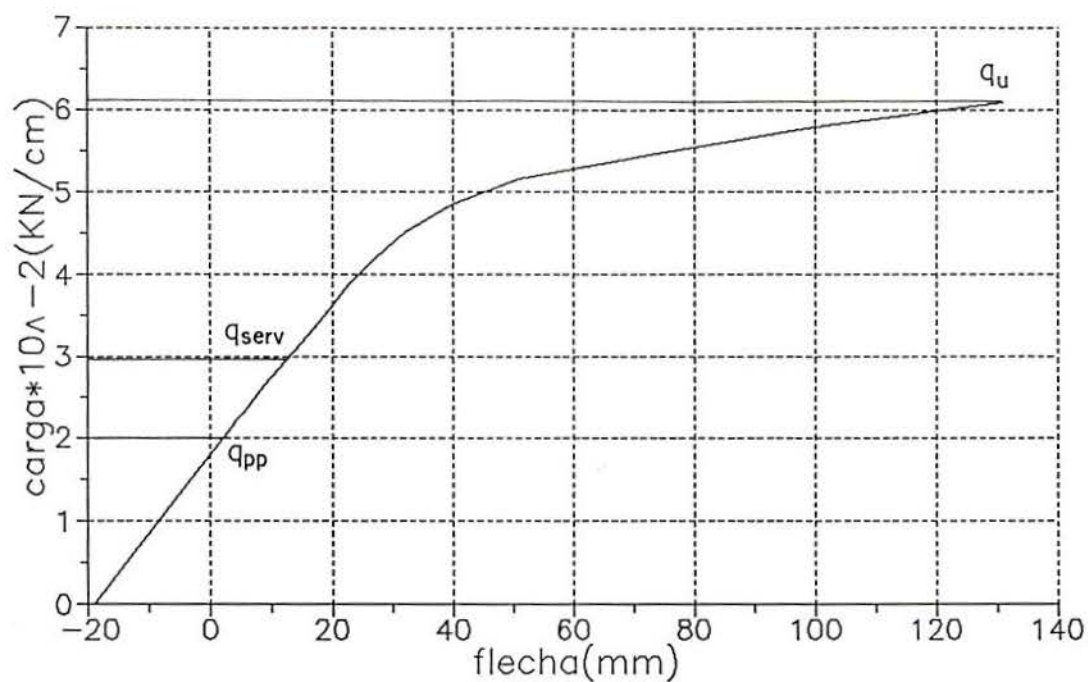


Gráfico 6.65 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 20S, com 1022 cm de vão livre

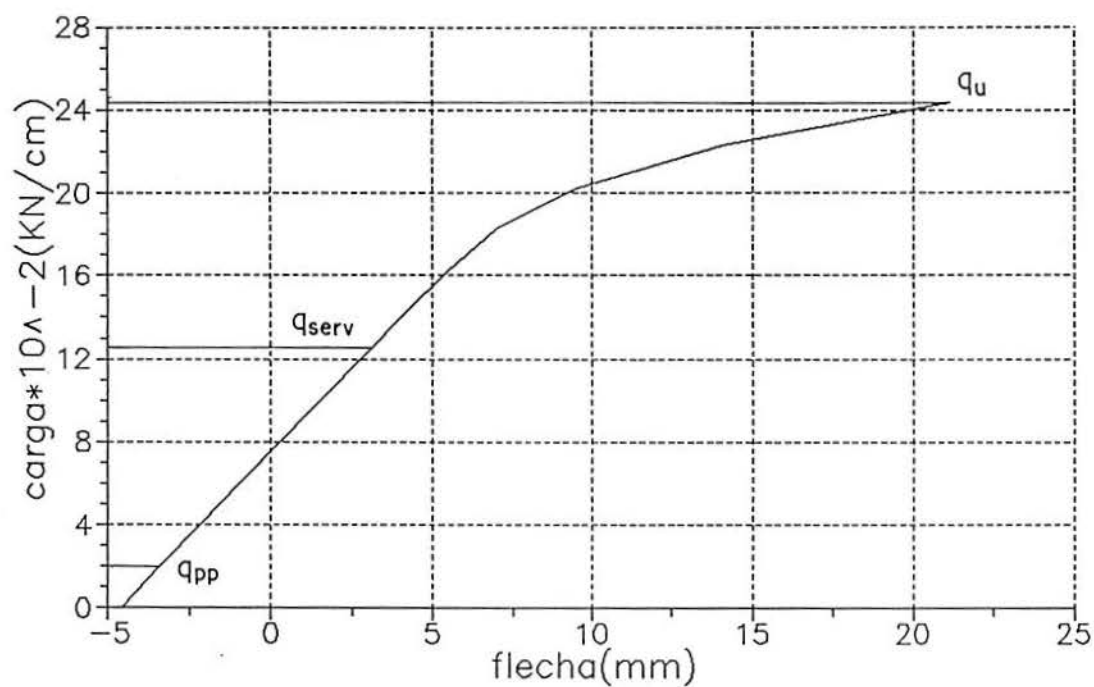


Gráfico 6.66 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 20S, com 500 cm de vão livre

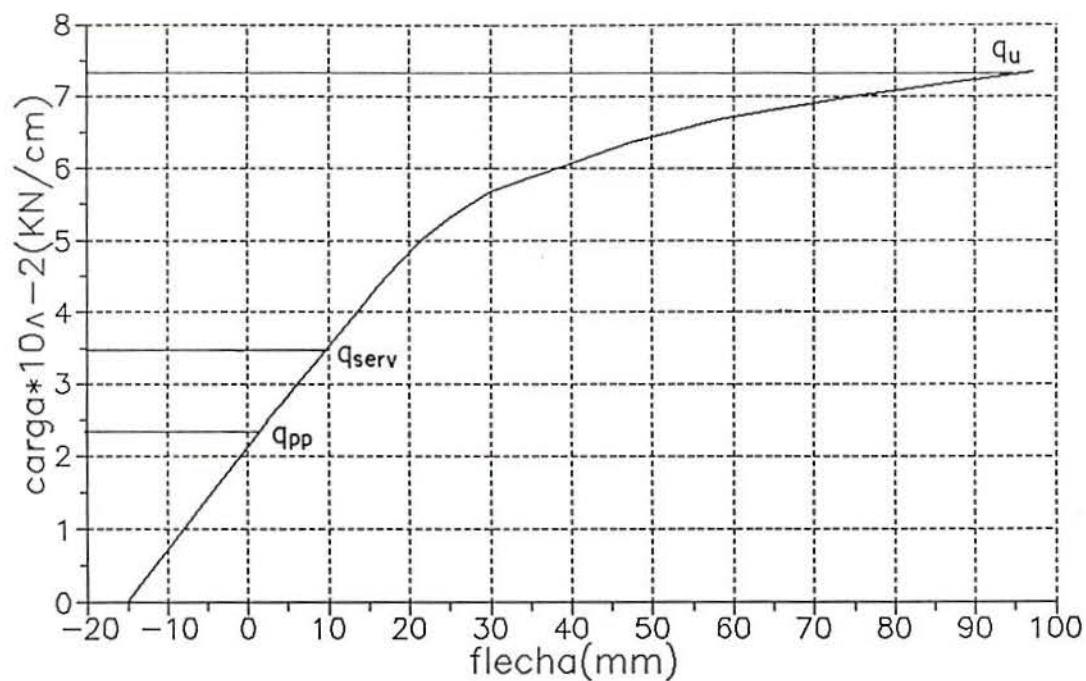


Gráfico 6.67 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 24, com 1056 cm de vão livre

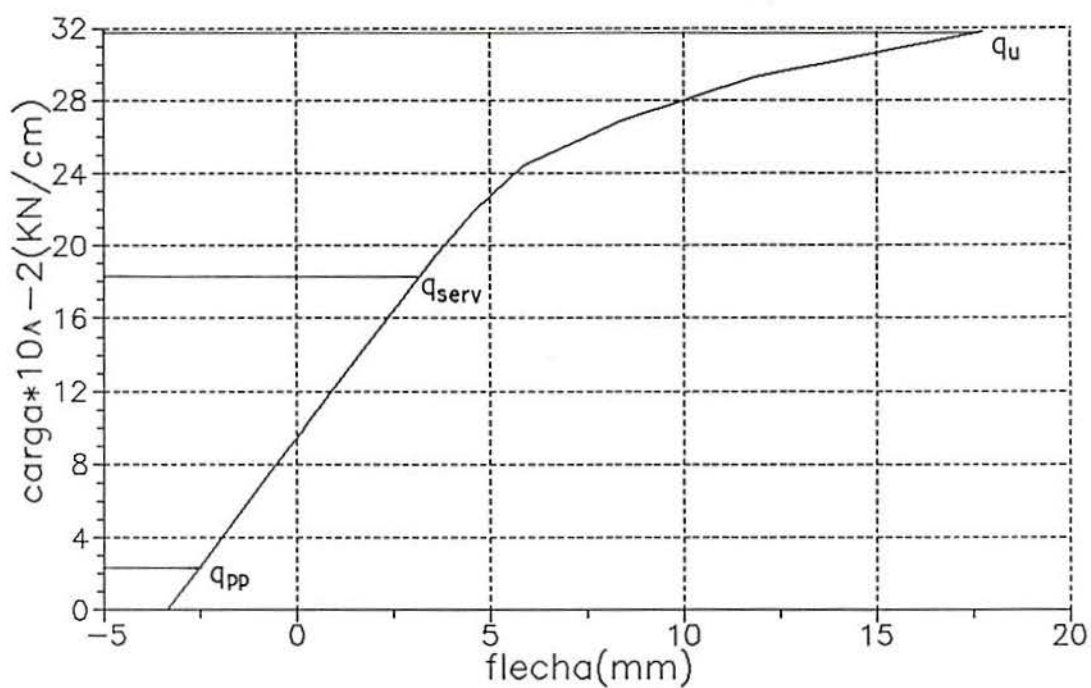


Gráfico 6.68 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 24, com 498 cm de vão livre

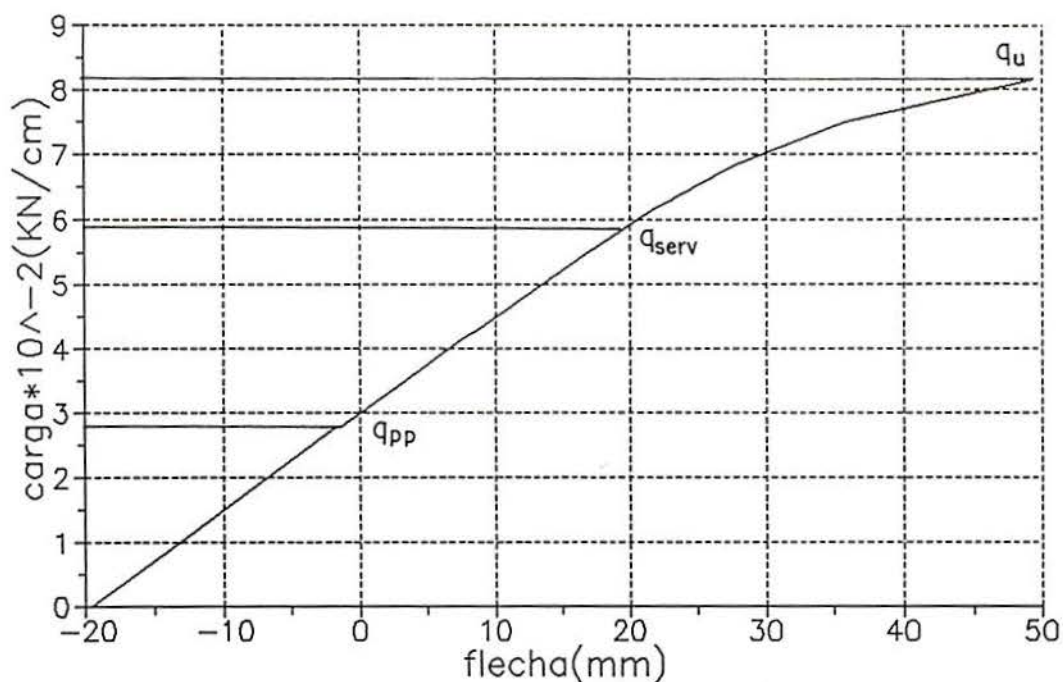


Gráfico 6.69 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 24S, com 1050 cm de vão livre

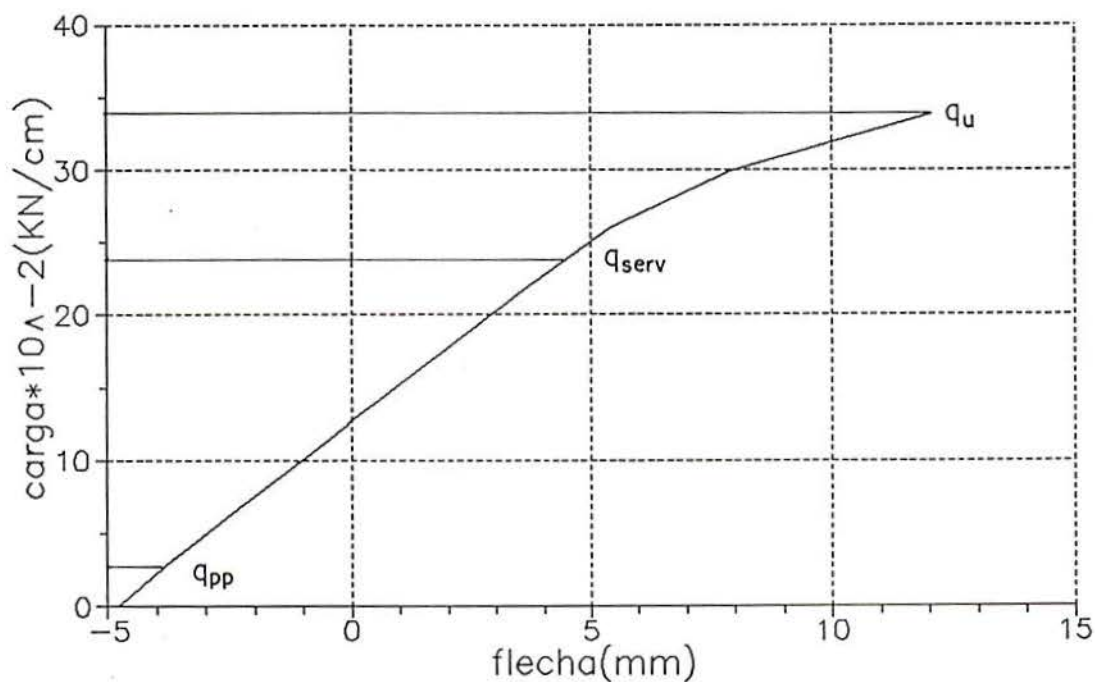


Gráfico 6.70 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 24S, com 516 cm de vão livre

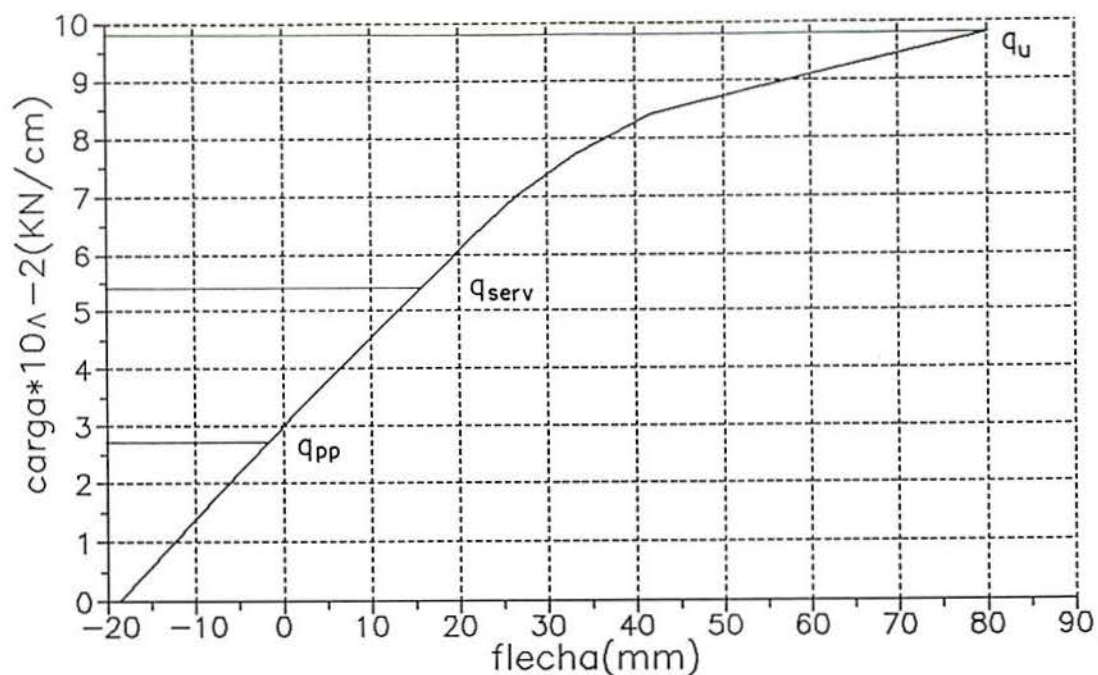


Gráfico 6.71 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 24SS, com 1040 cm de vão livre

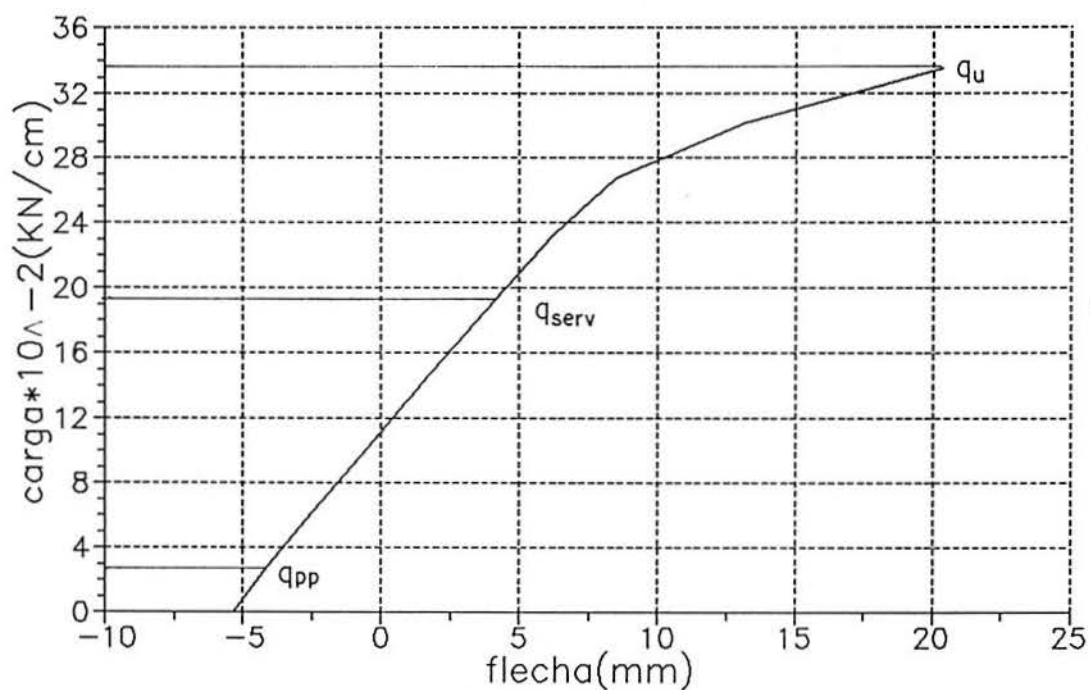


Gráfico 6.72 - Curva carga distribuída-flecha na seção central para uma laje 24SS, com 549 cm de vão livre

#### 6.2.4 - Comportamento das lajes ROTH com carregamento distribuído, longa duração, através do programa VISCO

Através do programa VISCO foi aplicado, nas lajes, para determinados vãos, o carregamento de serviço distribuído, permanecendo este por um período de 5 anos. Foram obtidas, do programa numérico, as flechas no centro do vão livre, para diversas datas ao longo dos 5 anos (tab. 6.5 a 6.18).

Define-se como fator R (item 5.2.2), para cada uma das lajes, a razão entre a flecha ao final dos 5 anos e a flecha instantânea.

Através do programa numérico também foram determinadas as curvaturas da seção de concreto, ao longo do tempo, apresentadas nas mesmas tabelas.

Tabela 6.5 - Resultados obtidos para a laje 8, vão livre de 480 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	0,77	3,583
113	1,12	4,936
210	1,17	5,146
294	1,21	5,263
402	1,24	5,364
496	1,25	5,422
597	1,27	5,472
704	1,28	5,514
801	1,29	5,546
901	1,30	5,587
1005	1,30	5,599
1098	1,31	5,621
1200	1,33	5,753
1298	1,32	5,676
1401	1,33	5,686
1496	1,33	5,695
1599	1,34	5,710
1702	1,34	5,719
1825	1,35	5,730



Tabela 6.6 - Resultados obtidos para a laje 12, vão livre de 480 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	0,37	1,768
100	0,64	3,019
200	0,71	3,327
324	0,75	3,562
401	0,77	3,669
516	0,80	3,799
689	0,82	3,952
949	0,85	4,135
1338	0,88	4,356
1825	0,90	4,354

Tabela 6.7 - Resultados obtidos para a laje 12, vão livre de 200 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	0,07	1,792
101	0,12	3,067
201	0,13	3,363
280	0,13	3,525
384	0,14	3,685
479	0,14	3,797
609	0,15	3,920
805	0,15	4,073
1099	0,16	4,262
1539	0,16	4,335
1601	0,16	4,230
1724	0,16	4,278
1825	0,16	4,325

Tabela 6.8 - Resultados obtidos para a laje 12, vão livre de 330 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	0,18	1,782
99	0,30	3,039
197	0,33	3,340
299	0,35	3,518
410	0,37	3,667
536	0,38	3,805
649	0,39	3,907
819	0,40	4,038
1075	0,41	4,202
1458	0,42	4,407
1825	0,43	4,373

Tabela 6.9 - Resultados obtidos para a laje 12S, vão livre de 642 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	0,77	2,187
101	1,10	2,989
181	1,13	3,102
351	1,16	3,214
497	1,16	3,260
716	1,14	3,295
1046	1,10	3,315
1526	1,04	3,317
1600	1,29	3,459
1699	1,30	3,470
1825	1,30	3,479

Tabela 6.10 - Resultados obtidos para a laje 12SS, vão livre de 690 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	0,99	2,541
102	1,34	3,414
185	1,36	3,515
298	1,47	3,681
408	1,47	3,719
501	1,52	3,786
605	1,53	3,813
698	1,54	3,845
795	1,53	3,851
889	1,55	3,879
1001	1,58	3,922
1110	1,57	3,916
1253	1,52	3,891
1314	1,59	3,954
1413	1,59	3,959
1498	1,59	3,968
1596	1,59	3,973
1709	1,61	3,990
1825	1,62	4,005

Tabela 6.11 - Resultados obtidos para a laje 16, vão livre de 784 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	0,77	1,569
90	1,09	2,150
218	1,14	2,283
301	1,15	2,328
420	1,16	2,371
600	1,15	2,413
713	1,19	2,439
797	1,27	2,470
904	1,28	2,486
985	1,27	2,495
1100	1,31	2,512
1199	1,31	2,522
1312	1,29	2,531
1404	1,30	2,539
1500	1,32	2,550
1594	1,31	2,556
1696	1,33	2,565
1825	1,34	2,573

Tabela 6.12 - Resultados obtidos para a laje 16S, vão livre de 916 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	1,12	1,752
99	1,53	2,442
200	1,61	2,564
296	1,64	2,633
405	1,67	2,687
501	1,70	2,717
601	1,72	2,746
702	1,73	2,768
768	1,74	2,782
803	1,74	2,795
900	1,76	2,805
1001	1,77	2,822
1100	1,76	2,846
1202	1,78	2,851
1305	1,77	2,871
1413	1,79	2,879
1501	1,79	2,886
1603	1,80	2,896
1701	1,82	2,899
1825	1,83	2,906

Tabela 6.13 - Resultados obtidos para a laje 20, vão livre de 1048 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	0,86	1,040
100	1,49	1,824
197	1,61	1,974
300	1,69	2,068
403	1,74	2,137
502	1,79	2,196
600	1,82	2,237
701	1,85	2,263
802	1,88	2,309
902	1,89	2,324
999	1,91	2,350
1092	1,93	2,390
1198	1,95	2,387
1299	1,97	2,427
1402	1,98	2,423
1502	1,99	2,438
1601	2,00	2,462
1797	2,02	2,475
1825	2,02	2,476

Tabela 6.14 - Resultados obtidos para a laje 20S, vão livre de 1022 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	1,20	1,411
109	1,76	1,908
196	1,85	1,990
365	1,94	2,085
509	1,99	2,146
725	2,03	2,221
1049	2,08	2,317
1505	2,13	2,428
1616	2,15	2,208
1699	2,16	2,200
1825	2,17	2,233

Tabela 6.15 - Resultados obtidos para a laje 24, vão livre de 1056 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	0,91	1,004
99	1,53	1,744
200	1,64	1,868
301	1,72	1,957
401	1,77	2,021
499	1,81	2,066
602	1,85	2,109
701	1,87	2,128
799	1,89	2,159
902	1,92	2,188
1002	1,96	2,211
1101	1,98	2,227
1202	2,01	2,248
1301	2,02	2,259
1399	2,04	2,282
1500	2,06	2,293
1602	2,07	2,306
1701	2,08	2,324
1800	2,09	2,333
1825	2,09	2,318

Tabela 6.16 - Resultados obtidos para a laje 24S, vão livre de 1050 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	1,77	1,854
102	2,35	2,439
200	2,46	2,554
299	2,53	2,616
400	2,57	2,658
503	2,61	2,706
604	2,64	2,728
704	2,66	2,750
802	2,67	2,759
900	2,69	2,776
1000	2,71	2,791
1102	2,72	2,806
1201	2,73	2,816
1297	2,75	2,834
1400	2,77	2,864
1502	2,77	2,859
1595	2,79	2,879
1702	2,79	2,874
1825	2,80	2,877



Tabela 6.17 - Resultados obtidos para a laje 24S, vão livre de 516 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	0,26	1,237
109	0,40	1,921
204	0,43	2,045
302	0,45	2,117
396	0,46	2,177
499	0,47	2,208
602	0,47	2,246
692	0,48	2,274
807	0,48	2,307
912	0,49	2,335
1002	0,49	2,340
1103	0,49	2,354
1200	0,50	2,378
1300	0,50	2,391
1400	0,50	2,396
1507	0,50	2,414
1613	0,51	2,434
1702	0,51	2,431
1808	0,51	2,449
1825	0,51	2,464

Tabela 6.18 - Resultados obtidos para a laje 24SS, vão livre de 1040 cm

DATA (dias)	FLECHA NO CENTRO DO VÃO ( cm )	CURVATURA X 10 <sup>-5</sup>
28	1,44	1,571
100	2,12	2,264
199	2,18	2,267
300	2,24	2,287
400	2,27	2,291
500	2,29	2,305
601	2,33	2,334
699	2,34	2,335
801	2,36	2,351
899	2,38	2,371
1000	2,39	2,367
1100	2,39	2,358
1201	2,42	2,385
1300	2,43	2,387
1399	2,44	2,405
1501	2,45	2,401
1599	2,46	2,418
1643	2,46	2,404

Tabela 6.19 - Relações entre valores finais e instantâneos de flecha e curvatura para as diversas lajes, conforme o vão livre

LAJE	VÃO LIVRE ( cm )	$\hat{f}_t / \hat{f}_i$ ( centro do vão )	$(1/r)_t / (1/r)_i$
8	480	1,753	1,599
12	480	2,432	2,463
	330	2,389	2,454
	200	2,286	2,414
12 S	642	1,688	1,591
12SS	690	1,636	1,576
16	784	1,740	1,640
16 S	916	1,634	1,659
20	1048	2,349	2,381
20 S	1022	1,808	1,583
24	1056	2,297	2,309
24 S	1050	1,582	1,552
	516	1,962	1,992
24SS	1040	1,708	1,530

#### 6.2.5 - Desempenho das lajes ROTH

A seguir são apresentadas diversas tabelas a cerca do desempenho dos elementos estudados neste trabalho. Os vãos máximos admitidos para as lajes ROTH foram determinadas de acordo com os critérios descritos no item 5.2.3.

Na tabela 6.20, os vãos livres máximos admissíveis para as lajes foram determinados considerando-se apenas limitação por deformações excessivas (item 5.2.3.1) e o fator R (item 5.2.2) incidindo somente sobre o peso próprio.

Na tabela 6.21, os vãos livres máximos admissíveis para as lajes foram determinados considerando-se apenas limitação por deformações excessivas (item 5.2.3.1) e o fator R (item 5.2.2) incidindo sobre o peso próprio e 50% da sobrecarga.

Na tabela 6.22, os vãos livres máximos admissíveis

para as lajes foram determinados considerando-se apenas limitação por deformações excessivas (item 5.2.3.1) e o fator R (item 5.2.2) incidindo sobre o peso próprio e sobrecarga.

Na tabela 6.23, os vãos livres máximos admissíveis para as lajes foram determinados considerando-se apenas limitação por flexão (item 5.2.3.2).

Na tabela 6.24, os vãos livres máximos admissíveis para as lajes foram determinados considerando-se apenas limitação pelo esforço cortante (item 5.2.3.3).

As tabelas 6.25 a 6.27 foram determinadas através da sobreposição das tabelas 6.20 a 6.22, prevalecendo, entre os vãos determinados pelos três critérios, para cada sobrecarga considerada, o menor. Assim, a tabela 6.25, no campo de limitações do vão livre por flexão, considera o fator R incidindo somente sobre o peso próprio; a tabela 6.26, sobre o peso próprio e 50% da sobrecarga; a tabela 6.27 sobre o peso próprio e sobrecarga.







Tabela 6.23 - Vãos livres máximos admissíveis para as lajes ROTH, considerando apenas limitação por flexão

Designação	8	12	12S	12SS	16	16S	20	20S	24	24S	24SS
<b>Sobrecarga KN/m<sup>2</sup></b>	<b>Vãos livres máximos admissíveis (m)</b>										
0,5	5,72	6,61	7,92	8,96	9,82	10,80	10,81	11,66	12,05	13,05	13,73
1,0	5,10	6,02	7,21	8,15	9,07	9,98	10,17	10,96	11,43	12,46	13,11
1,5	4,64	5,56	6,66	7,53	8,47	9,32	9,63	10,38	10,90	11,94	12,56
2,0	4,29	5,19	6,22	7,03	7,97	8,77	9,17	9,88	10,43	11,48	12,08
2,5	4,01	4,89	5,86	6,62	7,56	8,31	8,77	9,45	10,02	11,08	11,65
3,0	3,77	4,64	5,55	6,28	7,20	7,92	8,41	9,07	9,65	10,71	11,26
4,0	3,41	4,23	5,06	5,72	6,61	7,27	7,82	8,43	9,02	10,07	10,59
5,0	3,13	3,91	4,68	5,29	6,15	6,77	7,33	7,90	8,50	9,53	10,03
6,0	2,91	3,65	4,38	4,95	5,77	6,35	6,93	7,47	8,07	9,08	9,55
7,0	2,74	3,44	4,12	4,66	5,46	6,00	6,59	7,10	7,69	8,68	9,13
8,0	2,59	3,26	3,91	4,42	5,19	5,71	6,29	6,78	7,36	8,33	8,76
9,0	2,46	3,11	3,73	4,21	4,96	5,45	6,03	6,50	7,07	8,02	8,43
10,0	2,35	2,98	3,57	4,03	4,75	5,23	5,80	6,25	6,81	7,74	8,14
12,5	2,13	2,71	3,24	3,67	4,34	4,77	5,32	5,73	6,27	7,15	7,53
15,0	1,96	2,50	2,99	3,39	4,01	4,41	4,94	5,33	5,85	6,68	7,03
17,5	1,83	2,33	2,80	3,16	3,75	4,13	4,64	5,00	5,50	6,29	6,62
20,0	1,72	2,20	2,63	2,97	3,54	3,89	4,38	4,72	5,20	5,97	6,28
25,0	1,55	1,98	2,37	2,68	3,20	3,52	3,98	4,29	4,73	5,44	5,72
30,0	1,42	1,82	2,18	2,46	2,94	3,24	3,67	3,95	4,37	5,03	5,29
35,0	1,32	1,69	2,03	2,29	2,74	3,01	3,42	3,68	4,08	4,70	4,95
40,0	1,23	1,59	1,90	2,15	2,57	2,83	3,22	3,47	3,84	4,43	4,66
45,0	1,17	1,50	1,80	2,03	2,43	2,67	3,04	3,28	3,64	4,20	4,42
50,0	1,11	1,43	1,71	1,93	2,31	2,54	2,90	3,12	3,47	4,01	4,22



Tabela 6.24 - Vãos livres máximos admissíveis para as lajes ROTH, considerando apenas limitação pelo esforço cortante

Designação	8	12	12S	12SS	16	16S	20	20S	24	24S	24SS
Sobrecarga KN/m <sup>2</sup>	Vãos livres máximos admissíveis (m)										
0,5											
1,0											
1,5											
2,0											
2,5											
3,0											
4,0											
5,0											
6,0											
7,0											
8,0											
9,0											
10,0											
12,5	2,39			3,98							
15,0	2,03			3,39		5,05					
17,5	1,76		2,96	2,96		4,41					
20,0	1,55	2,62	2,62	2,62	3,92	3,92	4,82	4,82			
25,0	1,26	2,13	2,13	2,13	3,21	3,21	3,97	3,97	5,52		
30,0	1,06	1,80	1,80	1,80	2,71	2,71	3,37	3,37	4,71		
35,0	0,91	1,55	1,55	1,55	2,35	2,35	2,93	2,93	4,10		
40,0	0,80	1,37	1,37	1,37	2,07	2,07	2,59	2,59	3,64	5,15	5,15
45,0	0,72	1,22	1,22	1,22	1,85	1,85	2,33	2,33	3,27	4,63	4,63
50,0	0,65	1,11	1,11	1,11	1,68	1,68	2,11	2,11	2,96	4,21	4,21

Tabela 6.25 - Vãos livres máximos admissíveis para as lajes ROTH, considerando, na limitação por deformações excessivas, o fator R incidindo somente sobre o peso próprio

Designação	8	12	12S	12SS	16	16S	20	20S	24	24S	24SS
<b>Sobrecarga KN/m<sup>2</sup></b>	<b>Vãos livres máximos admissíveis (m)</b>										
0,5	4,85	6,03	6,68	6,75	8,12	8,29	8,35	9,09	9,82	10,28	10,45
1,0	4,60	5,85	6,41	6,47	7,85	8,00	8,19	8,87	9,65	10,40	10,25
1,5	4,40	5,56	6,17	6,23	7,62	7,75	8,04	8,67	9,50	9,92	10,07
2,0	4,23	5,19	5,97	6,02	7,41	7,53	7,91	8,48	9,35	9,76	9,90
2,5	4,01	4,89	5,79	5,84	7,22	7,32	7,78	8,31	9,21	9,60	9,74
3,0	3,77	4,64	5,55	5,67	7,05	7,14	7,65	8,16	9,09	9,46	9,58
4,0	3,41	4,23	5,06	5,39	6,61	6,83	7,43	7,88	8,85	9,20	9,31
5,0	3,13	3,91	4,68	5,16	6,15	6,57	7,23	7,63	8,50	8,96	9,06
6,0	2,91	3,65	4,38	4,95	5,77	6,34	6,93	7,41	8,07	8,74	8,84
7,0	2,74	3,44	4,12	4,66	5,46	6,00	6,59	7,10	7,69	8,55	8,64
8,0	2,59	3,26	3,91	4,42	5,19	5,71	6,29	6,78	7,36	8,33	8,46
9,0	2,46	3,11	3,73	4,21	4,96	5,45	6,03	6,50	7,07	8,02	8,29
10,0	2,35	2,98	3,57	4,03	4,75	5,23	5,80	6,25	6,81	7,74	8,13
12,5	2,13	2,71	3,24	3,67	4,34	4,77	5,32	5,73	6,27	7,15	7,53
15,0	1,96	2,50	2,99	3,39	4,01	4,41	4,94	5,33	5,85	6,68	7,03
17,5	1,76	2,33	2,80	2,96	3,75	4,13	4,64	5,00	5,50	6,29	6,62
20,0	1,55	2,20	2,62	2,62	3,54	3,89	4,38	4,72	5,20	5,97	6,28
25,0	1,26	1,98	2,13	2,13	3,21	3,21	3,97	3,97	4,73	5,44	5,72
30,0	1,06	1,80	1,80	1,80	2,71	2,71	3,37	3,37	4,37	5,03	5,29
35,0	0,91	1,55	1,55	1,55	2,35	2,35	2,93	2,93	4,08	4,70	4,95
40,0	0,80	1,37	1,37	1,37	2,07	2,07	2,59	2,59	3,64	4,43	4,66
45,0	0,72	1,22	1,22	1,22	1,85	1,85	2,33	2,33	3,27	4,20	4,42
50,0	0,65	1,11	1,11	1,11	1,68	1,68	2,11	2,11	2,96	4,01	4,21

Tabela 6.26 - Vãos livres máximos admissíveis para as lajes ROTH, considerando, na limitação por deformações excessivas, o fator R incidindo sobre o peso próprio e 50% da sobrecarga

Designação	8	12	12S	12SS	16	16S	20	20S	24	24S	24SS
Sobrecarga	Vãos livres máximos admissíveis (m)										
KN/m <sup>2</sup>											
0,5	4,75	5,90	6,58	6,66	8,02	8,20	8,24	9,00	9,71	10,21	10,38
1,0	4,45	5,62	6,24	6,31	7,68	7,84	8,00	8,70	9,45	9,96	10,12
1,5	4,21	5,39	5,96	6,03	7,38	7,54	7,77	8,45	9,22	9,73	9,89
2,0	4,02	5,19	5,73	5,79	7,13	7,27	7,57	8,22	9,01	9,52	9,67
2,5	3,86	4,89	5,53	5,58	6,91	7,05	7,39	8,01	8,82	9,33	9,48
3,0	3,72	4,64	5,35	5,41	6,72	6,84	7,23	7,82	8,65	9,15	9,29
4,0	3,41	4,23	5,06	5,11	6,38	6,50	6,94	7,49	8,33	8,84	8,97
5,0	3,13	3,91	4,68	4,87	6,11	6,22	6,69	7,21	8,06	8,56	8,68
6,0	2,91	3,65	4,38	4,66	5,77	5,98	6,48	6,97	7,82	8,31	8,43
7,0	2,74	3,44	4,12	4,49	5,46	5,77	6,29	6,76	7,60	8,09	8,21
8,0	2,59	3,26	3,91	4,34	5,19	5,59	6,12	6,57	7,37	7,90	8,01
9,0	2,46	3,11	3,73	4,21	4,96	5,43	5,96	6,40	7,07	7,72	7,82
10,0	2,35	2,98	3,57	4,03	4,75	5,23	5,80	6,25	6,81	7,55	7,66
12,5	2,13	2,71	3,24	3,67	4,34	4,77	5,32	5,73	6,27	7,15	7,29
15,0	1,96	2,50	2,99	3,39	4,01	4,41	4,94	5,33	5,85	6,68	6,99
17,5	1,76	2,33	2,80	2,96	3,75	4,13	4,64	5,00	5,50	6,29	6,62
20,0	1,55	2,20	2,62	2,62	3,54	3,89	4,38	4,72	5,20	5,97	6,28
25,0	1,26	1,98	2,13	2,13	3,21	3,21	3,97	3,97	4,73	5,44	5,72
30,0	1,06	1,80	1,80	1,80	2,71	2,71	3,37	3,37	4,37	5,03	5,29
35,0	0,91	1,55	1,55	1,55	2,35	2,35	2,93	2,93	4,08	4,70	4,95
40,0	0,80	1,37	1,37	1,37	2,07	2,07	2,59	2,59	3,64	4,43	4,66
45,0	0,72	1,22	1,22	1,22	1,85	1,85	2,33	2,33	3,27	4,20	4,42
50,0	0,65	1,11	1,11	1,11	1,68	1,68	2,11	2,11	2,96	4,01	4,21

Tabela 6.27 - Vãos livres máximos admissíveis para as lajes ROTH, considerando, na limitação por deformações excessivas, o fator  $R$  incidindo sobre o peso próprio e sobrecarga

Designação	8	12	12S	12SS	16	16S	20	20S	24	24S	24SS
<b>Sobrecarga KN/m<sup>2</sup></b>	<b>Vãos livres máximos admissíveis (m)</b>										
0,5	4,66	5,78	6,49	6,57	7,92	8,10	8,14	8,91	9,60	10,14	10,31
1,0	4,31	5,43	6,09	6,17	7,51	7,69	7,81	8,55	9,27	9,83	9,99
1,5	4,05	5,15	5,78	5,85	7,18	7,34	7,53	8,25	8,98	9,55	9,72
2,0	3,85	4,92	5,52	5,59	6,90	7,05	7,29	7,98	8,72	9,31	9,47
2,5	3,68	4,73	5,31	5,37	6,65	6,81	7,08	7,74	8,49	9,09	9,24
3,0	3,53	4,56	5,12	5,18	6,44	6,59	6,89	7,53	8,28	8,88	9,03
4,0	3,30	4,23	4,81	4,87	6,09	6,23	6,56	7,17	7,92	8,53	8,67
5,0	3,12	3,91	4,57	4,63	5,80	5,93	6,28	6,88	7,61	8,22	8,36
6,0	2,91	3,65	4,37	4,42	5,56	5,69	6,05	6,62	7,35	7,96	8,09
7,0	2,74	3,44	4,12	4,25	5,36	5,48	5,85	6,40	7,12	7,72	7,85
8,0	2,59	3,26	3,91	4,10	5,18	5,30	5,67	6,21	6,91	7,51	7,64
9,0	2,46	3,11	3,73	3,97	4,96	5,14	5,51	6,03	6,73	7,33	7,45
10,0	2,35	2,98	3,57	3,86	4,75	5,00	5,37	5,88	6,57	7,16	7,28
12,5	2,13	2,71	3,24	3,62	4,34	4,70	5,07	5,55	6,21	6,79	6,90
15,0	1,96	2,50	2,99	3,39	4,01	4,41	4,83	5,29	5,85	6,49	6,60
17,5	1,76	2,33	2,80	2,96	3,75	4,13	4,63	5,00	5,50	6,23	6,34
20,0	1,55	2,20	2,62	2,62	3,54	3,89	4,38	4,72	5,20	5,97	6,12
25,0	1,26	1,98	2,13	2,13	3,21	3,21	3,97	3,97	4,73	5,44	5,72
30,0	1,06	1,80	1,80	1,80	2,71	2,71	3,37	3,37	4,37	5,03	5,29
35,0	0,91	1,55	1,55	1,55	2,35	2,35	2,93	2,93	4,08	4,70	4,95
40,0	0,80	1,37	1,37	1,37	2,07	2,07	2,59	2,59	3,64	4,43	4,66
45,0	0,72	1,22	1,22	1,22	1,85	1,85	2,33	2,33	3,27	4,20	4,42
50,0	0,65	1,11	1,11	1,11	1,68	1,68	2,11	2,11	2,96	4,01	4,21

## 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Embora os resultados experimentais obtidos neste trabalho sejam em número relativamente reduzido, visto que foram ensaiados somente 8 protótipos, agrupados em 3 diferentes histórias de carregamentos, estes permitem a obtenção de algumas conclusões sobre o comportamento dos elementos estudados.

A seguir estão as conclusões sobre cada uma das etapas do trabalho e também algumas de ordem geral.

### Processo produtivo:

O acompanhamento da concretagem dos protótipos permitiu constatar um bom controle do concreto utilizado, facilitado pelo fato de ser usinado no próprio local. A uniformidade do concreto ao longo da pista também pôde ser constatada pelos resultados dos ensaios nos corpos de prova, não mostrando diferenças significativas entre resultados obtidos de corpos de prova representantes de quaisquer dos terços da pista. O concreto mostrou aspecto bastante regular e, a julgar pela conformação obtida após a extrusão produzida pela moldadora, por um baixo fator água-cimento e por um SLUMP muito próximo de zero, que estaria garantindo a regularidade física das seções transversais.

O processo de cura a vapor mostrou-se eficaz na aceleração da cura, a julgar pela resistência média atingida pelos corpos de prova rompidos à compressão no terceiro dia, equivalente a 80% da resistência média obtida em ensaios aos 28 dias.

Após o período de cura, foi feita uma tentativa de medida da contraflecha dos protótipos quando da transferência da protensão ao concreto, pelo corte das cordoalhas e das próprias lajes. Não foi observada nenhuma contraflecha, no entanto esta operação causou um atraso no processo de corte das cordoalhas fixadas à bancada de protensão e de corte das lajes. Este por sua vez retardou a transferência da protensão ao concreto, o que provocou, nas pranchas estendidas na pista, o aparecimento de fissuras de aberturas significativas. No terço

médio da pista, o espaçamento entre fissuras foi da ordem de 2m. Estas fissuras foram causadas por retração do concreto e as conseqüências deste quadro de fissuras se fizeram sentir nos ensaios experimentais, avaliados adiante.

O transporte dos protótipos ao laboratório de ensaios foi cuidadoso e o sistema de apoios provisórios em que foram colocados os protótipos, até serem transferidos às posições de ensaio, não prejudicaram os resultados experimentais obtidos.

#### Equipamentos:

Os equipamentos utilizados durante os ensaios tiveram desempenho satisfatório, contudo variações de umidade e temperatura se refletiram através de alterações na regularidade das respostas.

Há restrições quanto à utilização do extensômetro mecânico, em vista da sua pouca confiabilidade, causada pela dificuldade de seu manuseio. Isto acarreta leituras imprecisas e pouco confiáveis. Sugere-se, em lugar das pastilhas de alumínio empregadas, que o aparelho seja testado utilizando-se pastilhas em aço inox.

#### Resultados numéricos e experimentais:

Os ensaios de carregamento instantâneo, com carga de serviço, nos protótipos A1 e B2, apresentaram boa aproximação entre as respostas numéricas e experimentais, para as deformações e para as flechas na seção central, até cerca da metade do carregamento de serviço. Após, ocorreu a reabertura de fissuras de retração, acarretando deslocamentos verticais e deformações maiores que os esperados. A diferença entre resultados numéricos e experimentais foi maior para o protótipo B2, oriundo do terço médio da pista, local em que a fissuração foi mais intensa no momento anterior ao corte. Após receberem o carregamento de serviço total, foi observada uma fissura visível a olho nu no protótipo B2.

Os protótipos acima mencionados continuaram apresentando deslocamentos verticais e deformações superiores aos valores fornecidos pelo modelo numérico, nos ensaios de longa duração, com carga de serviço. Este comportamento se mostrou, novamente, mais acentuado no protótipo B2.

Os ensaios de longa duração nos protótipos C1 e A2,

sujeitos somente ao peso próprio, apresentaram resultados de flechas e deformações na seção central compatíveis entre si, mas superiores aos resultados fornecidos pelo programa VISCO. Ao final dos 4 meses, as flechas nestes protótipos apresentaram tendências à estabilização. Já nos protótipos A1 e B2, com carga de serviço, as flechas ainda eram crescentes ao final do mesmo período.

Os ensaios instantâneos de retirada do carregamento de serviço dos protótipos A1 e B2, após 4 meses, foram mais satisfatórios para o protótipo A1, no que diz respeito à comparação entre resultados numéricos e experimentais, pelas mesmas razões já mencionadas.

Quanto aos ensaios de carregamento instantâneo, até a ruptura, constatou-se que: B1 e C2, protótipos submetidos a este ensaio aos 12 e aos 19 dias de idade, respectivamente, apresentaram resultados, para a carga de ruptura, aquém dos fornecidos pelo programa VISCO e superiores aos obtidos através dos procedimentos recomendados pelas normas brasileiras. Os resultados obtidos para as deformações, na seção central, apresentaram boas aproximações entre valores numéricos e experimentais, no regime elástico, a menos em alguns resultados obtidos através do extensômetro mecânico.

Os resultados numéricos e experimentais de flechas no regime elástico, para o protótipo C2, foram praticamente coincidentes; o mesmo não se conclui para o protótipo B1, oriundo do terço de pista onde as fissuras por retração do concreto foram mais intensas.

Os protótipos D e E, oriundos de uma partilha em que não houve atraso no corte das lajes e, portanto, não ocorreu a abertura de fissuras visíveis anterior ao corte, apresentaram resultados numéricos e experimentais bem próximos, para deformações e flechas, no regime elástico.

A carga de ruptura obtida através do programa VISCO, para o protótipo D, foi superior ao valor experimental em 35% e este maior que o de qualquer um dos demais protótipos ensaiados. Uma das razões para que tal tenha ocorrido pode ser o posicionamento das cordoalhas, mais adequado se comparado aos demais protótipos, dos tipos A, B e C. Uma menor espessura de recobrimento leva a um maior momento produzido pela armadura de protensão.

Com relação ao momento fletor último, o programa VISCO determina o mesmo resultado, tanto para os protótipos que receberam a carga de serviço como para os que ficaram somente com o peso próprio, ao longo de 4 meses, antes de serem rompidos com carga instantânea concentrada. Os protótipos rompidos instantaneamente, segundo VISCO, apresentaram momentos últimos superiores aos demais. A mesma constatação, entretanto não se verificou experimentalmente. Já os momentos últimos obtidos através dos procedimentos recomendados pelas normas brasileiras são sistematicamente mais conservadores, se comparados com os experimentais e os de VISCO.

Os protótipos D e E foram os que apresentaram valores mais altos para os momentos últimos, por qualquer dos métodos de obtenção, inclusive experimentalmente. Ocorre que, estes protótipos, apresentam maior cobrimento nas cordoalhas superiores e menor nas inferiores, como já mencionado acima.

Da observação acima pode-se concluir que o correto posicionamento das cordoalhas é um fator extremamente importante na manutenção de sua capacidade última. Segundo os resultados numéricos, um aumento de 85% na espessura de cobrimento pode acarretar uma perda de quase 18% no momento último.

É sabido que não há diferença considerável entre peças estruturais em concreto protendido ou em concreto armado, na situação última. Conforme resultados numéricos observa-se que, ainda que ocorresse uma perda total da protensão, as lajes apresentariam momentos últimos superiores àqueles considerados na situação de projeto em no mínimo 16%.

Analisando-se os resultados obtidos, pode-se concluir que alguma diferença existente entre os resultados numéricos e experimentais pode ser atribuída à problemas ocorridos ainda na pista de protensão, tais como: o afrouxamento da armadura, causado pela deformação térmica do conjunto, provocando perdas nos efeitos de protensão, este alongamento do conjunto laje e pista pode provocar alguma perda da aderência no concreto novo, podendo haver escorregamento interno da armadura. Também o posicionamento correto das cordoalhas é fundamental na manutenção de suas características físicas. Conclui-se, portanto, que deve haver um acompanhamento rigoroso do sistema produtivo, garantindo que as condições estabelecidas no projeto sejam mantidas, tanto para as forças de protensão aplicadas



quanto para os cobrimentos da armadura, bem como, também, impedindo o aparecimento de fissuração antes da transferência da protensão aos elementos.

Com relação ao problema de fissuração inicial nos protótipos, houve tentativas no sentido de simular, numericamente, a abertura destas fissuras ocorrida quando ainda na pista de concretagem onde estavam os 6 primeiros protótipos. Estas envolveram a aplicação de carregamentos, concentrados e/ou distribuídos, suficientes para provocar a abertura de fissuras, os quais eram então retirados, sendo seguidos, a partir daí, os procedimentos de ensaio adotados para cada protótipo. Os resultados, entretanto, não foram satisfatórios.

Analisando-se numericamente o comportamento das demais lajes tipo ROTH, através de carregamentos distribuídos instantâneos, verificou-se que as flechas para as cargas de serviço estão contidas na situação de regime elástico.

Analisando-se, também, os efeitos de aplicação deste carregamento de serviço distribuído, ao longo do tempo, foi determinado, para cada uma das lajes, um fator (R) que relaciona a flecha ao final dos 5 anos com a flecha instantânea. Observando-se os fatores (R) obtidos para a laje 12, da análise de diferentes vãos, vê-se que há uma tendência de convergência entre eles, donde pode-se esperar que deva existir um fator (R) que seja representativo de cada um dos vários tipos de lajes, independente do vão livre considerado.

Neste trabalho considerou-se, para a determinação do fator R de algumas lajes, somente um vão livre. Sugere-se que, em continuidade a esta pesquisa, um maior número de vãos sejam analisados, para uma determinação mais precisa deste fator para cada uma das lajes. Sugere-se também que seja investigada a possibilidade de obtenção, para peças em concreto protendido, de uma expressão similar àquela considerada para o concreto armado, na NBR-6118 (1982), para ações de longa duração. Esta determinaria a flecha final em função da flecha instantânea, das deformações específicas na peça comprimida pela flexão, na armadura tracionada e, ainda, do coeficiente de deformação lenta.

A constante diferença observada entre os resultados numéricos referentes ao estado último, momento ou carga última,

apresentados pelos dois programas analisados, o programa VISCO e o programa denominado NBR, pode ter uma explicação baseada no fato seguinte.

O programa VISCO utiliza como características para os materiais, concreto e aço, relações constitutivas que pretendem representar com a maior fidelidade possível esses comportamentos até a ruptura. Por outro lado, o segundo programa baseia-se nos preceitos ditados pelas normas NBR 6118 (1982) e NBR 7197 (1989), tratando-se portanto, como usual, de uma solução mais conservadora. Isto parece claro quando verifica-se que seus resultados são sistematicamente inferiores aos do programa VISCO.

Como conclusão sobre o resultado final deste trabalho, as tabelas de desempenho dos elementos estudados, vê-se que estas apresentam valores para vãos admissíveis bem condizentes com aqueles adotados pelo fabricante. Não obstante, para as lajes de maior espessura, e pelo critério das deformações, os resultados aqui obtidos são mais conservadores.

#### Sugestões:

Sugere-se que duas características sejam implementadas ao programa VISCO. A primeira, e a mais importante, é a de que haja a possibilidade de aplicar-se incrementos de deslocamentos na estrutura, além da incrementação de carga já existente. Isto traria a grande vantagem de permitir a determinação do patamar existente na resposta carga/deslocamento, medida da ductilidade da peça, o que o programa atualmente não consegue representar.

A segunda é a de que o programa considere a utilização de cura a vapor das peças, acelerando portanto o processo de endurecimento do concreto.

Como continuação ao trabalho aqui apresentado sugere-se que seja estudado o comportamento destes elementos quando atuando em conjunto, como uma laje. Isto possibilitaria uma melhor compreensão do comportamento da estrutura nas suas condições reais de utilização.

**ANEXO A**

Tabela A.1 - Vãos livres máximos admissíveis para as lajes ROTH, considerando fluência sobre o peso próprio e 50% da sobrecarga. Tabela fornecida pelo fabricante

Designação	8	12	12S	12SS	16	16S	20	20S	24	24S	24SS
<b>Sobrecarga KN/m<sup>2</sup></b>	<b>Vãos livres máximos admissíveis (m)</b>										
0,5	4,45	5,80	6,65	7,40	8,30	9,00	9,90	10,05	10,45	10,75	10,90
1,0	4,30	5,55	6,45	7,25	8,10	8,80	9,65	9,85	10,30	10,65	10,80
1,5	4,15	5,35	6,30	7,05	7,90	8,60	9,45	9,70	10,15	10,50	10,70
2,0	4,00	5,15	6,10	6,90	7,70	8,40	9,20	9,50	9,95	10,35	10,60
2,5	3,85	4,90	5,90	6,70	7,50	8,20	9,00	9,35	9,80	10,25	10,50
3,0	3,70	4,70	5,75	6,55	7,30	8,00	8,75	9,15	9,65	10,10	10,45
4,0	3,35	4,30	5,20	5,95	6,85	7,60	8,30	8,80	9,30	9,85	10,25
5,0	3,05	3,95	4,85	5,50	6,40	7,10	7,85	8,45	8,95	9,55	10,10
6,0	2,85	3,70	4,50	5,15	6,00	6,65	7,40	8,00	8,50	9,30	9,90
7,0	2,65	3,50	4,25	4,85	5,70	6,30	7,05	7,60	8,10	8,90	9,45
8,0	2,50	3,30	4,05	4,60	5,40	6,00	6,70	7,20	7,75	8,55	9,10
9,0	2,40	3,15	3,85	4,40	5,15	5,70	6,40	6,90	7,45	8,20	8,75
10,0	2,30	3,00	3,70	4,20	4,95	5,50	6,15	6,65	7,15	7,95	8,45
12,5	2,10	2,75	3,35	3,80	4,50	5,00	5,65	6,10	6,60	7,35	7,80
15,0	1,90	2,55	3,10	3,50	4,20	4,65	5,25	5,65	6,15	6,85	7,30
17,5	1,80	2,35	2,90	3,30	3,90	4,35	4,90	5,30	5,80	6,45	6,85
20,0	1,65	2,20	2,70	3,10	3,70	4,10	4,65	5,00	5,45	6,10	6,50
25,0	1,50	2,00	2,45	2,65	3,35	3,70	4,20	4,55	5,00	5,55	5,95
30,0	1,40	1,85	2,25	2,25	3,05	3,25	3,85	4,15	4,60	5,15	5,50
35,0	1,20	1,70	1,95	1,95	2,85	2,85	3,60	3,80	4,30	4,80	5,15
40,0	-	1,60	1,70	1,70	2,50	2,50	3,35	3,35	3,90	4,55	4,85
45,0	-	1,50	1,50	1,50	2,25	2,25	3,00	3,00	3,50	4,30	4,60
50,0	-	1,35	1,35	1,35	2,00	2,00	2,75	2,75	3,20	4,10	4,35

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cordoalhas de aço para concreto protendido: NBR-7483.** Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Fio, barra e cordoalha de aço para armadura de protensão: NBR-6349.** Rio de Janeiro, 1982. 17p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto protendido: NBR-7197.** Rio de Janeiro, 1989. 71p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto armado: NBR-6118.** Rio de Janeiro, 1982. 76p.
- BARTH, Fernando. **Análise experimental de deformações em lajes retangulares de concreto armado sob carregamento linear.** Porto Alegre: Escola de Engenharia, 1983. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- BATISTA, Vicente de Paula. **Análise experimental das deformações em lajes retangulares de concreto armado simplesmente apoiadas submetidas à carga uniformemente distribuída.** Porto Alegre: Escola de Engenharia, 1984. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.

- CAMPAGNOLO, João Luiz. Análise experimental das deformações devido à flexão em lajes de concreto armado. Porto Alegre: Escola de Engenharia, 1980. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- CAMPOS F<sup>o</sup>, Américo. Procedimentos para o dimensionamento e a verificação de seções poligonais de concreto estrutural submetidas à flexão composta oblíqua. Porto Alegre: CPGEC-UFRGS. (a ser publicado)
- COMPANHIA SIDERÚRGICA BELGO-MINEIRA. Aços para concreto protendido; informações técnicas. Belo Horizonte, 1982. 23p.
- FUSCO, P.B.. Estruturas de concreto. São Paulo: MacGraw-Hill do Brasil, 1976. v.1: Fundamentos do projeto estrutural.
- GASTAL, Francisco P.S.L.. Análise numérico-experimental de um modelo reduzido de uma estrutura de contenção para centrais nucleares. Porto Alegre: Escola de Engenharia, 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- JIMENEZ MONTOYA, P.; GARCIA MESEGNER, A.; MORAN CABRE, F.. Hormigon armado. 7. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1973. v.1
- KLEIN, Dario Lauro. Medida experimental de deformações. Porto Alegre: CPGEC-UFRGS, 1975. 68p.
- LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E.. Construções de concreto. Rio de Janeiro: Interciência, 1977. v.1
- LEONHARDT, F.. Construções de concreto. Rio de Janeiro: Interciência, 1983. v.5

- ODEBRECHT, Rubens. **Sistemática de cálculo de elementos de concreto protendido.** Porto Alegre: Escola de Engenharia, 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- PETRUCCI, Eládio G.. **Concreto de cimento portland.** Porto Alegre: Globo, 1971.
- PFEIL, Walter. **Concreto protendido: processos construtivos, perdas de protensão, sistemas estruturais.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980.
- PRATES JUNIOR, Neri Pacheco. **Um modelo elasto-viscoplástico para análise de peças de concreto estrutural, submetidas a estados planos de tensão, através do método dos elementos finitos.** Porto Alegre: Escola de Engenharia, 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- SILVA, Daiçom Maciel da. **Análise experimental sobre o concreto, a aderência e a ancoragem de barras de aço para concreto armado.** Porto Alegre: Escola de Engenharia, 1986. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. v.2
- SÜSSEKIND, José Carlos. **Curso de concreto. Concreto armado.** Porto Alegre: Globo, 1980.
- VASCONCELOS, Augusto Carlos de. **Manual prático para a correta utilização dos aços no concreto protendido em obediência às normas atualizadas.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; Belo Horizonte: Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, 1980.
- VASCONCELOS, Augusto Carlos de. **O concreto no Brasil: recordes, realizações, história.** São Paulo: Copiare, 1985. 254p.

WOLFF, Geraldo. **Concreto protendido.** Porto Alegre: Escola de Engenharia, 1990. Notas de aula. Porto Alegre: Departamento de Engenharia Civil, UFRGS, 1990.