

**EFEITO DA CONTINUIDADE NO COMPORTAMENTO E NA  
RESISTÊNCIA DE LAJES MISTAS COM FÔRMA DE AÇO  
INCORPORADA**

**Paulo César de Campos**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"EFEITO DA CONTINUIDADE NO COMPORTAMENTO E NA  
RESISTÊNCIA DE LAJES MISTAS COM FÔRMA DE AÇO  
INCORPORADA"**

Paulo César de Campos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

---

Prof. José Márcio Fonseca Calixto  
DEES/UFMG - (Orientador)

---

Prof. Armando César Campos Lavall  
DEES/UFMG

---

Prof. Gilson Natal Guimarães  
UFG

---

M.Sc. Roberval José Pimenta  
CODEPAR

Belo Horizonte, 14 de agosto de 2001

## Resumo

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o efeito da continuidade no comportamento e na resistência do sistema de lajes mistas com fôrma de aço incorporada. Para isto, seis protótipos utilizando o perfil metálico Steel Deck MF-75 foram construídos em escala real e ensaiados, após a cura do concreto, em laboratório. Os protótipos foram posicionados sobre três apoios equidistantes, de modo a se obter dois vãos contínuos idênticos, e submetidos a um carregamento simétrico. A continuidade estrutural entre os vãos foi assegurada pela presença e continuidade da fôrma metálica, da tela soldada e de uma armadura posicionada sobre o apoio intermediário. A análise do comportamento carga x flecha no meio do vão, carga x deslizamento relativo de extremidade, carga x deformação no aço e carga x curvatura na região do apoio intermediário revelou a ductilidade e a elevada resistência dos protótipos. Apenas um único modo de ruptura foi encontrado nos ensaios: combinação de cisalhamento longitudinal com escoamento da armadura sobre o apoio interno. A análise comparativa com resultados de ensaios de protótipos simplesmente apoiados revelou uma melhoria no desempenho global do sistema de lajes mistas devido a continuidade, com o aumento expressivo na rigidez e na capacidade de carga das lajes. Uma vez que na prática as lajes mistas são contínuas sobre três ou mais apoios, seria necessário especificar apenas a armadura sobre os apoios intermediários.

## **Abstract**

The goal of this work was to evaluate the effects of continuity on the behavior and strength of composite slabs with ribbed decking. Six two span one-way prototypes, using **Steel Deck MF-75** profiled sheeting, were built and tested in laboratory. The prototypes were placed over three equally spaced supports and subjected to a symmetrical loading. The effect of continuity was ensured by the presence and continuity of the steel sheeting, the wire mesh and the hogging reinforcement placed over the internal support. Throughout the loading tests, midspan deflections, end slips and strains in the ribbed decking and the reinforcing bars were measured. The test results showed expressively the gain in ductility and strength of the continuous slabs. In all tests, the failure mode consisted of a combination of shear bond and yielding of the reinforcement over the internal support. The comparative study with test results of single span slabs showed a significant increase in stiffness and load carrying capacity due to continuity. Since in practice the composite slabs are continuous over three or more supports, it would be only necessary to specify the hogging reinforcement.

Dedico este trabalho à minha querida mãe, cujo o esforço e sacrifício em muito contribuíram na realização de mais esta etapa de minha vida..

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Prof. Calixto, pela sua competência, bom senso e por acreditar na realização do trabalho.

Ao meu co-orientador, Prof. Lavall, pela disposição sincera em colaborar a qualquer momento.

À CAPES, pela bolsa concedida durante todo o período de desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

À CODEME S.A, na pessoa do engenheiro Roberval Pimenta, por viabilizar o estudo através do fornecimento do material e infra-estrutura necessários.

Ao engenheiro Rodrigo Monteiro, da METFORM S. A., e aos funcionários Geraldo, Hidelbrando, Érik e Ricardo, do LAEES, pela ajuda imprescindível durante as etapas de instrumentação, concretagem e ensaio da pesquisa.

Ao Eliezer, do LAMEC, pela ajuda durante a fase de dissertação da pesquisa.

Aos colegas de curso, professores e funcionários do DEES pela convivência e amizade desenvolvidos no decorrer deste trabalho.

À C.R. GONTIJO Engenharia de Projetos, através dos meus amigos Carlos Gontijo e Cristina Cassimiro, pelo apoio e incentivo constantes.

## ÍNDICE

<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução .....	1
1.2 Justificativa do estudo.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Organização do trabalho .....	5
1.5 Notação .....	5
<b>2 Revisão bibliográfica.....</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução .....	7
2.2 Revisão bibliográfica .....	8
<b>3 Caracterização e fabricação dos protótipos.....</b>	<b>15</b>
3.1 Introdução .....	15
3.2 Características gerais .....	15
3.2.1 Série 2A .....	17
3.2.2 Série 2B.....	18
3.2.3 Resumo das características dos protótipos.....	18
3.3 Detalhamento da armadura .....	19
3.3.1 Série 2A .....	20
3.3.2 Série 2B.....	21
3.4 Materiais utilizados.....	22
3.4.1 Fôrma de aço.....	22
3.4.2 Barras de aço.....	24
3.4.3 Tela soldada .....	24
3.4.4 Concreto .....	24
3.5 Montagem e concretagem dos protótipos .....	26
<b>4 Procedimento dos ensaios e instrumentação.....</b>	<b>29</b>
4.1 Introdução .....	29
4.2 Considerações iniciais.....	29

4.3	Parâmetros analisados.....	34
4.3.1	Carga aplicada.....	34
4.3.2	Deslizamento relativo .....	35
4.3.3	Flecha no meio do vão .....	37
4.3.4	Deformações das barras de aço da armadura.....	40
4.3.5	Deformações da fôrma metálica .....	41
4.4	Procedimento dos ensaios.....	45
<b>5</b>	<b>Apresentação e análise dos resultados.....</b>	<b>46</b>
5.1	Introdução .....	46
5.2	Apresentação dos resultados.....	47
5.2.1	Série 2B.....	47
5.2.2	Série 2A .....	51
5.2.3	Resumo dos resultados.....	53
5.3	Análise dos resultados .....	56
5.3.1	Considerações iniciais.....	56
5.3.2	Comportamento dos protótipos da Série 2A.....	56
5.3.3	Comportamento dos protótipos da Série 2B .....	65
5.3.4	Determinação da distribuição de carga nos apoios dos protótipos .....	74
5.3.5	Análise do modo de ruptura dos protótipos.....	85
<b>6</b>	<b>Análise comparativa com o sistema de lajes mistas simplesmente apoiado</b> .....	<b>92</b>
6.1	Introdução .....	92
6.2	Série 2A x protótipo 2.....	92
6.3	Série 2B x protótipo 5.....	98
<b>7</b>	<b>Conclusões e recomendações .....</b>	<b>100</b>
7.1	Introdução .....	100
7.2	Conclusões .....	101
7.3	Recomendações para estudos futuros .....	104
	<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>105</b>
	<b>Apêndice A - Cálculo das armaduras.....</b>	<b>108</b>
A.1	Introdução .....	108



A.2 Série 2A .....	108
A.2.1 Momento externo atuante sobre o apoio intermediário .....	108
A.2.2 Dimensionamento ao momento externo .....	110
A.3 Série 2B.....	111
A.3.1 Momento externo atuante sobre o apoio intermediário .....	111
A.3.2 Dimensionamento ao momento externo .....	112
<b>Apêndice B - Propriedades mecânicas do aço do perfil metálico .....</b>	<b>114</b>
<b>Apêndice C - Tabelas de resultados.....</b>	<b>116</b>
C.1 Introdução .....	116
C.2 Tabelas.....	117
<b>Apêndice D - Fotografias .....</b>	<b>141</b>

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Características dos protótipos ensaiados por Melo [ 9 ] .....	16
Tabela 3.2 – Resumo das principais características dos protótipos .....	19
Tabela 3.3 – Dimensões e propriedades geométricas por metro de largura do <i>Steel Deck MF-75</i> .....	23
Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas da chapa de aço utilizada na fabricação do <i>Steel Deck MF-75</i> (média de valores) .....	23
Tabela 3.5 – Características das telas soldadas utilizadas .....	24
Tabela 3.6 – Resistência à compressão inicial do concreto utilizado nos protótipos .....	25
Tabela 3.7 – Média de valores das propriedades mecânicas do concreto nas datas de ensaio dos protótipos .....	26
Tabela 5.1 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios dos protótipos.....	54
Tabela 5.2 – Resumo das reações de apoio dos protótipos ensaiados .....	84
Tabela B1 – Dimensões dos corpos de prova e propriedades mecânicas do aço do perfil metálico. ....	114
Tabela C1 – Resultados obtidos para o protótipo <i>P1S2A</i> (Série 2A) .....	117
Tabela C2 – Resultados obtidos para o protótipo <i>P2S2A</i> (Série 2A) .....	120
Tabela C3 – Resultados obtidos para o protótipo <i>P3S2A</i> (Série 2A) .....	123
Tabela C4 – Resultados obtidos para o protótipo <i>P1S2B</i> (Série 2B).....	126
Tabela C5 – Resultados obtidos para o protótipo <i>P2S2B</i> (Série 2B).....	130
Tabela C6 – Resultados obtidos para o protótipo <i>P3S2B</i> (Série 2B).....	133
Tabela C7 – Resultados obtidos para o <i>Protótipo 2</i> (Melo [9]).....	136
Tabela C8 – Resultados obtidos para o <i>Protótipo 5</i> (Melo [9]).....	137
Tabela C9 – Reações de apoio obtidas para o protótipo <i>P1S2A</i> (Série 2A) .....	138
Tabela C10 – Reações de apoio obtidas para o protótipo <i>P2S2A</i> (Série 2A) .....	138
Tabela C11 – Reações de apoio obtidas para o protótipo <i>P3S2A</i> (Série 2A) .....	139
Tabela C12 – Reações de apoio obtidas para o protótipo <i>P1S2B</i> (Série 2B) .....	139
Tabela C14 – Reações de apoio obtidas para o protótipo <i>P3S2B</i> (Série 2B) .....	140

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Detalhe de uma laje mista com fôrma de aço incorporada após a cura do concreto. ....	2
Figura 2.1 – Esquema de ensaio dos protótipos com vãos contínuos.....	10
Figura 2.2 – Detalhe da seção transversal armada (medidas em mm).....	10
Figura 3.1 – Detalhe dos protótipos da Série 2A (medidas em mm).....	17
Figura 3.2 – Detalhe dos protótipos da Série 2B (medidas em mm).....	18
Figura 3.3 – Detalhamento da armadura dos protótipos da Série 2A (medidas em cm)	20
Figura 3.4 – Detalhamento da armadura dos protótipos da Série 2B (medidas em cm)	21
Figura 3.5 – Dimensões do <i>Steel Deck MF-75</i> (medidas em mm).....	22
Figura 3.6 – Detalhe do esquema de montagem dos protótipos .....	27
Figura 4.1a – Esquema de ensaio utilizado nos protótipos da série 2A – Vista Lateral.	30
Figura 4.1b – Aparato de carga utilizado nos ensaios da série 2A (medidas em mm) – Vista em Planta .....	31
Figura 4.2a – Esquema de ensaio utilizado nos protótipos da série 2B – Vista Lateral.	32
Figura 4.2b – Aparato de carga utilizado nos ensaios da série 2B (medidas em mm) – Vista em Planta .....	33
Figura 4.3 – Detalhe da leitura do deslizamento relativo: (a) Posicionamento dos relógios comparadores (vista em planta) (b) Vista em perspectiva da fixação dos relógios à laje. ....	36
Figura 4.4 – Detalhe da leitura da flecha no meio do vão dos protótipos da série 2A: (a) Posicionamento dos relógios comparadores (vista em planta); (b) Detalhe da fixação do relógio comparador à laje mista. ....	38
Figura 4.5 – Detalhe da leitura da flecha no meio do vão dos protótipos da série 2B: (a) Posicionamento dos relógios comparadores (vista em planta); (b) Detalhe da fixação do relógio comparador à laje mista. ....	39
Figura 4.6 – Detalhe da localização dos extensômetros nas barras de aço em cada série de protótipos (medidas em cm) .....	40
Figura 4.7 – Detalhe da localização dos extensômetros na fôrma de aço dos protótipos da série 2A (medidas em cm). ....	42

Figura 4.8 – Detalhe da localização dos extensômetros na fôrma de aço dos protótipos da série 2B. ....	43
Figura 5.1 – Perfil das fissuras no protótipo P1S2B.....	48
Figura 5.2 – Perfil das fissuras no protótipo P1S2A.....	51
Figura 5.3 – Detalhes da flambagem local e do abaulamento do perfil metálico ao final do ensaio. ....	54
Figura 5.4 – Aspecto dos protótipos ao término do ensaio: (a) série 2A; (b) série 2B...	55
Figura 5.5– Curva carga x flecha no meio do vão do protótipo P2S2A .....	57
Figura 5.6 – Curva carga x deslizamento relativo dos apoios extremos do protótipo P2S2A.....	58
Figura 5.7 – Curva carga x deformação para fibra inferior da fôrma metálica do protótipo P2S2A sob a linha de carga externa.....	60
Figura 5.8 – Curva carga x deformação para a fibra superior da fôrma metálica do protótipo P3S2A sob a linha de carga extrema.....	61
Figura 5.9 – Curva carga x deformação da fôrma metálica do protótipo P1S2A na região do apoio intermediário.....	62
Figura 5.10 – Cálculo da curvatura da seção transversal mista a partir das deformações da fôrma metálica.....	63
Figura 5.11 – Curva carga x curvatura da fôrma metálica do protótipo P1S2A na região do apoio intermediário. ....	64
Figura 5.12 – Curva carga x flecha no meio do vão do protótipo P3S2B .....	66
Figura 5.13 – Curva carga x deslizamento relativo dos apoios extremos do protótipo P3S2B.....	67
Figura 5.14 – Curva carga x deformação da fibra inferior da fôrma metálica do protótipo P3S2B no meio do vão. ....	68
Figura 5.15 – Curva carga x deformação da fibra superior da fôrma metálica do protótipo P3S2B no meio do vão. ....	69
Figura 5.16 – Curva carga x deformação para a fibra inferior e superior da fôrma metálica do protótipo P3S2B na região do apoio intermediário. ....	70
Figura 5.17 – Curva carga x curvatura da fôrma metálica do protótipo P3S2B na região do apoio intermediário. ....	71
Figura 5.18 – Curva tensão x deformação para aços laminados a quente. ....	72

Figura 5.19 – Curva carga x deformação na barra da armadura negativa do protótipo P1S2B sobre o apoio intermediário.....	73
Figura 5.20– Distribuição de tensões ao longo da fôrma metálica para o momento resistente atuante na seção mista. ....	75
Figura 5.21 – Esquema de cálculo das reações de apoio para os protótipos: (a) série 2A (b) série 2B.....	77
Figura 5.22 – Curva reação no apoio extremo x carga para os protótipos P2S2A e P3S2A (teórica e experimental). ....	79
Figura 5.23 – Curva reação no apoio intermediário x carga para os protótipos P2S2A e P3S2A (teórico e experimental).....	81
Figura 5.24 – Curva reação no apoio extremo x carga para os protótipos P1S2B e P3S2B.....	82
Figura 5.25 – Curva carga x flecha no meio do vão do protótipo P1S2B. ....	83
Figura 5.26 – Curva momento x curvatura do vão 2 do protótipo P3S2A .....	86
Figura 5.27 – Curva carga total aplicada x curvatura na região do apoio intermediário do protótipo P3S2A.....	87
Figura 5.28 – Curva carga total aplicada x curvatura na região do apoio intermediário do protótipo P2S2A.....	88
Figura 5.29 – Curva momento x curvatura no vão 2 do protótipo P1S2B .....	89
Figura 5.30 – Curva momento x curvatura no vão 1 do protótipo P3S2B .....	90
Figura 5.31 – Curva momento x curvatura no apoio interno do protótipo P3S2B.....	91
Figura 6.1 – Esquema do protótipo 2.....	93
Figura 6.2 – Curva carga no vão x flecha no meio do vão dos protótipos 2 e P1S2A ...	93
Figura 6.3 – Curva carga no vão x deslizamento relativo de extremidade dos protótipos 2 e P1S2A. ....	95
Figura 6.4 – Curva esforço cortante x deslizamento relativo de extremidade no apoio fixo dos protótipos da série 2A e do protótipo 2. ....	96
Figura 6.5 – Esquema do protótipo 5.....	98
Figura 6.6 – Curva esforço cortante x deslizamento relativo de extremidade no apoio fixo dos protótipos P1S2B, P3S2B e 5.....	99
Figura A1 – Esquema de cálculo para os protótipos da série 2A .....	109
Figura A2 – Seção mista de largura B submetida à flexão normal simples .....	110

Figura A3 – Esquema de cálculo para os protótipos da série 2B .....	111
Figura B1 – Detalhe do corpo-de-prova (medidas em mm) .....	114
Figura B2 – Gráfico tensão x deformação do CP 1 .....	115
Figura B3 – Gráfico tensão x deformação do CP 2 .....	115
Figura D1 – Detalhe da fissura principal abaixo da linha de carga extrema .....	141
Figura D2 – Detalhe da flambagem local da fôrma metálica .....	142
Figura D3 – Detalhe da fissura principal devido ao momento atuante no apoio interno. .....	142
Figura D4 – Detalhe do deslizamento relativo da extremidade .....	143

## Capítulo 1

### Introdução

#### 1.1 Introdução

Embora muito difundido nos Estados Unidos, Europa e Austrália, o uso do sistema de lajes mistas com fôrma de aço incorporada em edificações é recente no Brasil. Introduzido no mercado brasileiro de construção civil na década de 90, este sistema estrutural tem sido muito utilizado nos últimos anos devido às suas vantagens econômicas e estruturais. De fato o sistema de lajes mistas pode proporcionar prazos menores de execução do empreendimento, principalmente quando aplicado a construções em aço, além de melhorar o desempenho global da estrutura. A sua utilização, contudo, não se restringe apenas a construções em aço, podendo ser aplicado a estruturas de concreto ou madeira.

O sistema de lajes mistas resulta da combinação estrutural de dois elementos principais: a fôrma metálica (*Steel Deck*) e o concreto. O fundamento deste sistema consiste em que seus elementos trabalhem conjuntamente, aproveitando cada um suas melhores características mecânicas. A fôrma metálica, durante a etapa de construção, deve resistir às cargas relativas ao peso do concreto fresco, operários, equipamentos e demais sobrecargas. A sua resistência deve ser verificada pelos procedimentos aplicáveis aos perfis de chapa fina dobrada a frio. Após a cura do concreto, conforme mostra a figura 1.1, a fôrma deve servir, total ou parcialmente, como armadura de tração da laje. Para isto, é imprescindível alcançar uma aderência mecânica entre o aço da fôrma e o concreto, superior ao esforço de cisalhamento longitudinal na interface dos dois elementos, caracterizando assim, um comportamento estrutural misto.

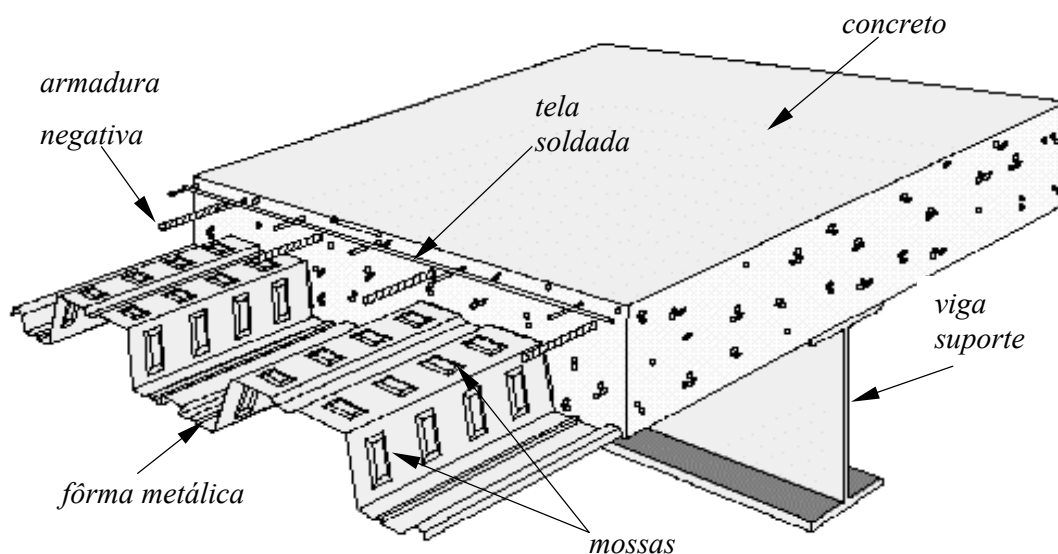


Figura 1.1 – Detalhe de uma laje mista com fôrma de aço incorporada após a cura do concreto.

Atualmente, o mecanismo mais utilizado para obter tal aderência é o que emprega saliências (mossas) estampadas nas partes inclinadas e/ou planas da fôrma metálica. As características das mossas, tais como geometria e profundidade, influem fortemente na resistência ao cisalhamento horizontal do sistema de lajes mistas, sendo muito comum que cada fabricante de fôrma desenvolva um padrão próprio, desde que comprove experimentalmente a eficiência das mesmas.

O concreto, normal ou leve, deve resistir aos esforços de compressão e cisalhamento vertical. A resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) é, usualmente, igual ou superior a 20 MPa. As fissuras decorrentes do processo de retração do concreto e da variação da temperatura devem ser controladas posicionando-se uma armadura nominal, em geral uma tela soldada, nas duas direções da laje.

O modo de ruptura mais verificado experimentalmente em lajes mistas é o cisalhamento longitudinal entre a fôrma e o concreto, caracterizado pelo deslizamento relativo entre os dois materiais. As normas de cálculo atuais prevêm dois métodos de



verificação, ambos dependentes de ensaios experimentais: o método  $m-k$  e o método da interação parcial. Os outros possíveis estados limites últimos que devem ser verificados incluem resistência ao momento fletor, resistência à força cortante vertical, resistência ao puncionamento e resistência ao momento fletor, quando a carga é concentrada ou em linha.

Embora as principais normas de projeto permitam a consideração estrutural da continuidade, as lajes mistas são usualmente projetadas como simplesmente apoiadas mesmo em situações onde se têm múltiplos vãos. Isto se deve ao fato de que o comportamento e a resistência das lajes com vãos simples são bem compreendidos teórica e experimentalmente. Neste caso a armadura sobre os apoios internos pode ser totalmente desprezada e apenas uma taxa mínima é utilizada para se atender a critérios de utilização. Apesar disso, a continuidade estrutural da laje mista pode ser vantajosa em diversas situações:

- Quando se utiliza escoramento durante a etapa construtiva da laje mista;
- Quando não se utiliza nenhum escoramento na etapa construtiva e a carga atuante na laje for elevada em relação seu peso próprio de modo a determinar a escolha da fôrma metálica;
- Quando se têm lajes mistas relativamente esbeltas, de modo que a flecha constitui o fator preponderante no dimensionamento. A continuidade pode ser essencial para se alcançar a rigidez necessária ao controle das flechas;
- Quando o projeto da laje mista em situação de incêndio demanda continuidade e considerável ductilidade das regiões sobre os apoios internos, sendo a armadura colocada para proporcionar a eficiência desejada.

## 1.2 Justificativa do estudo

Atualmente, a utilização da continuidade estrutural em lajes mistas com fôrma metálica incorporada pode ser feita, segundo o Eurocode 4 [1], mediante a aplicação de processo simplificado de cálculo. O dimensionamento ao cisalhamento longitudinal,

principal modo de ruptura verificado experimentalmente, é feito substituindo-se os vãos contínuos por vãos bi-apoiados com o comprimento reduzido por um determinado fator, conforme o vão analisado (interno ou externo). Este fator de redução é obtido utilizando-se o diagrama de momento teórico da estrutura contínua. Não existe, portanto, um método racional de dimensionamento, baseado no comportamento real da estrutura, tal como ocorre para as lajes convencionais de concreto armado. Neste sentido, torna-se necessário compreender o comportamento do sistema de lajes mistas contínuas a fim de se aferir os procedimentos existentes ou buscar métodos mais racionais de cálculo.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo deste trabalho é estudar os efeitos da continuidade do sistema de lajes mistas com fôrma de aço incorporada sobre vigas metálicas. Dentro desse objetivo, destacam-se os seguintes aspectos:

- Avaliar o comportamento e a resistência da laje mista contínua com fôrma de aço incorporada.
- Analisar comparativamente os resultados obtidos com aqueles desenvolvidos com lajes mistas de vão simples.

É importante salientar que a análise do comportamento da laje será feita apenas para a situação após a cura do concreto, ou seja, quando os dois materiais, fôrma e concreto, estiverem trabalhando juntos. Isto se justifica pelo fato de que na fase construtiva, isto é, antes da cura do concreto, a armadura não proporciona continuidade estrutural ao sistema de lajes mistas.

Devido às características da configuração de ensaios adotada, este trabalho contempla somente o estudo de vãos extremos contínuos. Vãos internos possuem condições de contorno diferentes e, portanto, os resultados aqui obtidos não se aplicam a esta situação.

## 1.4 Organização do trabalho

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos trabalhos mais importantes utilizados para a compreensão do comportamento estrutural do sistema de lajes mistas. A caracterização dos protótipos analisados, bem como o processo de preparação destes para o ensaio em laboratório, podem ser encontrados no capítulo 3. O procedimento adotado nos ensaios e o detalhamento do processo de instrumentação dos protótipos são fornecidos no capítulo 4. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios, além de uma análise do comportamento dos protótipos. O capítulo 6 mostra uma análise comparativa entre os resultados obtidos para o sistema considerado neste estudo e o sistema simplesmente apoiado, ambos aplicados a construções metálicas. Finalmente, as conclusões do trabalho e recomendações para estudos futuros são encontradas no capítulo 7.

## 1.5 Notação

Quando não for especificado, a seguinte notação será empregada nos diversos capítulos deste trabalho:

$A_s$  = Área de aço;

$b$  = Comprimento de influência de uma onda baixa (nervura) da fôrma metálica;

$b_o$  = Largura de uma onda baixa (nervura) da fôrma metálica;

$b_d$  = Largura da fôrma metálica;

$B$  = Largura da laje mista;

$BC$  = Bloco de concreto

$d_d$  = Altura da fôrma metálica;

$d$  = Altura útil (distância do ponto de aplicação da resultante das tensões de tração na armadura ao ponto de maior encurtamento de uma seção transversal de peça fletida, medida normalmente à linha neutra);

$DRE$  = Relógio comparador para leitura do deslizamento relativo de extremidade;

$DV$  = Relógio comparador para leitura do deslocamento vertical no meio do vão;

$f_c$  = Resistência à compressão do concreto;

$f_{ck}$  = Resistência característica à compressão do concreto;

$f_{cd}$  = Resistência à compressão de cálculo do concreto;

$f_{yk}$  = Tensão característica de escoamento à tração do aço;

$f_{yd}$  = Tensão de escoamento à tração de cálculo do aço;

H = Altura total da laje;

L = Comprimento da laje medido de eixo a eixo dos apoios extremos;

$\ell$  = Vão livre total da laje;

$\ell'$  = Vão de cisalhamento da laje;

P = Pino;

R = Rolete;

Vão 1 = Vão situado entre o apoio móvel e o apoio intermediário;

Vão 2 = Vão situado entre o apoio fixo e o apoio intermediário;

$V_{ut}$  = Cisalhamento transversal experimental último total;

x = Altura do bloco comprimido de concreto;

$\varepsilon_{sup}$  = Deformação medida na fibra superior da fôrma metálica;

$\varepsilon_{inf}$  = Deformação medida na fibra inferior da fôrma metálica;

$\varepsilon_{yd}$  = Deformação correspondente a tensão de escoamento de cálculo à tração do aço;

$\sigma_{sup}$  = Tensão na fibra superior da fôrma metálica;

$\sigma_{inf}$  = Tensão na fibra inferior da fôrma metálica;

$\phi$  = Diâmetro da barra.

## Capítulo 2

### Revisão bibliográfica

#### 2.1 Introdução

O trabalho de revisão da literatura sobre o tema em questão compreendeu uma intensa e exaustiva pesquisa às principais fontes, nacionais e internacionais, de informações conhecidas. Apesar de pesquisado há mais de 30 anos, a maior parte dos estudos experimentais sobre o sistema de lajes mistas com fôrma metálica incorporada foi desenvolvida com protótipos simplesmente apoiados. Além disso, as pesquisas são conduzidas, em geral, pelos fabricantes da fôrma metálica e nem sempre os resultados são divulgados no meio técnico. Ainda assim, obteve-se uma quantidade razoável de material bibliográfico sobre o estudo da continuidade de vãos em lajes mistas.

As principais fontes de informação consultadas incluem o *American Institute of Steel Construction (AISC)*, *Steel Deck Institute (SDI)*, *British Steel Institute (BSI)*, *Steel Construction Institute (SCI)*, *American Concrete Institute (ACI)*, *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, *École Polytechnique Fédérale de Lausanne (ICOM – EPFL)*, *Australian Institute of Steel Construction (AISC)*, *European Convention for Constructional Steelwork (ECCS)* e *Eurocode*.

A revisão aqui apresentada segue, preferencialmente, uma ordem cronológica, mostrando a evolução e os aspectos do tema estudados.

## 2.2 Revisão bibliográfica

Em dezembro de 1981, Roeder [2] apresentou um estudo experimental sobre o comportamento de pisos mistos com fôrmas metálicas incorporadas submetidos a cargas concentradas. O estudo reproduzia o sistema de pisos existentes em instalações do governo dos Estados Unidos da América onde a fôrma metálica e a tela soldada eram contínuas sobre os apoios intermediários. Cada protótipo foi testado até à ruptura, segundo procedimento análogo ao ensaio de “*shear bond*” adotado pela norma ASCE vigente. Os resultados destes ensaios revelaram que a continuidade das lajes mistas restringe as flechas no meio do vão, resultando em uma grande capacidade em resistir à carga imposta. Tal fato evidenciou a natureza conservadora dos procedimentos de cálculo da referida norma americana. O autor destacou, entretanto, que os resultados obtidos não poderiam ser utilizados na prática de projeto, uma vez que a influência de parâmetros, tais como tipo de fôrma metálica, presença ou não de conectores de cisalhamento, comprimento do vão e altura da laje, não foram avaliados. Seriam necessários mais estudos a fim de se desenvolver formulações capazes de prever a resistência do sistema misto que pudessem ser usadas pelos projetistas.

Em 1989, Patrick [3] discutiu a questão da ductilidade em lajes mistas contínuas com fôrma metálica incorporada. A importância da continuidade foi destacada, especialmente no caso de construções escoradas, predominantes na Austrália. As regiões de momento no vão e sobre os apoios internos das lajes contínuas foram analisadas separadamente e uma classificação da ductilidade foi proposta para as regiões de momento no vão.

As regiões sobre os apoios internos, segundo o autor, comportam-se essencialmente da mesma forma que as lajes convencionais de concreto armado. Portanto, as classificações de ductilidade contidas nas normas de concreto são válidas conforme a quantidade de armadura adotada para a seção transversal (seção subarmada ou superarmada). A ductilidade das seções no vão, entretanto, não é facilmente determinada devido aos diferentes tipos de comportamento exibido por estas seções na ruptura. Devido à escassez de ensaios realizados com lajes mistas contínuas, o autor

baseou-se em resultados de ensaios de protótipos simplesmente apoiados a fim de prever a ductilidade destas seções. Os três principais modos de ruptura observados experimentalmente foram classificados quanto à ductilidade:

- Modo dúctil: ruptura por flexão, com escoamento prévio do perfil metálico (seção subarmada) e por combinação de ruptura por flexão de seção subarmada com cisalhamento longitudinal (*shear bond*);
- Modo semidúctil: ruptura por flexão, com escoamento do perfil metálico coincidente com esmagamento do concreto (seção normalmente armada) e por combinação de ruptura por flexão de seção normalmente armada com cisalhamento longitudinal;
- Modo não-dúctil: ruptura por flexão, com esmagamento do concreto sem escoamento do perfil (seção superarmada) e por combinação de ruptura por flexão de seção superarmada com cisalhamento longitudinal.

Estas classificações foram recomendadas para fins de projeto, desde que os respectivos modos de ruptura fossem observados nas seções dos vãos das lajes mistas contínuas. O autor destacou, ainda, a importância de se permitir a redistribuição de momentos apenas em projetos dúctil e semidúctil de lajes mistas contínuas.

Com o objetivo de avaliar experimentalmente a influência da presença ou não de conectores de extremidade, de mossas e de armadura sobre os apoios internos no comportamento e resistência de lajes mistas com fôrma metálica incorporada, foram realizados, na École Polytechnique Fédérale de Lausanne [4] [5], uma série de 17 ensaios envolvendo protótipos em escala real, simplesmente apoiados e com três vãos contínuos (figura 2.1). Ensaios de ancoragem de extremidade com conectores (*push off test*) e aderência das mossas (*pull out test*) também foram realizados.

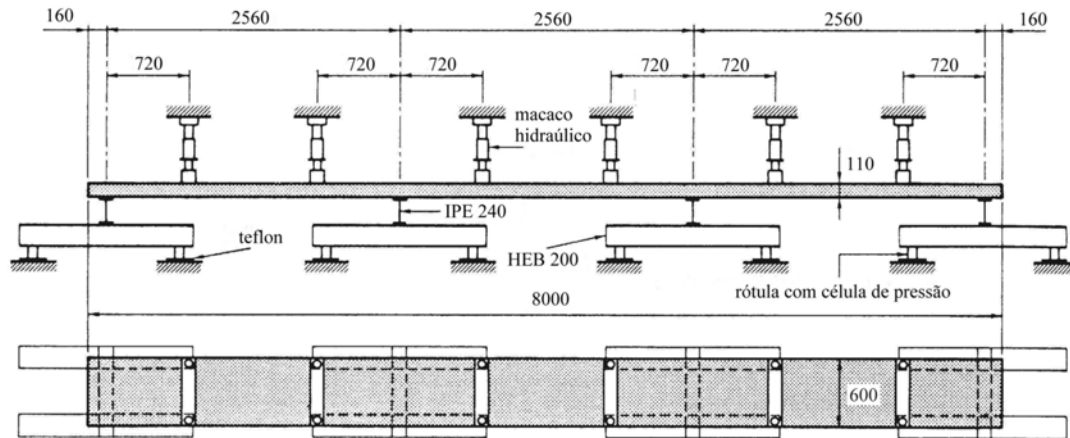


Figura 2.1 – Esquema de ensaio dos protótipos com vãos contínuos.

Os protótipos testados incorporavam o perfil trapezoidal *Hibond 55*, com mossas estampadas nas partes inclinadas. Nas regiões dos apoios internos foram utilizados dois tipos de seções transversais: não-armada ou armada (figura 2.2).

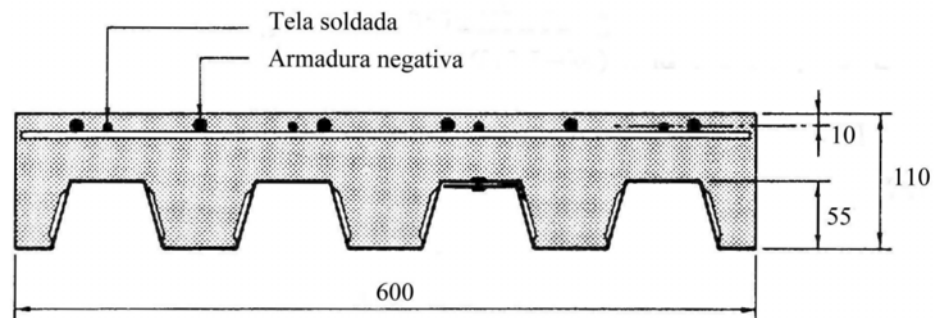


Figura 2.2 – Detalhe da seção transversal armada (medidas em mm)

Nos protótipos com seções não-armadas a tela soldada (150x150x6 mm) foi interrompida sobre os apoios intermediários. Para os protótipos armados, além da tela soldada foram utilizadas seis barras de 10 mm de diâmetro que se estendem por 30 cm em cada direção, a partir do eixo do apoio intermediário. A quantidade desta armadura foi determinada de tal modo que as regiões dos apoios internos da laje apresentassem



resistência à flexão superior a dos vãos. Em todos os casos, a fôrma metálica era contínua sobre os apoios internos.

Foram medidos, durante os ensaios, além dos deslizamentos de extremidade, flechas no meio dos vãos e deformações na fôrma metálica e no concreto, as forças aplicadas por cada macaco hidráulico e as reações nos apoios. Isto permitiu a obtenção direta dos diagramas de esforço cortante e momento fletor para cada protótipo. O modo de ruptura observado para cada protótipo foi descrito em detalhes e uma análise do comportamento e da resistência dos protótipos foi apresentada com base nas relações carga uniforme equivalente x flecha no meio do vão, carga uniforme equivalente x deslizamento de extremidade, carga uniforme equivalente x deformação e momento x curvatura da seção transversal no meio do vão e nos apoios intermediários, bem como nos diagramas de esforço cortante e momento fletor. Nos protótipos com três vãos, os vãos externo e interno foram analisados separadamente.

Os protótipos com seções não armadas na região do apoio interno exibiram comportamento e resistência muito similar aos protótipos simplesmente apoiados. Com relação ao comportamento e resistência dos vãos externos dos protótipos totalmente armados, os autores apresentaram as seguintes conclusões:

- A ruptura foi devida a uma combinação de cisalhamento longitudinal com escoamento da armadura sobre os apoios internos;
- A presença da armadura sobre os apoios internos reduz consideravelmente a flecha no meio do vão;
- A presença da armadura sobre os apoios internos permite grande redistribuição de momentos devido à formação de rótulas plásticas nas seções sobre os apoios;
- A armadura colocada sobre os apoios internos possui grande influência na magnitude do deslizamento de relativo de extremidade.

Com base neste trabalho, Daniels e Crisinel [6] [7] apresentaram, posteriormente, um novo procedimento de cálculo. O procedimento consiste da

combinação de resultados de testes de verificação da resistência ao cisalhamento longitudinal (*shear bond tests*) e da análise numérica para prever o comportamento e a resistência da laje mista, sendo uma alternativa aos testes em escala real. As principais vantagens deste método, destacadas pelos autores, são: versatilidade e custos reduzidos; estimativa das deformações para cargas de trabalho e a inclusão de variáveis adicionais tais como conectores de cisalhamento e armaduras adicionais. O método também pode ser usado no desenvolvimento de novos tipos de fôrmas e mossas. Uma possível desvantagem deste método seria a redução na capacidade máxima de carga quando comparada à capacidade obtida nos ensaios em escala real.

Ainda em 1990, Stark e Brekelmans [8] discutiram o uso da análise plástica no dimensionamento à flexão de lajes mistas contínuas como alternativa mais racional aos métodos tradicionais de análise admitidos pelas principais normas existentes, incluindo o Eurocode 4: análise linear com redistribuição de momentos e utilização de vãos simplesmente apoiados. Os autores destacaram as situações em que o uso da continuidade pode ser vantajoso no projeto de lajes mistas, bem como as principais limitações e objeções aos referidos métodos de análise.

O comportamento das seções transversais situadas no meio do vão e na região do apoio interno foi descrito pelas relações momento-curvatura, obtidas a partir de investigações numérica e experimental das seções situadas sobre os apoios internos. A investigação numérica, contudo, não considerou o deslizamento relativo entre a fôrma e o concreto na região do vão. Os ensaios foram realizados a fim de se comprovar a influência de três parâmetros na capacidade de rotação das seções: posição e percentagem de armadura, continuidade da fôrma metálica sobre o apoio e a largura do apoio (mesa superior da viga suporte). A armadura necessária ao controle da fissuração foi utilizada também como armadura de continuidade, em quantidades de 0,1 %, 0,2% e 0,4% da área de concreto acima da onda superior da fôrma. Os dois últimos valores referem-se a construções não-escoradas e escoradas respectivamente, conforme estabelecido no Eurocode 4. Contudo, o uso da análise não-linear na prática diária de cálculo é pouco apropriado e os autores desenvolveram métodos simplificados para o cálculo dos momentos últimos. Uma análise teórica do comportamento carga-flecha foi

realizada baseada no comportamento do sistema de vigas mistas, sendo evidenciadas diferenças significativas nas cargas de ruptura obtidas com os métodos simplificados dados pelo Eurocode 4 e usando-se a teoria plástica. Esta análise também resultou em uma expressão simplificada capaz de prever a capacidade de rotação necessária da seção transversal situada no apoio interno.

Como conclusão geral, os autores ressaltaram que a armadura e não o concreto, é crítica para a capacidade de rotação da seção mista. Portanto, a limitação de altura da área de concreto comprimida pode ser suprimida e substituída por uma formulação exata para a ductilidade da armadura. Além disso, para o estado limite último, pode ocorrer uma considerável redistribuição de momentos e caso a armadura utilizada possua ductilidade suficiente, a análise plástica pode ser usada em vãos limitados a 5 m, aproximadamente, para as lajes avaliadas.

No Brasil, o estudo do sistema de lajes mistas com fôrma metálica incorporada vem sendo desenvolvido desde 1996 através do trabalho de Melo [9]. Este trabalho foi idealizado a partir do estudo realizado por Schuster [10] e teve como objetivo avaliar o comportamento e a resistência do sistema de lajes mistas utilizando-se a fôrma metálica *Steel Deck MF-75*, produzida pela METFORM S.A. Uma série de 12 ensaios utilizando-se protótipos em escala real, simplesmente apoiados, foi realizada considerando-se todas as fases de carregamento após a cura do concreto. A análise das curvas carga x deslizamento relativo de extremidade, carga x flecha no meio do vão e carga x deformação no aço permitiu determinar o comportamento e a resistência do sistema misto, bem como o modo de ruptura predominante. Os parâmetros  $m$  e  $k$ , necessários para o cálculo da carga última do sistema misto, também foram determinados por Melo.

Os resultados deste estudo serviram de base para a definição das dimensões dos protótipos a serem ensaiados na presente pesquisa, bem como para o dimensionamento da armadura utilizada sobre o apoio interno. Isto ocorreu como consequência do desejo natural de se fazer um estudo comparativo entre as duas pesquisas, e que pode ser encontrado no capítulo 6 deste trabalho.

Ainda no Brasil, em 1999 foi editada a Norma Brasileira NBR 14323 [11], relativa ao dimensionamento de elementos de aço e mistos aço-concreto, em situação de incêndio. Esta norma apresenta, em seu anexo C, recomendações para o dimensionamento de lajes mistas, inclusive em temperatura ambiente, visto que a versão vigente da Norma Brasileira NBR 8800 [12] só contém recomendações para dimensionamento de vigas mistas.

Em abril de 2000 foi apresentada o 2<sup>o</sup> *draft* da Norma Européia Eurocode 4 [1], a qual contém especificações para projeto de lajes mistas com fôrma metálica incorporada. Esta nova versão permite, tal como na versão anterior, o uso de vãos isostáticos equivalentes para determinar a resistência ao cisalhamento longitudinal de lajes mistas sem ancoragens nas extremidades quando as mesmas forem projetadas como contínuas. Entretanto, o fator de equivalência de vãos foi modificado de 1,0 para 0,9 em se tratando de vãos externos.

A revisão acima apresentada demonstra o esforço empreendido para se compreender o comportamento do sistema de lajes mistas contínuos. Entretanto, os estudos desenvolvidos pelos diversos autores não resultaram em formulações práticas que considerassem o comportamento real do sistema misto com vãos estruturalmente contínuos. Pode-se, contudo, observar uma evolução na principal referência para projeto de lajes mistas, o Eurocode 4 [1], mostrando a importância dada ao tema em questão. A continuidade das pesquisas nesta área, com certeza, é fundamental no desenvolvimento de uma metodologia de cálculo que possa ser usada na prática diária dos projetistas de lajes mistas.

## Capítulo 3

### Caracterização e fabricação dos protótipos

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a especificação dos protótipos analisados, compreendendo suas características, detalhamento da armadura, materiais utilizados com os respectivos ensaios de caracterização, processo de execução e preparação para ensaio em laboratório. O cálculo da armadura está detalhado no apêndice A.

#### 3.2 Características gerais

A realização deste estudo experimental foi motivada pela necessidade de se utilizar, da maneira mais eficiente e racional possível, o sistema estrutural de lajes mistas com fôrma de aço incorporada. Todos os protótipos ensaiados foram construídos de modo a representar, da forma mais realista possível, as condições *in loco* do modelo estrutural proposto. Este modelo propõe a utilização de vãos extremos contínuos, onde o momento sobre o apoio interno é resistido por uma armadura posicionada sobre o mesmo e pelo concreto confinado nas nervuras da fôrma metálica. Assim sendo, foi proposta a construção de seis protótipos em escala real, representativos desta montagem particular.

Como mencionado no capítulo 1, um dos objetivos deste trabalho é estabelecer diferenças na capacidade portante considerando-se a continuidade da laje mista em relação às lajes simplesmente apoiadas. Deste modo, os protótipos foram construídos com características similares àqueles ensaiados por Melo [9], isto é, protótipos de

número 2 e 5, e que constam na tabela 3.1. Uma análise comparativa entre os dois modelos poderia, então, ser desenvolvida.

**Tabela 3.1 – Características dos protótipos ensaiados por Melo [ 9 ]**

<b>Protótipo</b>	<b>Espessura do Deck (mm)</b>	<b>Vão Total (mm)</b>	<b>Vão de cisalhamento (mm)</b>	<b>Largura da laje (mm)</b>	<b>Altura total (mm)</b>
2	0,80	1800	600	820	140
5	0,80	3600	900	820	180

Os ensaios foram divididos em duas séries, tendo cada uma três protótipos. Os protótipos possuíam *Steel Deck* com espessura única (0,80 mm), comprimento igual a 3600 mm e foram posicionados sobre três apoios igualmente espaçados de modo a se obter dois vão idênticos. Em todos os protótipos, tanto a fôrma quanto a tela soldada foram dispostas continuamente sobre o apoio interno.

Para cada série foi utilizada uma armadura negativa com bitolas diferentes e o seu cálculo seguiu as prescrições da NBR6118 – Projeto e Execução de Estruturas em Concreto Armado [13], conforme dispõe a norma NBR 14323 [11]. O cálculo da armadura negativa é apresentado em detalhes no apêndice A.

As séries foram ensaiadas sob condições de carregamento diferentes e são descritas a seguir:

- **Série 2A:** três protótipos submetidos a quatro linhas de carga:  
Vão livre ( $\ell$ ) = 1800 mm; Vão de cisalhamento ( $\ell^?$ ) = 600 mm; Altura total (H) = 140 mm.
- **Série 2B:** três protótipos submetidos a duas linhas de carga:  
Vão livre ( $\ell$ ) = 1800 mm; Vão de cisalhamento ( $\ell^?$ ) = 900 mm; Altura total (H) = 180 mm.

Para as séries de protótipos acima, o vão de cisalhamento corresponde a distância entre a linha de carga extrema e o apoio de extremidade.

### 3.2.1 Série 2A

Os protótipos desta série eram similares ao protótipo 2 testado por Melo [9], exceto que possuíam dois vãos contínuos com as mesmas dimensões do vão livre daquele protótipo, ou seja, 1800 mm. Deste modo, utilizando-se o mesmo vão de cisalhamento, poderíamos comparar a resistência última do sistema de lajes mistas contínuas em relação ao sistema simplesmente apoiado. A figura 3.1 mostra as principais dimensões dos protótipos da série, que foram identificados como P1S2A, P2S2A e P3S2A (Protótipo 1, Série 2A; Protótipo 2, Série 2A e Protótipo 3, Série 2A respectivamente).

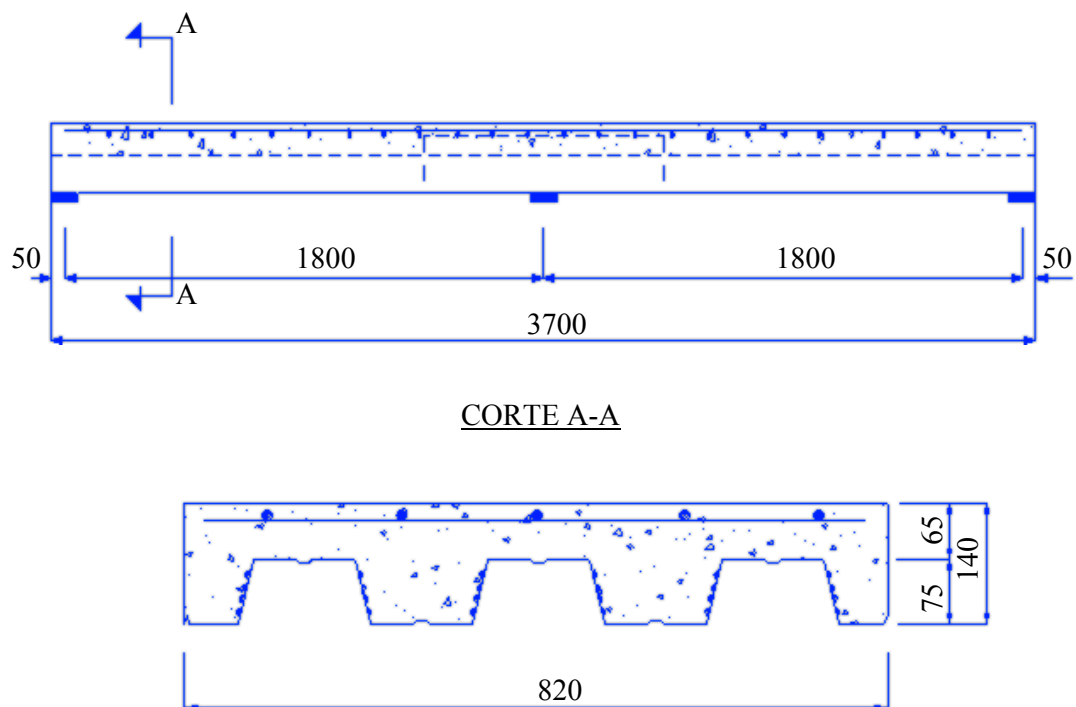


Figura 3.1 – Detalhe dos protótipos da Série 2A (medidas em mm)

### 3.2.2 Série 2B

Nesta série os protótipos eram similares ao protótipo 5 testado por Melo [9] exceto pela presença do apoio intermediário. A figura 3.2 mostra as principais dimensões dos protótipos da série, que foram identificados como **P1S2B**, **P2S2B** e **P3S2B**, seguindo a mesma nomenclatura da série anterior.

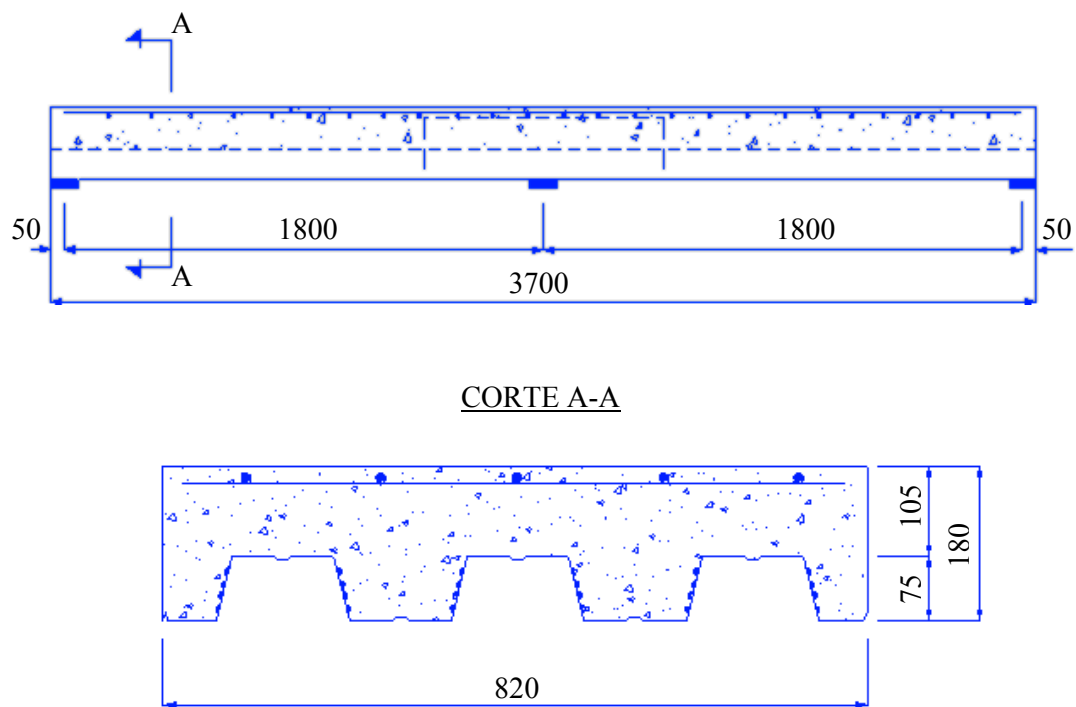


Figura 3.2 – Detalhe dos protótipos da Série 2B (medidas em mm)

### 3.2.3 Resumo das características dos protótipos

Na tabela 3.2 encontra-se um resumo das principais características dos protótipos ensaiados. As dimensões apresentadas para o comprimento total da laje mista (L), a largura da laje mista (B) e sua altura total (H) representam valores médios obtidos das medidas realizadas antes do ensaio.



**Tabela 3.2 – Resumo das principais características dos protótipos**

<b>Protótipo</b>	<b>Série</b>	<b>L (mm)</b>	$\ell$ <sup>(1)</sup> <b>(mm)</b>	<b>B (mm)</b>	<b>H (mm)</b>
P1S2A	2A	3700	1800	830	140
P2S2A	2A	3702	1800	832	139
P3S2A	2A	3700	1800	830	140
P1S2B	2B	3697	1800	820	177
P2S2B	2B	3700	1800	824	178
P3S2B	2B	3694	1800	827	180

(1) comprimento de cada vão

### **3.3 Detalhamento da armadura**

O detalhamento da armadura sobre o apoio interno empregada em cada uma das séries ensaiadas se encontra nas seções a seguir. O procedimento de cálculo para a obtenção da área das barras, bem como dos respectivos comprimentos, está apresentado no apêndice A. No cálculo das armaduras foi utilizado, como estimativa, os esforços cortantes obtidos para os protótipos 2 e 5 ensaiados por Melo [9].

### 3.3.1 Série 2A

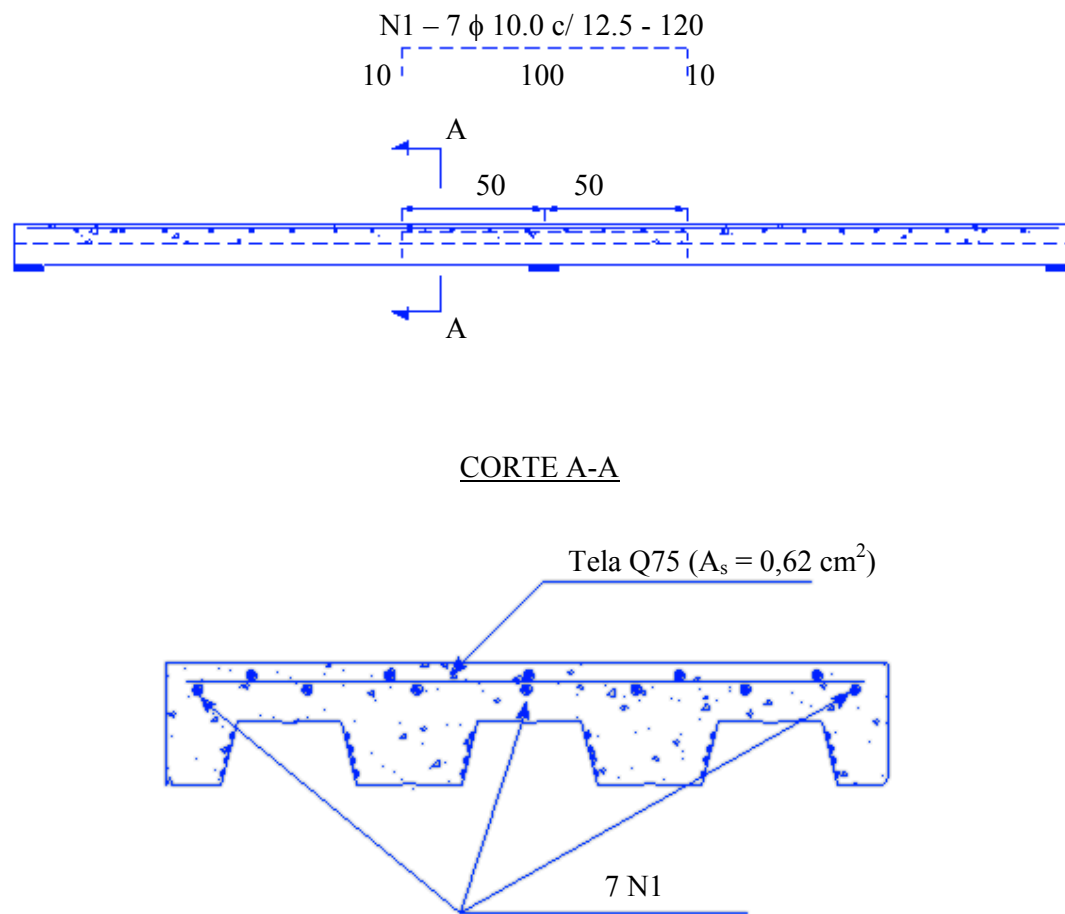


Figura 3.3 – Detalhamento da armadura dos protótipos da Série 2A (medidas em cm)

### 3.3.2 Série 2B

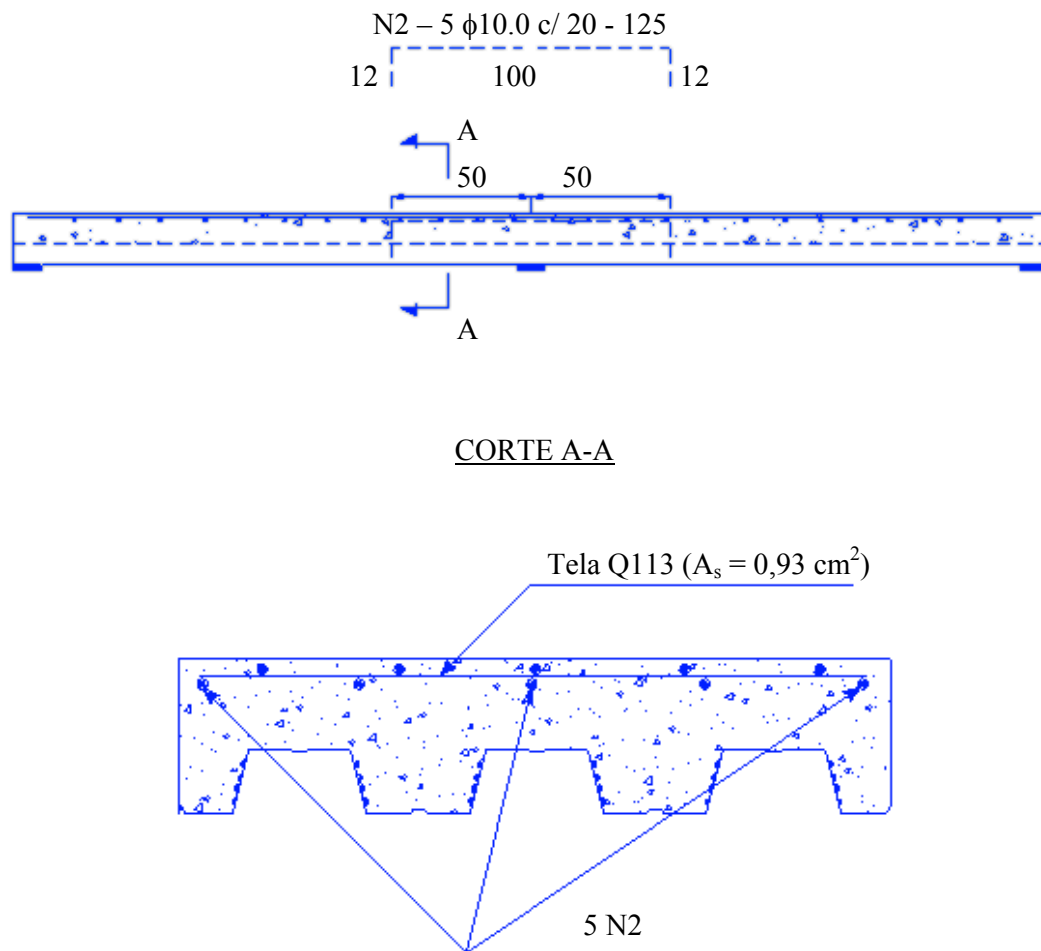


Figura 3.4 – Detalhamento da armadura dos protótipos da Série 2B (medidas em cm)

## 3.4 Materiais utilizados

### 3.4.1 Fôrma de aço

O perfil de aço utilizado como fôrma incorporada na laje mista foi o *Steel Deck MF-75*, fornecido pela METFORM S.A. O *Steel Deck* é um perfil formado a frio, fabricado com o aço especial galvanizado ZAR-280 e comercialmente encontrado nas espessuras 0,80, 0,95 e 1,25 mm. É um tipo de fôrma trapezoidal com mossas, cuja geometria fornece o travamento mecânico aço-concreto, fundamental para o desenvolvimento da ação composta entre o perfil de aço e o concreto da laje. As dimensões transversais de uma seção do *Steel Deck* encontram-se na figura 3.5. Para facilitar o transporte, o comprimento total da chapa não deve ultrapassar 12 metros. Acima deste valor o uso de veículos especiais torna-se necessário, podendo representar um custo extra ao projeto.

Para a realização deste estudo foram necessárias 6 chapas de *Steel Deck* com comprimentos iguais a 3700 mm. A espessura foi mantida constante e igual a 0,8 mm. Na tabela 3.3 encontram-se as dimensões e propriedades geométricas do *Steel Deck MF-75*. Os valores das propriedades geométricas foram obtidos considerando-se no cálculo das larguras efetivas uma tensão normal de compressão igual a 60% da tensão nominal de escoamento do aço ( $f_d = 0,6 f_y$ ).

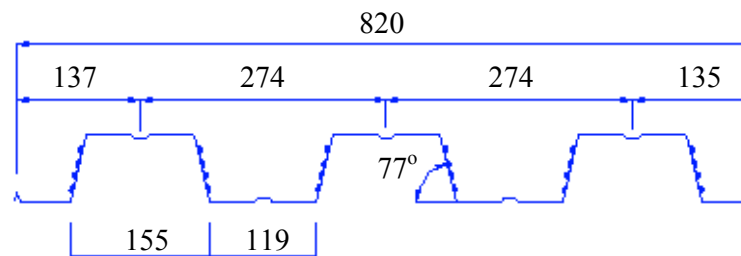


Figura 3.5 – Dimensões do *Steel Deck MF-75* (medidas em mm)

**Tabela 3.3 – Dimensões e propriedades geométricas por metro de largura do *Steel Deck MF-75***

<b>Espessura nominal da chapa (mm)</b>	<b><math>t_e</math> (mm)</b>	<b><math>d_d</math> (mm)</b>	<b><math>A_p</math> (mm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>Y_{cg}</math> (mm)</b>	<b><math>I_{sf}</math> (mm<sup>4</sup>)</b>
0,80	0,76	74,98	1.082	37,49	1.017.138

Os termos da tabela correspondem a:

$t_e$  é a espessura do *Steel Deck* sem galvanização;

$d_d$  é a altura do *Steel Deck*;

$A_p$  é área do *Steel Deck*;

$Y_{cg}$  é a distância do centro de gravidade à extremidade inferior do *Steel Deck*; e

$I_{sf}$  é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo horizontal baseado na seção bruta.

As propriedades mecânicas do aço utilizado na fabricação do *Steel Deck MF-75* foram obtidas a partir de ensaios realizados no laboratório de materiais de construção da EEUFMG. Dois corpos de prova foram ensaiados utilizando-se uma máquina universal de ensaio com controle computadorizado de deformação. Os gráficos tensão x deformação para os dois corpos de prova estão apresentados no apêndice B. A tabela 3.4 apresenta as principais propriedades mecânicas do aço utilizado com base na média dos valores obtidos no referido ensaio.

**Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas da chapa de aço utilizada na fabricação do *Steel Deck MF-75* (média de valores)**

<b>Propriedades mecânicas</b>	
Tensão de escoamento (MPa)	342
Limite de resistência (MPa)	438
Módulo de elasticidade (MPa)	194187
Porcentagem de alongamento na ruptura (%)	32,6

### 3.4.2 Barras de aço

As barras utilizadas neste trabalho eram em aço tipo CA-50, com bitola única de 10 mm, fabricadas pela Siderúrgica Gerdau e adquiridas junto à distribuidora Comercial Gerdau. A especificação do cálculo é apresentada no apêndice A.

### 3.4.3 Tela soldada

A armadura em tela soldada segue padronização do IBTS (Instituto Brasileiro de Tela Soldada) e foi utilizada segundo orientação do fabricante do *Steel Deck MF-75* [14]. A tabela 3.5 fornece as especificações das telas utilizadas.

**Tabela 3.5 – Características das telas soldadas utilizadas**

Série	Denominação da tela soldada	Composição (mm)	Área Total (m <sup>2</sup> )	Peso Final (kg)
2A	Q-75	φ3,8 x φ3,8 – 150 x 150	~ 10	12,1
2B	Q-113	φ3,8 x φ3,8 – 100 x 100	~ 10	18,0

### 3.4.4 Concreto

O concreto utilizado foi fornecido pela concreteira REDIMIX, tendo sido especificado uma resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) maior ou igual a 20 MPa. Utilizou-se em seu preparo brita 1 de gnaisse e retardador de pega para 3 horas. A determinação do abatimento do tronco de cone, feito de acordo com a NBR 7223 [15], atingiu o valor de 10 cm, o que indicou boa trabalhabilidade do concreto. A caracterização da resistência à compressão do concreto foi feita seguindo-se as prescrições da NBR 5739 [16]. Inicialmente foram utilizados 9 corpos-de-prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, que foram divididos em 3 grupos de 3 cilindros e rompidos aos 3, 7 e 17 dias de idade, respectivamente. Os ensaios foram realizados no laboratório de materiais de construção da Escola de

Engenharia da UFMG (EEUFMG), tendo sido utilizada uma prensa hidráulica com capacidade para 1000 kN. A determinação inicial da resistência teve por objetivo a remoção das lajes do local de concretagem, desde que se atingisse um valor razoável para a resistência. Os resultados dos ensaios preliminares são fornecidos na tabela 3.6 e mostram que, já aos 17 dias de idade, a resistência média à compressão ( $f_c$ ) dos cilindros era superior à resistência característica especificada.

**Tabela 3.6 – Resistência à compressão inicial do concreto utilizado nos protótipos**

<b>Corpo-de-prova</b>	<b>Idade j (dias)</b>	<b>Carga de ruptura (KN)</b>	<b><math>f_{ci}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_c</math> (MPa)</b>
1	3	10,40	13,22	13,5
2		10,70	13,61	
3		10,65	13,54	
4	7	14,70	18,69	19,5
5		13,80	17,55	
6		17,45	22,19	
7	17	17,70	22,51	23,6
8		19,40	24,67	
9		18,50	23,52	

A resistência à compressão ( $f_c$ ) e o módulo de elasticidade estático secante ( $E_c$ ) foram obtidos nas datas de ensaio dos protótipos. Para isto foram utilizados 16 corpos de prova cilíndricos (15 x 30 cm) sendo 8 cilindros para cada série de ensaios. Para cada série foram rompidos 4 cilindros a fim de se obter a resistência a compressão do concreto. Os outros 4 cilindros foram usados para determinação do módulo de elasticidade. O valor do módulo de elasticidade estático secante foi calculado utilizando-se o plano de carga III da NBR 8522 [17] tendo como tensão superior o valor correspondente a 40% da resistência última do concreto. A tabela 3.7 fornece as propriedades mecânicas do concreto na data de ensaio de cada protótipo.

**Tabela 3.7 – Média de valores das propriedades mecânicas do concreto nas datas de ensaio dos protótipos**

Protótipo	Série	Idade do concreto (dias)	$f_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)
P1S2A	2A	389	25,1	25463
P2S2A	2A	406	25,5	25956
P3S2A	2A	412	25,5	25956
P1S2B	2B	346	23,1	25000
P2S2B	2B	360	26,7	23956
P3S2B	2B	378	26,7	23956

Pode-se verificar, através da tabela 3.7, que a resistência à compressão do concreto foi sempre superior ao  $f_{ck}$  especificado.

### 3.5 Montagem e concretagem dos protótipos

Uma das vantagens do uso de lajes mistas com fôrma incorporada é, sem dúvida, a facilidade de montagem e de execução do sistema e que foi comprovada nesta etapa do presente estudo. Todo o processo de montagem seguiu o mesmo procedimento do que é realizado em campo. Por razões de logística, a montagem e concretagem dos protótipos foram realizadas nas instalações da CODEME ENGENHARIA em local seguro e adequado.

A montagem dos protótipos iniciou com a preparação das barras da armadura negativa e sua instrumentação realizada em visitas programadas à CODEME. A instrumentação está detalhada no capítulo 4 deste trabalho.

A segunda etapa consistiu na fixação de chapas de aço # 19x100, conforme mostra a figura 3.6, através de pontos de solda, nas duas extremidades e no meio da fôrma metálica, de modo a simular a realidade construtiva de se fixar a fôrma à mesa superior da viga de aço suporte. Para conter o concreto recém lançado foram utilizados



arremates laterais e de extremidades (Fig.3.6), confeccionados em aço ASTM A570 grau C, espessura de 2 mm e altura variável de acordo com o protótipo (140 ou 180 mm) e comprimento igual a 3700 mm e 820 mm. Após a cura do concreto, os arremates foram removidos.

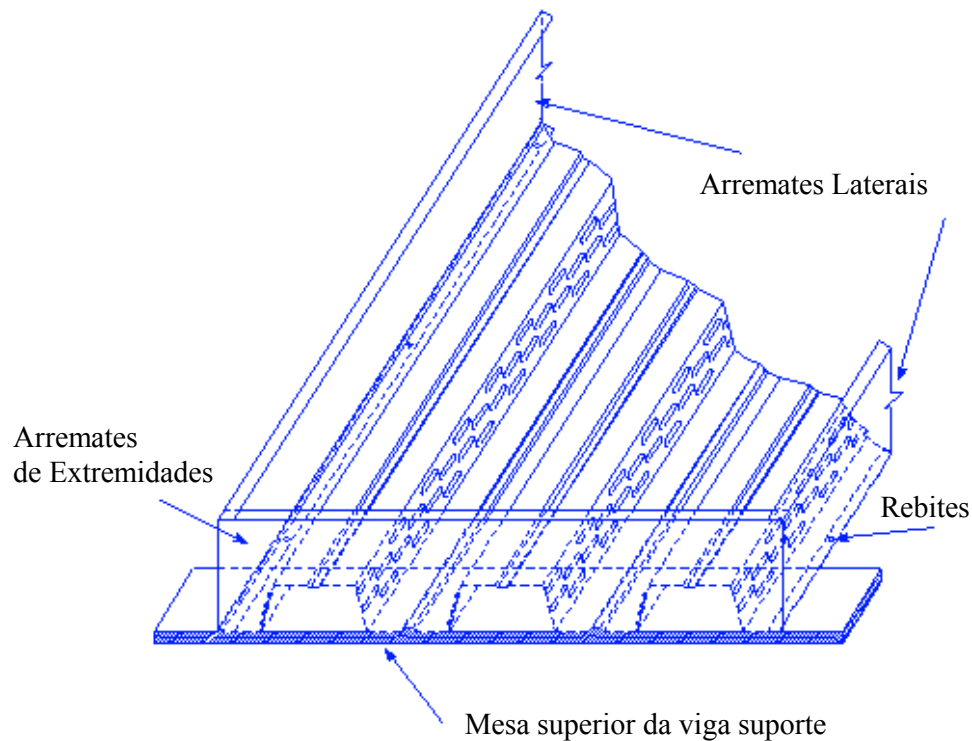


Figura 3.6 – Detalhe do esquema de montagem dos protótipos

A concretagem dos protótipos ocorreu uma única etapa e sem maiores problemas uma vez que o procedimento utilizado foi o mesmo realizado por Melo [9]. Os detritos presentes na superfície da fôrma foram removidos antes do lançamento do concreto tal como é feito em campo. Pelo mesmo motivo, a camada de óleo originada do processo de fabricação do *Steel Deck* não foi removida. Deve-se lembrar, entretanto, que a ação composta entre concreto e a fôrma é alcançada pela aderência mecânica dado pelas moissas e não por aderência química. O adensamento do concreto foi feito utilizando-se um vibrador do tipo agulha

Os protótipos foram moldados com o vão da fôrma totalmente apoiado, de modo que a altura da laje permanecesse constante. Na prática as fôrmas são apoiadas somente sobre as vigas, sendo raro o uso de escoramento. Isto permite que a laje tenha uma altura não-uniforme ao longo do vão. Contudo, o fato da altura ser uniforme nos ensaios conduz a valores de resistência ligeiramente conservadores (a favor da segurança), principalmente no caso de cisalhamento longitudinal.

Durante a concretagem procurou-se manter as barras da armadura na posição correta, isto é, centrada sobre o apoio interno. Entretanto, as barras podem ter se deslocando ligeiramente durante o processo. No posicionamento da tela soldada procurou-se evitar que a mesma se movimentasse durante o processo de lançamento do concreto. A função da tela é evitar o aparecimento de fissuras decorrentes do processo de retração e variação térmica do concreto.

O processo de cura do concreto teve início imediatamente após a moldagem dos protótipos com a colocação de sacos de linhagem umedecidos sobre as lajes. Durante três dias os protótipos receberam jatos de água a cada três horas quando foram desformados e cobertos novamente com sacos de linhagem até completarem 7 dias. Conforme indicado na tabela 3.5, com a idade de três dias o concreto havia alcançado cerca de 68 % da resistência mínima prevista e, portanto, os protótipos poderiam ser removidos para um local de armazenamento definitivo sem que os mesmos sofressem qualquer dano estrutural. As lajes foram empilhadas em dois grupos de três unidades cada, sendo cobertas com lona plástica e curadas ao ar livre até a data de transporte para o Laboratório de Análise Experimental da Escola de Engenharia da UFMG (LAEES). Cada unidade possuía uma etiqueta de identificação com suas principais características.

## **Capítulo 4**

### **Procedimento dos ensaios e instrumentação**

#### **4.1 Introdução**

Este capítulo descreve o procedimento básico adotado nos ensaios realizados, bem como o detalhamento do processo de instrumentação e dos aparatos utilizados na determinação do comportamento e da resistência das lajes mistas.

#### **4.2 Considerações iniciais**

As cargas transmitidas aos protótipos do sistema de laje mista foram aplicadas por um atuador hidráulico preso a um pórtico de reação. Utilizou-se uma bomba manual para o acionamento do pistão do atuador, que possui linhas de fluxo e retorno possibilitando o movimento deste pistão em dois sentidos.

Um sistema de vigas metálicas, cuja configuração variava conforme a série ensaiada, foi empregado para transmitir as cargas aos protótipos. As figuras 4.1a, 4.1b, 4.2a e 4.2b mostram as configurações utilizadas para as séries 2A e 2B, respectivamente. Os protótipos da série 2A foram submetidos a um carregamento que consistia de quatro linhas de carga, sendo duas em cada vão, equidistantes dos apoios. O carregamento aplicado aos protótipos da série 2B, por sua vez, consistia de duas linhas de carga, sendo uma em cada vão, equidistantes dos apoios. Sob cada linha de carga foi utilizada uma tira de borracha (Neoprene) para distribuir o carregamento o mais uniformemente possível.



## PLANTA

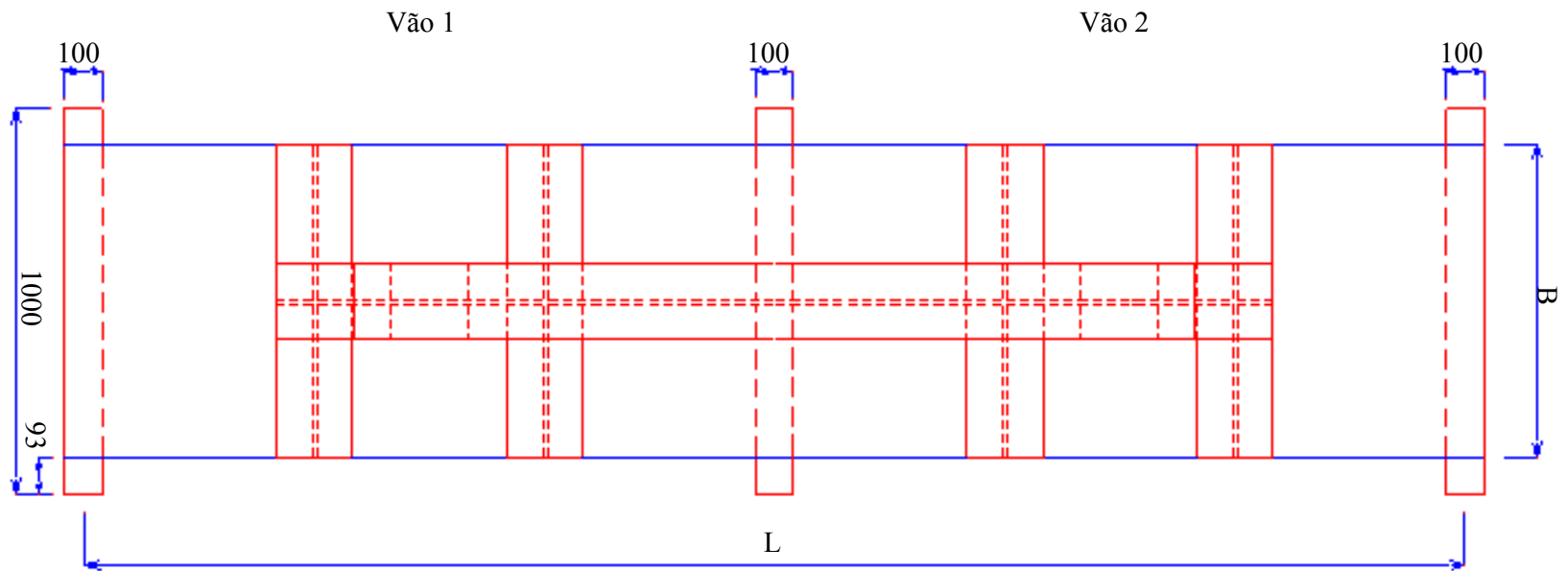


Figura 4.1b – Aparato de carga utilizado nos ensaios da série 2A (medidas em mm) – Vista em Planta

- R – Rolete  $\phi$  38 mm
- P – Pino  $\phi$  38 mm
- AD – Anel dinamométrico
- DRE – Relógio comparador para leitura do deslizamento relativo de extremidade.
- DV – Relógio comparador para leitura do deslocamento vertical no meio do vão.
- BC – Bloco de concreto (50 x 50 x 100 cm)
- Vão 1 – Vão entre os apoios móvel e intermediário.
- Vão 2 – Vão entre os apoios fixo e intermediário.

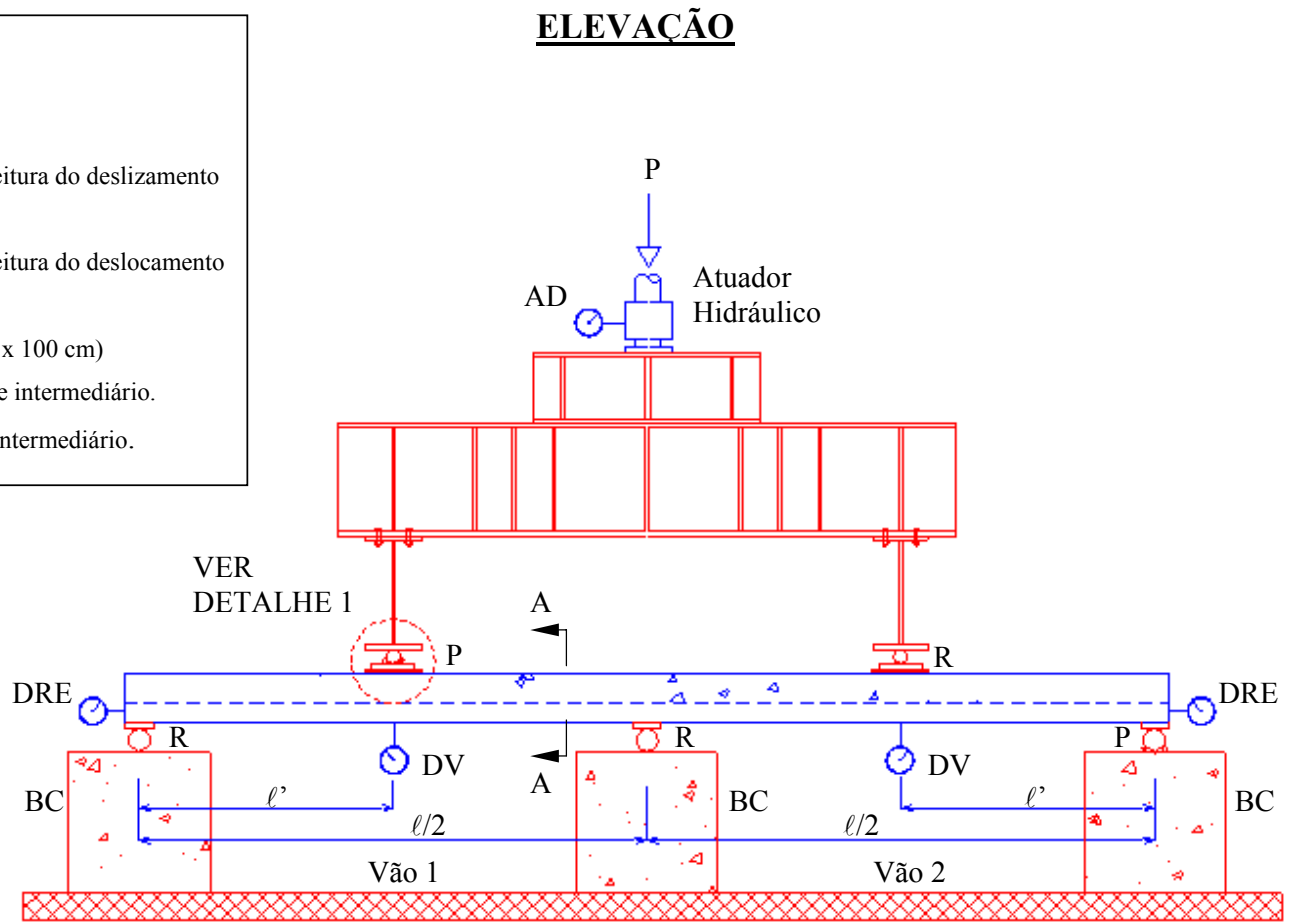
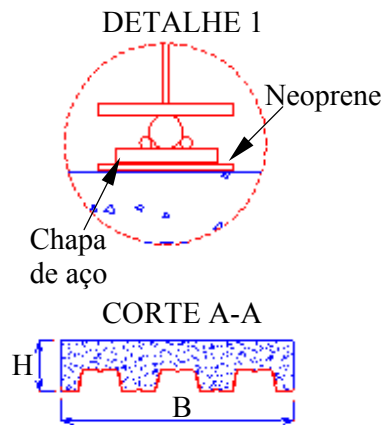


Figura 4.2a – Esquema de ensaio utilizado nos protótipos da série 2B – Vista Lateral

## PLANTA

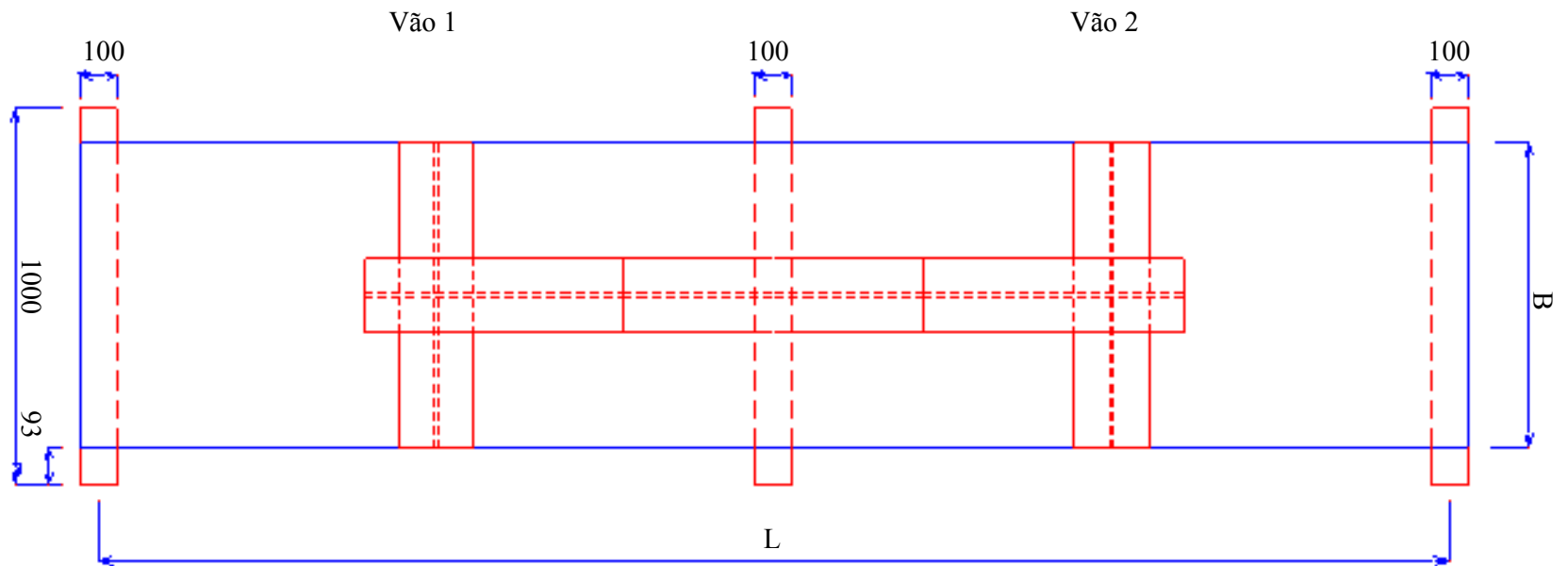


Figura 4.2b – Aparato de carga utilizado nos ensaios da série 2B (medidas em mm) – Vista em Planta

Todos os protótipos, independentemente da série a que pertenciam, se encontravam apoiados sobre três blocos de concreto de mesmas dimensões e igualmente espaçados. Assumiu-se que qualquer restrição longitudinal indesejável foi eliminada pelo sistema de apoios móvel e fixo atuando em conjunto com o sistema esférico da unidade de aplicação de carga.

### **4.3 Parâmetros analisados**

Durante os ensaios foram medidas as cargas aplicadas pelo atuador hidráulico, o deslizamento relativo nas extremidades da laje, a flecha no meio do vão e as deformações das barras embutidas no concreto e da fôrma de aço. Um monitoramento do processo de fissuração da laje também foi realizado.

As deformações nos elementos de aço possuem, neste trabalho, uma importância crucial na determinação experimental da capacidade de carga dos protótipos. Uma vez que o Laboratório de Análise Experimental (LAEEES) não possuía células de carga em número suficiente para medir diretamente as reações em cada apoio, o único modo de determinar experimentalmente as parcelas de carga absorvidas pelos apoios seria através do equilíbrio dos esforços interno e externo atuantes nas lajes. Os esforços internos poderiam ser obtidos conhecendo-se a distribuição das deformações ao longo da seção transversal da laje, nos pontos de momentos máximos nos vãos e sobre o apoio interno. Portanto, os processos de instrumentação e o monitoramento da fôrma metálica e das barras da armadura receberam uma atenção especial.

#### **4.3.1 Carga aplicada**

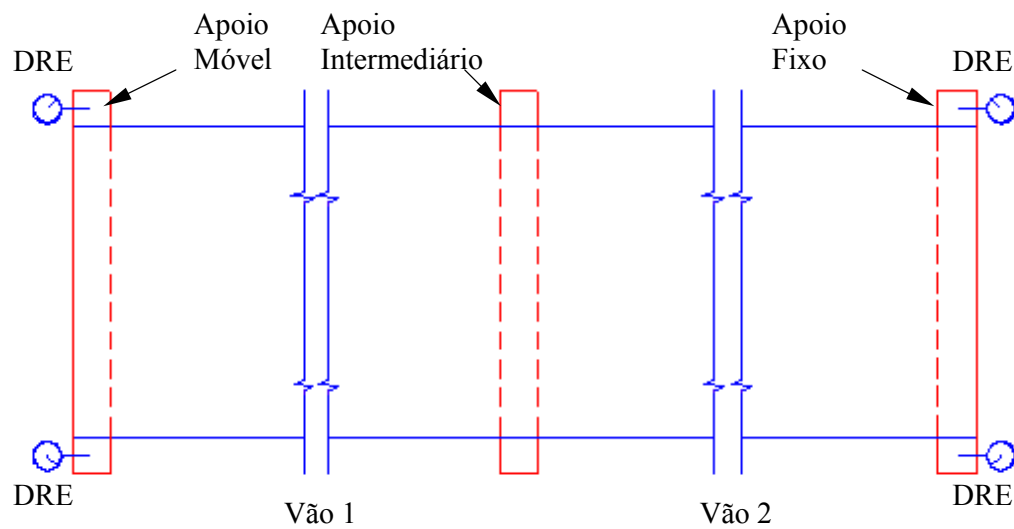
Os valores correspondentes às cargas foram medidos utilizando-se um anel dinamométrico com capacidade para 500 kN acoplado ao atuador hidráulico. O anel foi calibrado anteriormente pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) e o controle da carga aplicada foi feito por meio de um relógio comparador fixado ao mesmo. Cada divisão do relógio comparador correspondia a 0,8895 kN. O atuador



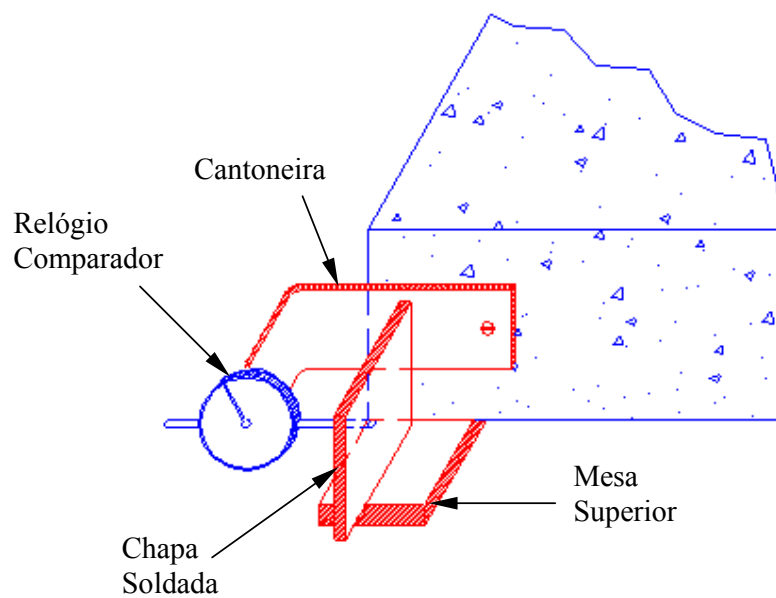
hidráulico foi acionado manualmente por meio de uma bomba operada por um técnico do laboratório.

### **4.3.2 Deslizamento relativo**

O deslizamento relativo entre o perfil de aço e o concreto da laje, característico destes sistemas, foi monitorado ao longo de todo o carregamento. Em todos os seis protótipos testados, este deslizamento foi medido em quatro pontos: extremidades direita e esquerda dos apoios móvel e fixo conforme mostra a figura 4.3.a. A leitura foi feita através de relógios comparadores da marca Mitutoyo, precisão de milésimos de milímetro, fixados a uma cantoneira de aço parafusada no concreto (parte lateral) da laje mista (figura 4.3.b). O cursor do relógio encontrava-se em contato com uma fina chapa de aço soldada perpendicularmente à chapa que simulava a mesa superior da viga suporte. Assim, qualquer movimento relativo entre o concreto da laje e o perfil de aço pôde ser medido com precisão. O deslizamento relativo final em cada extremidade dos apoios móvel e fixo foi considerado como a média dos valores obtidos pelos relógios instalados nas respectivas extremidades.



(a)



(b)

Figura 4.3 – Detalhe da leitura do deslizamento relativo: (a) Posicionamento dos relógios comparadores (vista em planta) (b) Vista em perspectiva da fixação dos relógios à laje.

### **4.3.3 Flecha no meio do vão**

A flecha no meio de cada vão foi medida a partir da colocação de relógios comparadores Mitutoyo com precisão de centésimos de milímetros. Os relógios utilizados nos protótipos das séries 2A e 2B foram posicionados em cantoneiras fixadas às laterais da laje, conforme mostram as figuras 4.4 e 4.5. As cantoneiras foram acopladas firmemente à laje por meio de parafusos, de modo a acompanharem o movimento vertical provocado pelo carregamento. No caso dos protótipos da série 2B, apesar das fissuras principais se formarem nesta região, não houve qualquer interferência destas sobre as leituras dos relógios durante os ensaios. Os relógios eram sustentados por braços articulados com bases imantadas e que permitiam um fácil ajuste no posicionamento dos mesmos. O valor da flecha final no meio de cada vão foi considerado como a média dos valores obtidos nos dois pontos de leitura.

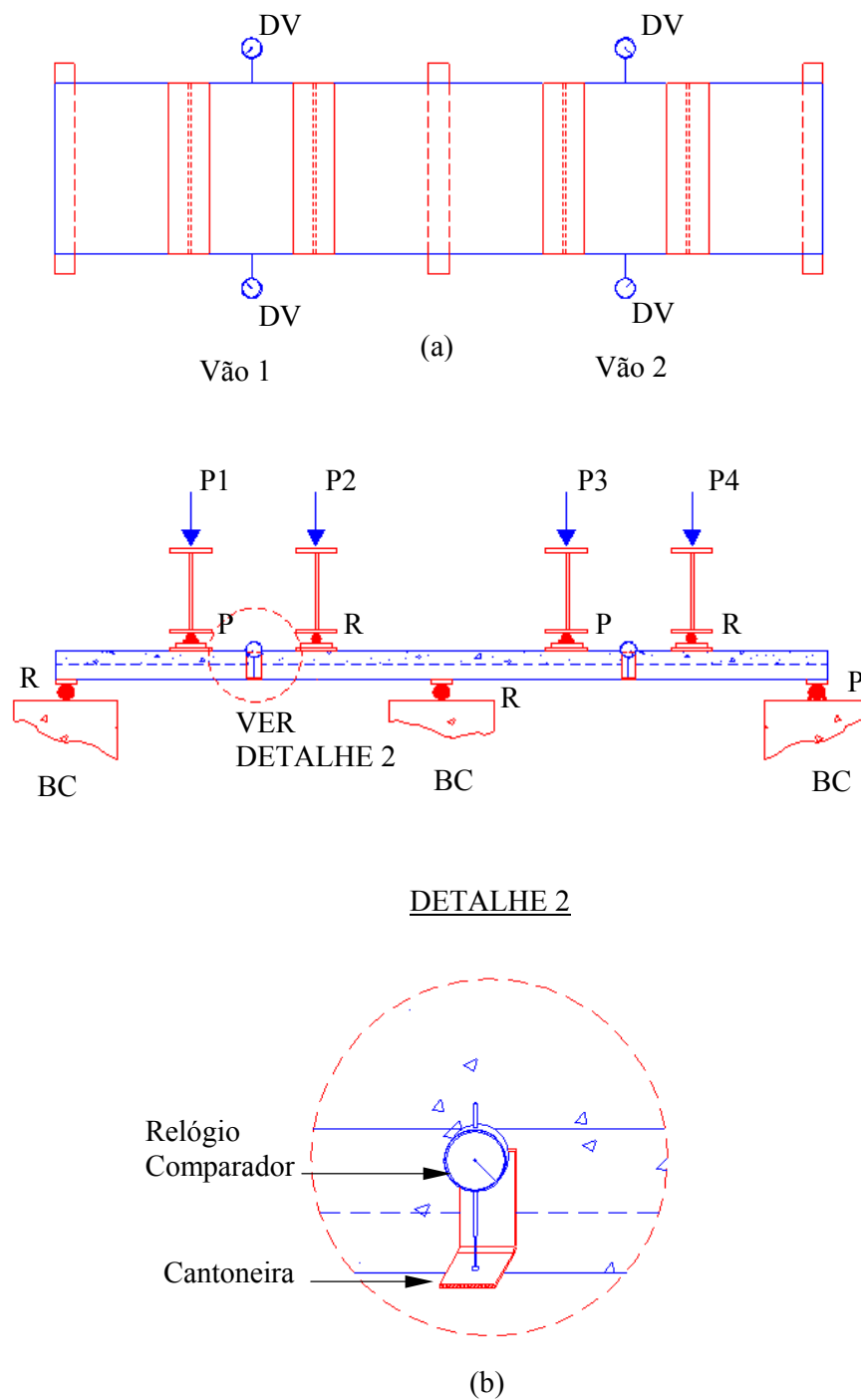


Figura 4.4 – Detalhe da leitura da flecha no meio do vão dos protótipos da série 2A: (a) Posicionamento dos relógios comparadores (vista em planta); (b) Detalhe da fixação do relógio comparador à laje mista.

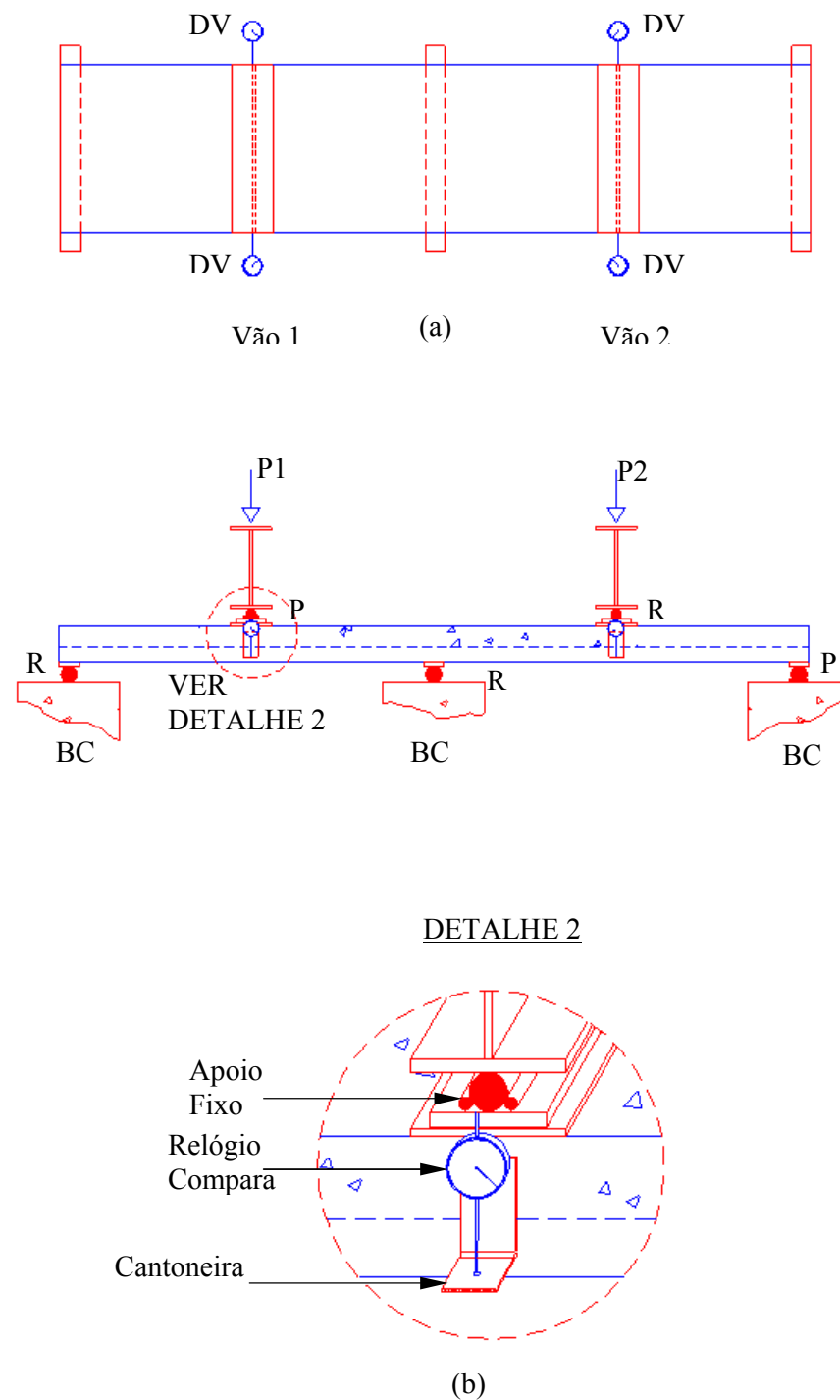


Figura 4.5 – Detalhe da leitura da flecha no meio do vão dos protótipos da série 2B: (a) Posicionamento dos relógios comparadores (vista em planta); (b) Detalhe da fixação do relógio comparador à laje mista.

### 4.3.4 Deformações das barras de aço da armadura

As deformações das barras de aço da armadura sobre o apoio interno foram medidas por meio de extensômetros elétricos, da marca KIOWA, tipo KFG-5-120-C1-11, previamente colados às barras. O processo de fixação dos extensômetros é delicado, uma vez que estes são elementos de alta sensibilidade e que podem danificar-se facilmente. Inicialmente, lixou-se a barra e colou-se o extensômetro com adesivo de secagem rápida (*super-bonder*); a partir daí, revestiu-se o local com camadas sucessivas de cera, silicone e adesivo tipo epóxi; após algumas horas o epóxi secava e se transformava em uma barreira resistente a choques e penetração de umidade. Os extensômetros foram posicionados nas barras conforme mostra a figura 4.6. Para cada protótipo apenas uma barra da armadura foi instrumentada.

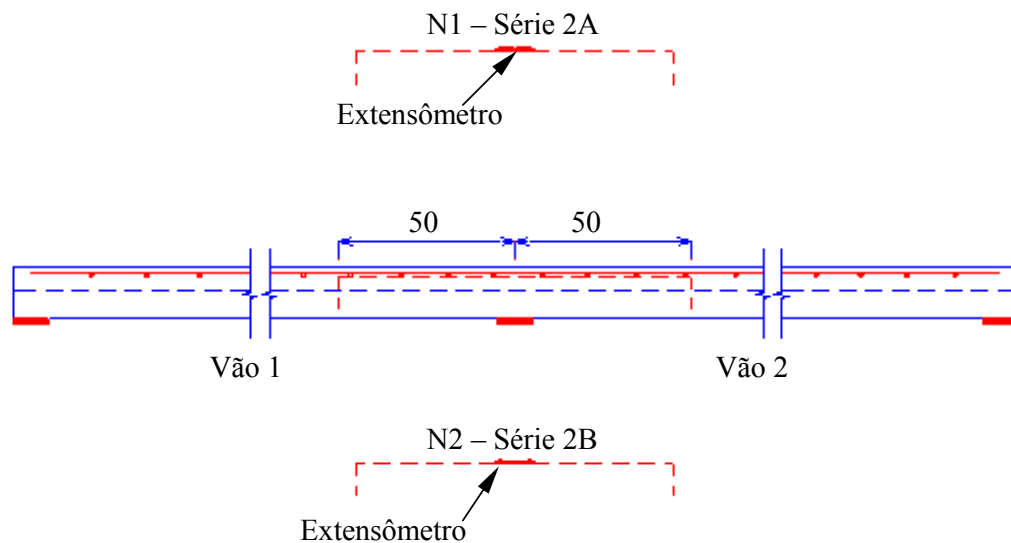


Figura 4.6 – Detalhe da localização dos extensômetros nas barras de aço em cada série de protótipos (medidas em cm)

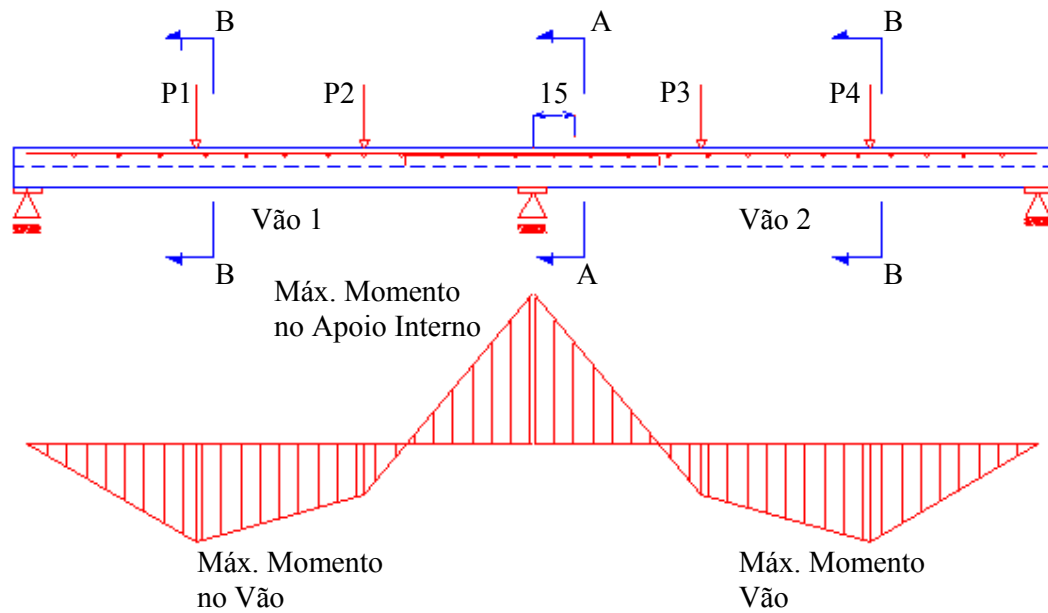
A leitura das deformações nas barras de aço foi feita através de um Sistema de Aquisição de Dados (SAD) conectado a um microcomputador. O SAD utilizado em

todos os ensaios foi o ADS – 2000 de fabricação nacional, produzido pela Lynx, com 16 canais de aquisição. O software utilizado na configuração e monitoramento dos canais de leitura foi o *AqDados 4.0*.

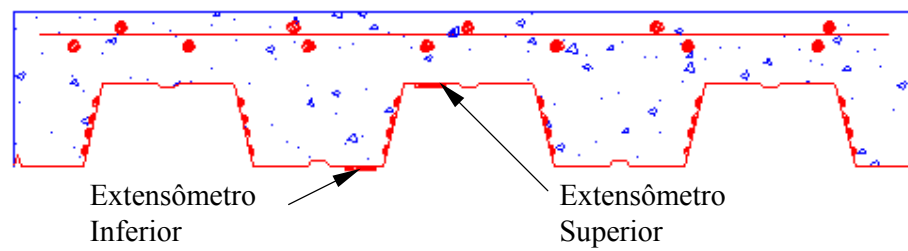
#### **4.3.5 Deformações da fôrma metálica**

Utilizou-se, para a instrumentação da fôrma metálica, o mesmo tipo de extensômetro empregado nas barras de aço da armadura. Apenas o processo de fixação foi modificado. No caso específico da fôrma, não houve a necessidade da proteção com camadas de cera e silicone, uma vez que o extensômetro não foi submetido a situações em que existisse grande possibilidade de dano, como por exemplo, o lançamento do concreto durante a etapa de fabricação dos protótipos. A colagem dos extensômetros foi feita no LAEES e representou a última etapa na preparação do protótipo antes da realização do ensaio. A camada de zinco existente foi totalmente removida durante preparação da superfície da fôrma através de lixamento e limpeza da área destinada ao extensômetro, eliminando-se possíveis interferências deste material sobre a leitura das deformações do aço da fôrma.

Os extensômetros foram colados em duas regiões de maior interesse: região de máximo momento em cada vão e região de máximo momento sobre o apoio interno. A figura 4.7 mostra onde os extensômetros foram posicionados na fôrma metálica para os protótipos da série 2A. Pode-se observar que, no caso dos protótipos desta série, o momento máximo em cada vão deveria ocorrer sob a linha de carga próxima ao apoio extremo. Para os protótipos da série 2B, o máximo momento deveria ocorrer no meio de cada vão onde se encontra a linha de carregamento conforme mostra a figura 4.8. Portanto, os extensômetros foram posicionados, em cada vão, sob as linhas de carga e nas proximidades do apoio intermediário.



CORTE A-A



CORTE B-B

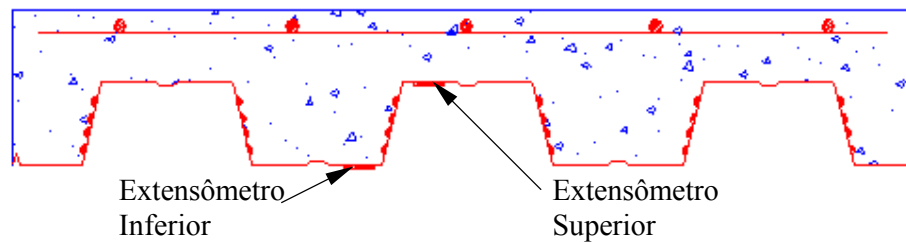
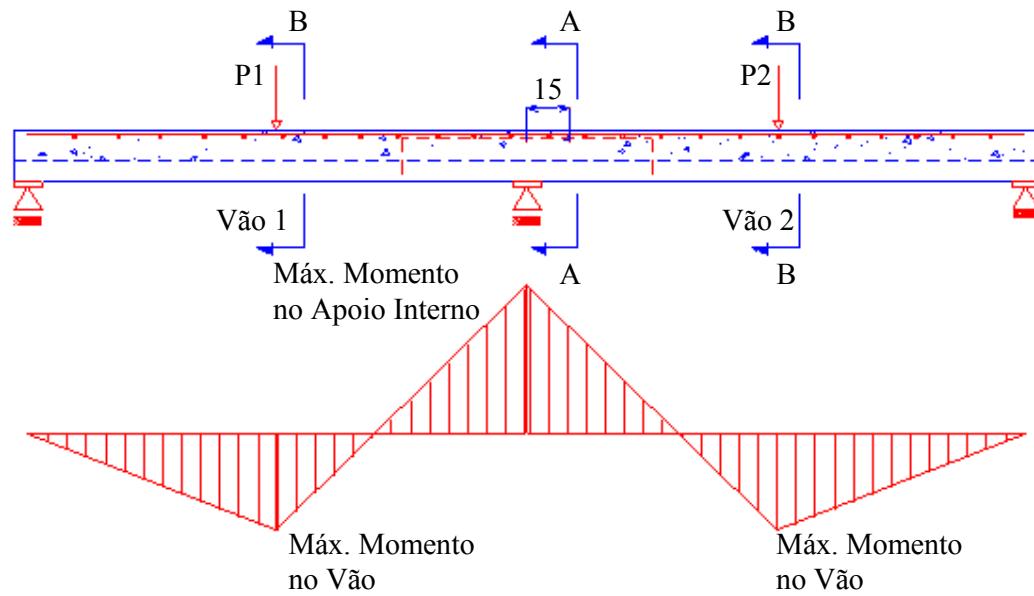
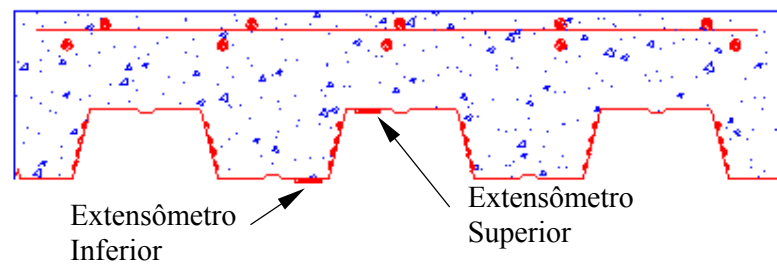


Figura 4.7 – Detalhe da localização dos extensômetros na fôrma de aço dos protótipos da série 2A (medidas em cm).





CORTE A-A



CORTE B-B

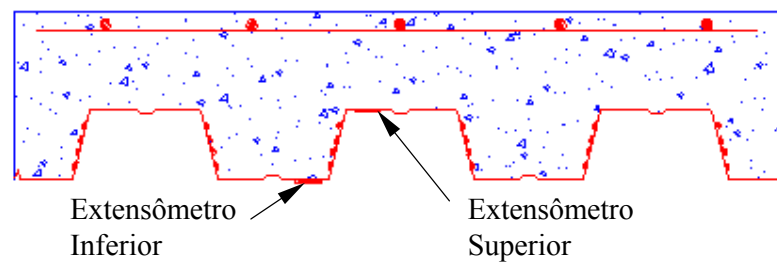


Figura 4.8 – Detalhe da localização dos extensômetros na fôrma de aço dos protótipos da série 2B.

Na região do apoio interno, em função da presença da chapa de aço, a qual representava a mesa superior da viga de apoio, os extensômetros não puderam ser colados na seção do apoio intermediário. Assim sendo, estes extensômetros foram posicionados a 15 cm da seção do apoio intermediário no vão formado por este apoio e pelo apoio fixo da extremidade do protótipo.

A aquisição dos dados relativos às deformações foi feita através do mesmo SAD utilizado para a leitura das deformações das barras de aço da armadura. Para fins de identificação das leituras de deformações, foi adotada a seguinte nomenclatura para os extensômetros conforme a sua localização no protótipo:

**SDInf Fixo** > ***Steel Deck***, onda Inferior do vão compreendido entre os apoios Fixo e intermediário.

**SDSup Fixo** > ***Steel Deck***, onda Superior do vão compreendido entre os apoios Fixo e intermediário.

**SDInf Intermediário** > ***Steel Deck***, onda Inferior localizado a 15 cm da seção do apoio Intermediário.

**SDSup Intermediário** > ***Steel Deck***, onda Superior localizado a 15 cm da seção do apoio Intermediário.

**SDInf Móvel** > ***Steel Deck***, onda Inferior do vão compreendido entre os apoios Móvel e intermediário.

**SDSup Móvel** > ***Steel Deck***, onda Superior do vão compreendido entre os apoios Móvel e intermediário.

## 4.4 Procedimento dos ensaios

Antes do início de cada ensaio, as principais dimensões dos protótipos, tais como altura total, largura e comprimento, foram medidas. Para acomodar o sistema, uma pré-carga de 8,895 kN foi aplicada durante 20 minutos aproximadamente. Fissuras existentes antes da aplicação do carregamento, decorrentes do transporte ou manuseio dos protótipos, foram devidamente registradas.

Os ensaios foram iniciados após a retirada da pré-carga, quando foram feitas as primeiras leituras dos deslocamentos e deformações. O carregamento foi então aplicado de forma gradual e crescente. Leituras foram realizadas em todos os incrementos de cargas. Durante os ensaios realizou-se três ciclos de carregamento para cada protótipo a fim de assegurar que a transferência das forças de cisalhamento longitudinal fosse proporcionada pela mossa e pelo atrito estático, eliminando a influência da aderência química. Deste modo, garantiu-se que aderência entre o aço e o concreto foi proporcionada apenas pelas mossa na etapa final de carregamento. A primeira etapa foi iniciada logo após o surgimento da primeira fissura em um dos vãos. Após a retirada completa da carga, iniciou-se um novo carregamento até que surgissem as primeiras fissuras no outro vão e na região do apoio interno quando então, iniciou-se a segunda etapa de descarregamento total do protótipo. Uma última etapa de carregamento foi então iniciada, só terminando quando o protótipo esgotasse sua capacidade portante sendo, então, registrada a carga máxima alcançada pela laje e o modo de ruptura ocorrido. Em todas as etapas de descarregamento, as leituras correspondentes a cada decréscimo de carga foram devidamente registradas. As leituras residuais também foram registradas e podem ser visualizadas nos gráficos constantes neste trabalho. Deve-se salientar que para valores de carga acima da carga de fissuração, as leituras somente foram feitas após a estabilização do sistema. O processo de fissuração de cada protótipo foi atentamente acompanhado registrando-se durante os ensaios as cargas de fissuração e ao término dos mesmos o espaçamento entre as fissuras.

## **Capítulo 5**

### **Apresentação e análise dos resultados**

#### **5.1 Introdução**

Este capítulo apresenta uma análise global dos resultados obtidos a partir dos diversos parâmetros monitorados durante os ensaios, além de descrever, resumidamente, os principais fatos ocorridos durante a realização dos mesmos. Os resultados são apresentados de forma geral para todos os protótipos. Posteriormente, uma análise por série de protótipos e uma comparação entre protótipos da mesma série são apresentadas, obedecendo a seqüência em que os mesmos foram ensaiados. A apresentação integral das medidas realizadas durante os ensaios pode ser encontrada no apêndice C, tabelas C1 a C6.

O carregamento imposto aos protótipos procurou simular, o mais próximo possível, uma das condições usuais de projeto: vãos uniformemente carregados. Entretanto, a ocorrência de efeitos secundários, em todos os ensaios, é quase sempre inevitável, como por exemplo, pequenas excentricidades nos pontos de aplicação das forças e a falta de verticalidade das cargas aplicadas. Esses efeitos tendem a se agravar à medida que a intensidade da carga aplicada e os deslocamentos das lajes mistas aumentam. Contudo não há como medir a influência de tais efeitos sobre os resultados finais e, apesar disso, os resultados obtidos ainda muito contribuíram para a análise do comportamento global da estrutura.

## 5.2 Apresentação dos resultados

### 5.2.1 Série 2B

O primeiro protótipo da série (P1S2B) foi ensaiado 346 dias após a data da concretagem e esperava-se alcançar uma carga de ruptura significativamente superior àquela encontrada com os protótipos de vão simples, devido às diferenças estruturais entre os dois sistemas de lajes. Havia muita expectativa com relação ao comportamento do mesmo por se tratar do primeiro ensaio realizado envolvendo continuidade de vãos em se tratando de pesquisa nacional.

A primeira fissura visível formou-se com uma carga de 62,27 kN, no vão 1, entre a linha de carga e o apoio móvel de extremidade. Ao atingir a carga de 71 kN foram ouvidos fortes estalos, seguidos por uma fissura localizada no vão 2, entre a linha de carga e o apoio fixo (vão 2). A primeira fissura na região do apoio interno surgiu com uma carga de 106,74 kN. A partir deste patamar de carregamento novas fissuras foram surgindo nesta região e as fissuras próximas às linhas de carga se intensificaram. Estas fissuras mostravam-se verticais ou levemente inclinadas e indicavam que a laje fletia sob o carregamento vertical. Ao se atingir a carga de 186,8 kN, uma grande fissura surgiu entre os apoios intermediário e móvel, a aproximadamente 50 cm do apoio intermediário, seguida de um forte estalo e perda considerável da carga aplicada pelo atuador. Observou-se imediatamente a ruptura da tela soldada ao longo da fissura. Um exame posterior permitiu constatar que a tela rompeu justamente onde terminava a armadura de continuidade.

Na realidade a ruptura da estrutura na região do apoio interno ocorreu após o colapso por cisalhamento longitudinal da laje. Uma vez que a fissura sob a linha de carga próxima ao apoio móvel encontrava-se bastante desenvolvida e as mossas perderam sua eficiência na região do vão de cisalhamento, houve uma redistribuição de carga, tendo o apoio móvel extremo não absorvido mais carga vertical. O apoio intermediário passou, então, a receber o restante da carga aplicada naquele vão, levando ao escoamento da armadura de continuidade e ao rompimento da tela soldada. A ruptura

da tela soldada ocorreu muito próxima de onde as barras da armadura de continuidade terminavam, uma vez que neste ponto havia uma redução significativa na área de aço resistente ao momento na região. A carga de ruptura deste protótipo foi 187 kN e a ruptura se deu por cisalhamento longitudinal combinado com o escoamento da armadura e rompimento da tela soldada. A figura 5.1 mostra o modo de fissuração do protótipo P1S2B.

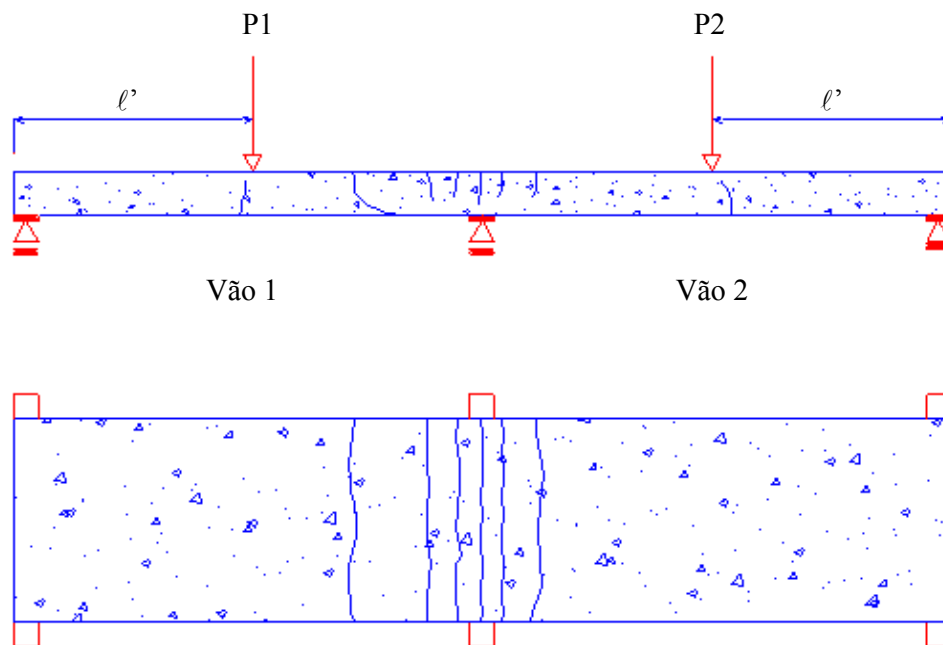


Figura 5.1 – Perfil das fissuras no protótipo P1S2B

Ao final do ensaio, o deslizamento relativo de extremidade entre a fôrma metálica e o concreto, característico do comportamento destas lajes mistas, pôde ser observado a olho nu em ambas as extremidades da laje. Entretanto, os dois materiais não se desprenderam totalmente devido à presença das mossas. O deslizamento relativo de extremidade representa, de acordo com o Eurocode 4 [1], um dos principais parâmetros de caracterização do ensaio de lajes mistas. O Eurocode 4 estabelece a carga relativa ao deslizamento de extremidade de serviço como a carga que provoca um deslizamento na extremidade da laje igual a 0,5 mm. Se a carga de serviço desejada for superada em 20% pela carga de deslizamento inicial, o deslizamento relativo de extremidade pode ser desconsiderado. Caso contrário é necessário o uso de ancoragens

nas extremidades. O controle do deslizamento de extremidade visa garantir que o limite de flechas em serviço não seja excedido bem como que o sistema apresente um comportamento dúctil. No protótipo P1S2B, a carga que provocou tal deslizamento foi de 120,08 kN e o deslizamento ocorreu na extremidade do apoio móvel. Também constatou-se visualmente a ocorrência de flambagem local da fôrma, pela presença de ondulações localizadas nas ondas superiores próximas as linhas de carga. Pode-se notar ainda, na extremidade dos apoios, o abaulamento da fôrma metálica devido ao desprendimento desta em relação à laje de concreto.

O segundo protótipo desta série foi ensaiado 360 dias após a sua concretagem e apresentou um padrão de fissuras bastante similar ao do protótipo anterior. Entretanto, a seqüência das fissuras não foi a mesma apresentada no protótipo P1S2B. A primeira fissura visível foi observada no vão 2 com 80 kN de carga total aplicada, próxima à linha de carregamento. A segunda fissura surgiu, na face superior bem próxima ao apoio intermediário, aos 89 kN de carga. Com 102,29 kN surgiu uma fissura próxima à linha de carga do vão 1. À medida que a carga era incrementada, estas fissuras foram desenvolvendo-se e novas fissuras surgiram na região do apoio interno até a laje perder sua capacidade de manter o carregamento imposto.

O deslizamento de extremidade de serviço para o protótipo P2S2B foi caracterizado com uma carga de 97,85 kN e ocorreu na região do apoio móvel da laje mista, sendo inferior ao valor encontrado para o protótipo anterior (120,08 kN).

O modo de ruptura observado foi devido à combinação de cisalhamento longitudinal com o escoamento da armadura na região do apoio intermediário. A carga última alcançada pelo atuador hidráulico foi 191,24 kN, valor ligeiramente superior ao alcançado pelo primeiro protótipo. Também foi observada, neste ensaio, a ocorrência de flambagem local do perfil metálico. Ao final do ensaio pode-se notar também o deslizamento relativo de ambas as extremidades da laje, assim como o abaulamento da fôrma de aço.

Devido às diferenças apresentadas pelos dois primeiros protótipos ensaiados, decidiu-se pelo ensaio do terceiro protótipo desta série (P3S2B). O protótipo foi ensaiado 378 dias após sua concretagem e exibiu a primeira fissura aos 40,03 kN de carga aplicada. Esta fissura ocorreu no vão 2, entre o apoio fixo e linha de carga nas proximidades desta. A segunda fissura ocorreu com 53,37 kN, próximo à linha de carga do vão 1. Pode-se notar que estes valores correspondem, praticamente, à metade da carga que provocou as respectivas fissuras no protótipo P2S2B. A primeira fissura na região do apoio interno surgiu com 124,53 kN. Com o posterior acréscimo de carga, as fissuras existentes foram-se desenvolvendo e na região do apoio interno, novas fissuras surgiram até o protótipo esgotar sua capacidade de carga.

O deslizamento de extremidade de serviço para o protótipo P3S2B foi alcançado com uma carga de 97,85 kN simultaneamente nos extremos dos apoios móvel e fixo da laje mista, coincidindo com o valor encontrado para o protótipo P2S2B.

A ruptura ocorreu também devido à combinação de cisalhamento longitudinal com o escoamento da armadura na região do apoio intermediário e a carga última foi de 177,90 kN. Este valor ficou abaixo daqueles encontrados para o primeiro e segundo protótipos. Também foi observada a ocorrência de flambagem local da mesa superior da fôrma metálica, nas proximidades das linhas de carga. Ao final do ensaio notaram-se o abaulamento da fôrma e um pronunciado deslizamento relativo em ambas as extremidades.

Conforme os valores indicam, o terceiro ensaio apresentou valores de carga de fissuração na região dos vãos inferiores aos dos dois primeiros ensaios. Conseqüentemente, a carga última também foi menor, uma vez que os apoios extremos começaram a perder capacidade de absorver carga precocemente. Este comportamento, possivelmente se deve à existência de fissuras iniciais na região dos vãos, constatadas antes do início do ensaio. As fissuras iniciais surgiram, provavelmente, durante o transporte do protótipo para o laboratório.



### 5.2.2 Série 2A

O primeiro protótipo (P1S2A) foi ensaiado 389 dias após a concretagem, dentro de um clima de expectativa em relação ao comportamento estrutural da laje mista, já que sua configuração de ensaio era diferente da dos protótipos da série anterior. A primeira fissura vertical visível formou-se com aproximadamente 53,37 kN de carga aplicada, no vão 1, entre as duas linhas de carga, próximo à linha de carga mais interna. Ao mesmo tempo, surgiu também uma fissura no vão 2, entre a linha de carga e o apoio fixo de extremidade. A primeira fissura na região do apoio interno surgiu com 80,05 kN de carga aplicada, seguida de fortes estalos na laje. Após este valor, ocorreu mais uma vez, fissuração intensa da região compreendida entre os pontos de aplicação de carga e na região do apoio intermediário. Vale ressaltar que foram constatadas fissuras iniciais neste protótipo muito próximas à linha de carga mais interna do vão 2. A figura 5.2 mostra o padrão das fissuras do protótipo P1S2A.

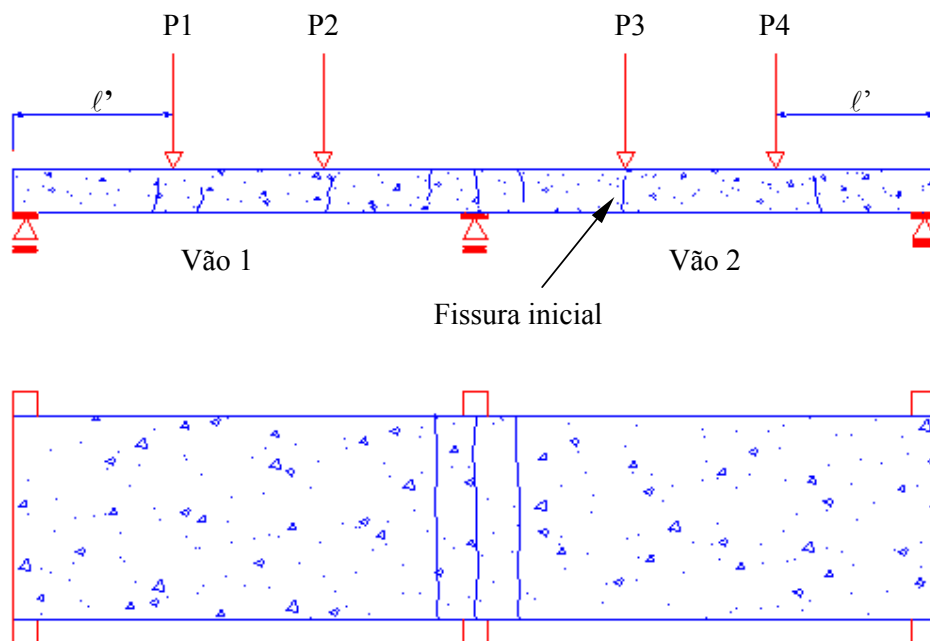


Figura 5.2 – Perfil das fissuras no protótipo P1S2A

O deslizamento de extremidade de serviço foi caracterizado com 106,74 kN de carga aplicada na região do apoio móvel.

O modo de ruptura observado foi devido à combinação de cisalhamento longitudinal com escoamento da armadura sobre o apoio interno aos 193,91 kN de carga aplicada. A flambagem local do perfil de aço ocorreu com aproximadamente 137,87 kN de carga, sob a linha de carga próxima ao apoio extremo do vão 1. Posteriormente, a mesa superior do perfil na região da linha de carga externa do vão 2 também sofreu flambagem local. O abaulamento do perfil e o deslizamento relativo das extremidades da laje foram nitidamente observados no final do ensaio.

O segundo protótipo da série (P2S2A) foi ensaiado 406 dias após a concretagem. A formação da primeira fissura vertical visível no protótipo ocorreu com 66,71 kN de carga aplicada, no vão 1, próximo à linha de carga mais externa. Com 80,05 kN notou-se uma fissura próxima ao apoio intermediário e ao mesmo tempo, uma outra fissura nas proximidades da linha de carga externa do vão 2. A partir daí, até à ruptura, as fissuras existentes foram-se desenvolvendo e novas fissuras surgiram entre as linhas de carga do vão 2 e na região do apoio interno, principalmente.

O deslizamento de extremidade de serviço foi registrado com 133,43 kN de carga aplicada, na região do apoio móvel da laje.

A ruptura aconteceu, mais uma vez, devido à combinação de cisalhamento longitudinal com o escoamento da armadura aos 204,59 kN de carga aplicada no protótipo, valor ligeiramente superior ao do ensaio anterior. Novamente observou-se a ocorrência de flambagem local da mesa superior do perfil de aço, nas proximidades das linhas de aplicação de carga mais externas do vão 1 e do vão 2. A carga correspondente à flambagem, registrada no vão 1, foi de 160 kN. Posteriormente, ocorreu a flambagem local na região da linha de carga do vão 2. Novamente, o abaulamento do perfil pode ser notado ao final do ensaio assim como o deslizamento relativo nas duas extremidades do protótipo.

Uma vez que na série anterior todos os protótipos foram ensaiados, optou-se também nesta série pelo ensaio do terceiro protótipo, isto é, o protótipo P3S2A. Desta forma, mais informações poderiam ser obtidas, enriquecendo a pesquisa. O terceiro protótipo foi ensaiado 412 dias após a sua concretagem e a primeira fissura visível foi registrada com 35,58 kN, no vão 1, entre a linha de carga externa e o apoio móvel extremo. A segunda fissura ocorreu entre a linha de carga externa do vão 2 e o apoio fixo quando a carga era de 66,71 kN. Aos 89 kN surgiu a primeira fissura no apoio intermediário. À medida que o carregamento era incrementado, as fissuras existentes desenvolviam-se e novas fissuras surgiam na região das linhas de carga externas de ambos os vãos e nas proximidades do apoio intermediário. Observou-se, neste ensaio, um padrão de fissuras praticamente simétrico em relação aos vãos.

O deslizamento de extremidade de serviço foi registrado com 106,74 kN de carga aplicada, na região do apoio fixo da laje.

O modo ruptura foi por cisalhamento longitudinal combinado com o escoamento da armadura e a carga correspondente foi de 206,36 kN. A flambagem local iniciou-se com uma carga de 133,43 kN sob as duas linhas de cargas extremas. Também foram observados ao final do ensaio o abaulamento do perfil e o deslizamento relativo bastante pronunciado nas duas extremidades do protótipo.

### 5.2.3 Resumo dos resultados

A tabela 5.1 apresenta os valores das cargas correspondentes às primeiras fissuras surgidas no vão 1, no vão 2 e no apoio intermediário de cada protótipo ensaiado, além da carga e do modo de ruptura de cada protótipo. Os valores apresentados neste quadro mostram a seqüência de fissuração dos protótipos. A nomenclatura empregada corresponde a:

$P_{fi(+)}^1$  = carga correspondente à formação da primeira fissura inferior visível no vão 1;

$P_{fi(+)}^2$  = carga correspondente à formação da primeira fissura inferior visível no vão 2;

$P_{fi(-)}$  = carga correspondente à formação da primeira fissura superior visível na região do apoio intermediário;

$P_{rup}$  = carga última aplicada pelo atuador hidráulico ao protótipo.

**Tabela 5.1 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios dos protótipos**

Protótipo	$P_{fi(+)}^1$ (kN)	$P_{fi(+)}^2$ (kN)	$P_{fi(-)}$ (kN)	$P_{rup}$ (kN)	Modo de ruptura
P1S2A	53,37	53,37	80,05	193,91	Tipo 1 <sup>(a)</sup>
P2S2A	66,71	80,05	80,05	204,59	Tipo 1
P3S2A	35,58	66,71	88,95	206,36	Tipo 1
P1S2B	62,27	71,00	106,74	187,00	Tipo 2 <sup>(b)</sup>
P2S2B	102,29	80,05	88,95	191,24	Tipo 1
P3S2B	53,37	40,03	124,53	177,90	Tipo 1

<sup>(a)</sup> **Tipo 1** - Cisalhamento longitudinal combinado com escoamento da armadura.

<sup>(b)</sup> **Tipo 2** - Cisalhamento longitudinal combinado com escoamento da armadura e ruptura da tela soldada.

A figura 5.3 ilustra o fenômeno da flambagem local do perfil metálico e o abaulamento da fôrma, observados em todos os ensaios realizados.

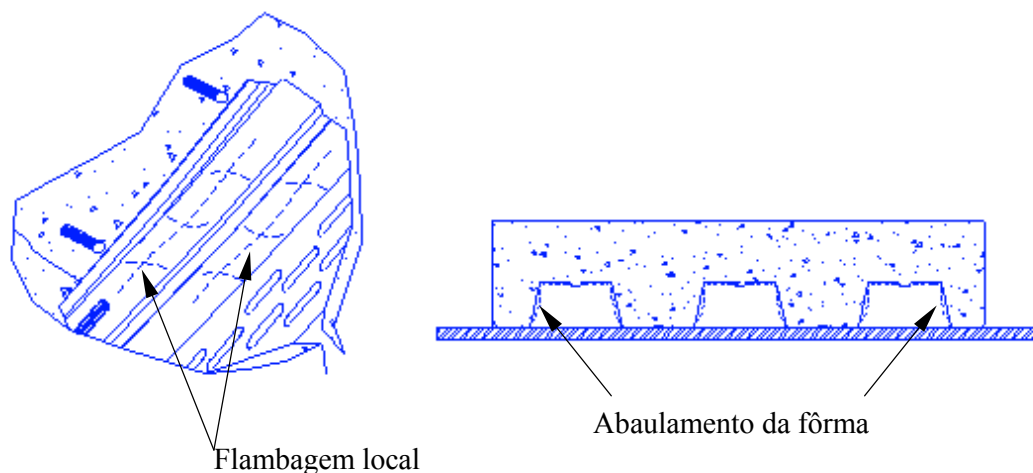
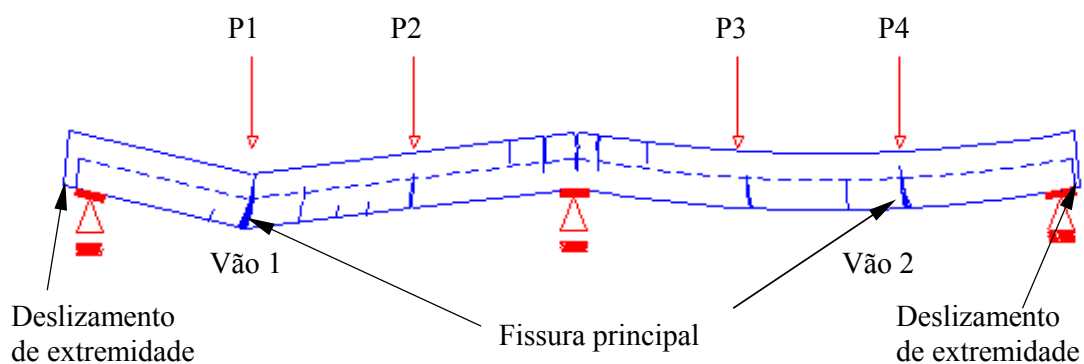
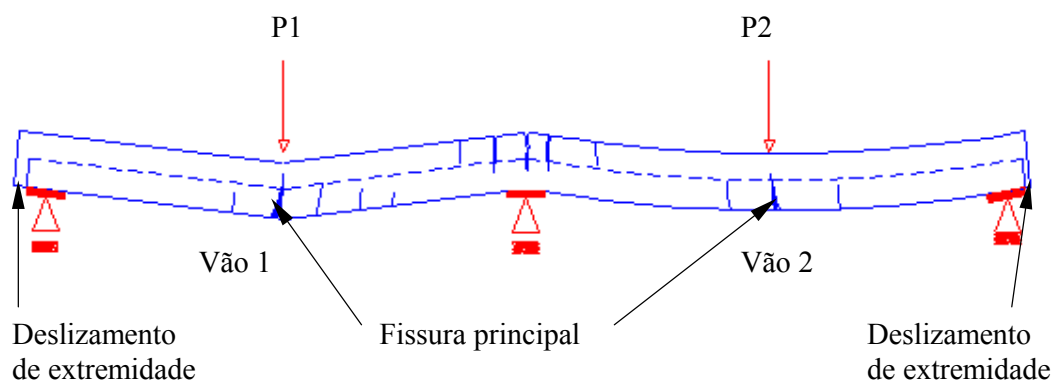


Figura 5.3 – Detalhes da flambagem local e do abaulamento do perfil metálico ao final do ensaio.

Ilustra-se na figura 5.4 o aspecto final dos protótipos de cada série, ou seja, quando os mesmos alcançaram a ruptura. O apêndice D contém o registro fotográfico relativo aos ensaios e os fenômenos observados.



(a)



(b)

Figura 5.4 – Aspecto dos protótipos ao término do ensaio: (a) série 2A; (b) série 2B.

## **5.3 Análise dos resultados**

### **5.3.1 Considerações iniciais**

Conforme mencionado, a análise dos resultados obtidos nos ensaios foi realizada de um modo geral para o comportamento apresentado pela laje em relação aos parâmetros efetivamente monitorados. Esta análise incluiu as seguintes relações: carga x deslizamento relativo de extremidade, carga x flecha no meio do vão, carga x deformação no aço da fôrma no vão, carga x deformação no aço da fôrma e da armadura na região do apoio intermediário.

A análise dos dados relativos às deformações da fôrma metálica possibilitou também a determinação do momento interno resistente nos vãos. Utilizando-se os valores destes momentos internos foi possível, então, determinar a distribuição de carga para os apoios extremos e o para o apoio interno das lajes. A análise das reações de apoio obtidas acrescentou mais informações sobre o comportamento estrutural do sistema de lajes mistas. Finalmente, a partir dos momentos internos e das reações de apoio, foi possível caracterizar ainda melhor o modo de ruptura predominante dos protótipos.

Com relação à continuidade das lajes mistas, salienta-se que a mesma foi garantida não só pelo posicionamento da armadura, mas pela continuidade da tela soldada e da fôrma metálica na região do apoio intermediário.

### **5.3.2 Comportamento dos protótipos da Série 2A**

#### *Comportamento carga x flecha no meio do vão*

O comportamento carga x flecha no meio do vão para a série pode ser sintetizado pela curva da figura 5.5, correspondente ao protótipo P2S2A. Observa-se que as etapas de descarregamento e recarregamento da estrutura não alteram a tendência

das curvas. Estas etapas são aproximadamente paralelas ao trecho inicial correspondente à fase elástica. Inicialmente ambos os vãos apresentam a mesma flecha, com uma variação praticamente linear em relação a carga aplicada. A partir dos 45 kN de carga, a curva correspondente ao vão 1 muda de inclinação indicando uma perda de rigidez devido ao início do processo de fissuração. Registra-se então, um aumento maior na flecha sem haver redução na carga imposta. Este instante marca a quebra da aderência química entre a fôrma metálica e o concreto; todo o fluxo de cisalhamento gerado nesta interface passa a ser resistido então pelas mossas.

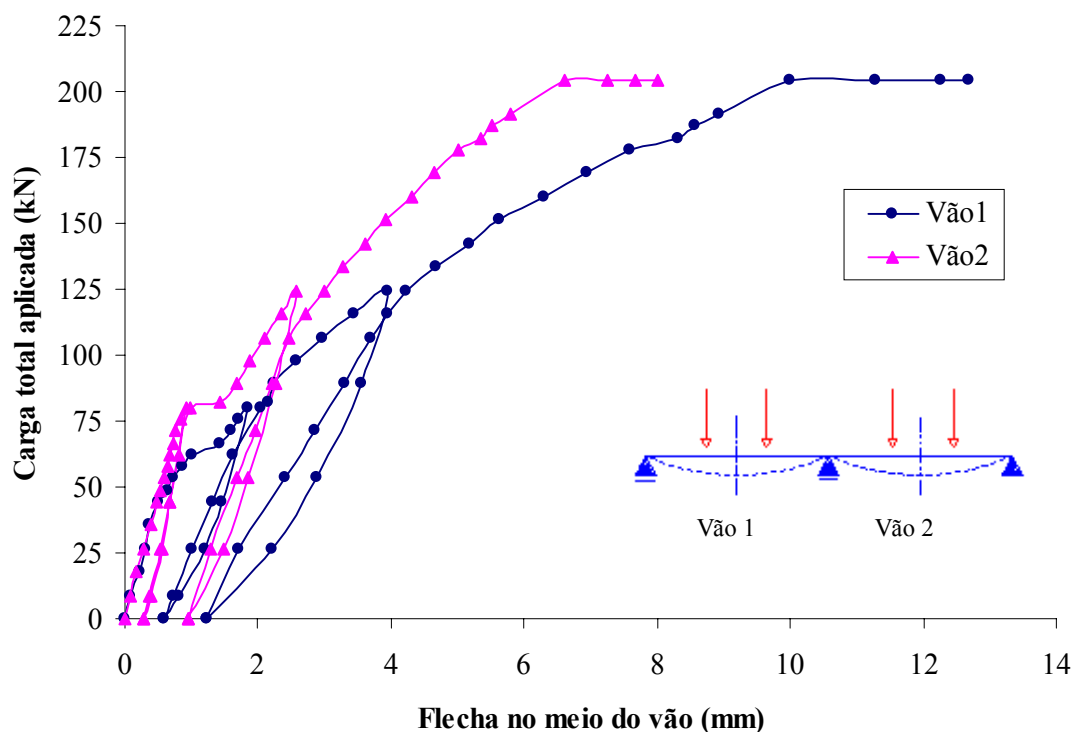


Figura 5.5– Curva carga x flecha no meio do vão do protótipo P2S2A

O vão 2 continuou a apresentar rigidez à flexão inicial até atingir a carga de 80 kN, quando então ocorreu sua fissuração. Entretanto, após a fissuração, observa-se uma similaridade na forma da curva carga x flecha nos dois vãos. Por outro lado houve grande diferença entre as flechas medidas em cada vão. A grande diferença entre as cargas iniciais de fissuração nos dois vãos parece ser a razão mais plausível deste fato. Deve-se salientar que uma vez que a fissuração no vão 1 ocorreu mais cedo, o deslizamento relativo entre aço e concreto também começou mais cedo. Observa-se ao

final do ensaio trechos horizontais nas curvas indicando crescimento das flechas sem variação no carregamento aplicado (comportamento dúctil). Este comportamento está diretamente relacionado ao modo de ruptura das lajes: combinação do esgotamento da resistência à flexão do apoio interno, em função do escoamento da armadura situada sobre o mesmo, com cisalhamento longitudinal (*shear bond*) nas extremidades da laje.

### *Comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade*

O comportamento de uma laje mista, segundo o Eurocode 4 [1], pode ser definido como sendo dúctil ou frágil. O comportamento é dúctil se a carga de ruptura da laje exceder a carga correspondente ao deslizamento de extremidade inicial de serviço (0,5 mm) em mais de 10%; caso contrário o comportamento da laje é frágil. Analisando-se a figura 5.6, observa-se um comportamento dúctil para o protótipo P2S2A, uma vez que a carga de ruptura supera a carga de deslizamento inicial nas extremidades dos vãos 1 e 2 em 53% e 35%, respectivamente.

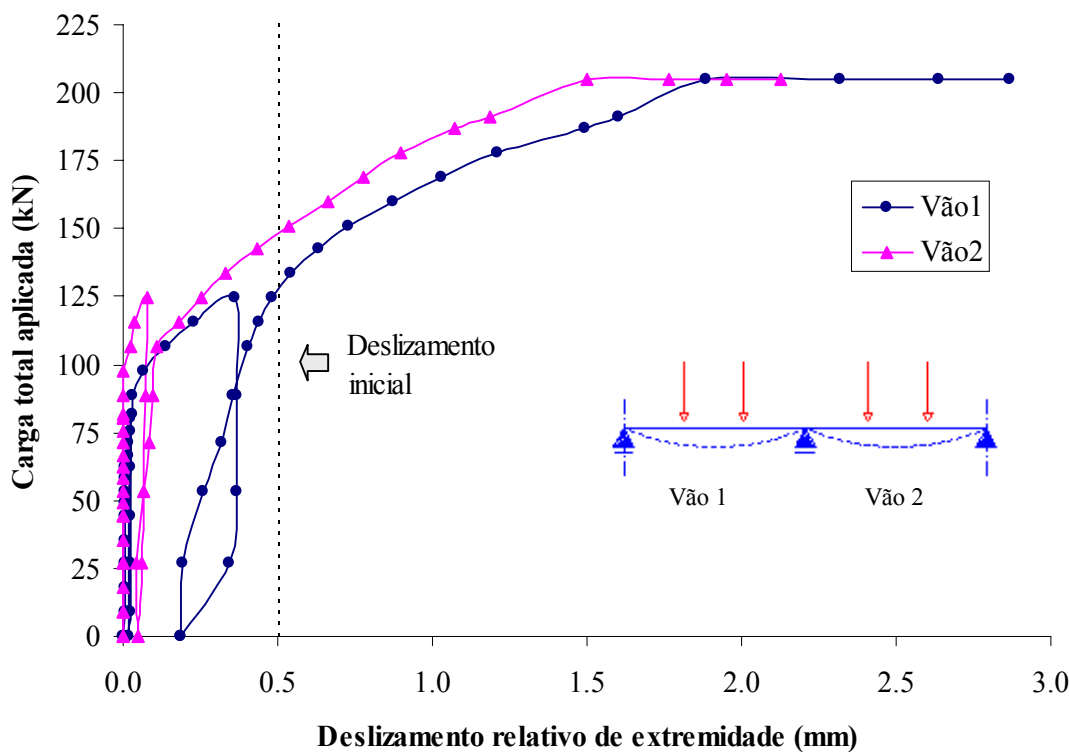


Figura 5.6 – Curva carga x deslizamento relativo dos apoios extremos do protótipo P2S2A



Pode-se distinguir, pela figura 5.6, três etapas no comportamento da laje em cada vão: interação total, interação parcial e colapso da ligação de cisalhamento longitudinal. A etapa de interação total corresponde ao trecho vertical das curvas com deslizamento relativo nulo e ocorre devido à aderência química e ao atrito estático. Observa-se que o início do deslizamento relativo na extremidade do vão 2 ocorreu para um carga maior do que na extremidade do vão 1. Este fato está diretamente correlacionado com o processo de fissuração, já que a partir daí o cisalhamento na interface aço-concreto é transmitido pelas mossas. Começa então o trecho inclinado das curvas correspondente a etapa de interação parcial. A transferência de cisalhamento na interface aço-concreto é gradativamente perdida à medida que o fluxo de cisalhamento horizontal aumenta, até o ponto em que as mossas perdem totalmente a sua eficiência, permitindo que o concreto deslize conforme mostra o trecho horizontal final correspondente ao colapso da ligação de cisalhamento longitudinal. Caso a fôrma fosse desprovida de mossas, provavelmente teríamos um trecho quase horizontal semelhante logo após fissuração da laje.

Também, no caso do deslizamento, observa-se uma defasagem entre as curvas. Uma vez que a fissuração no vão 1 ocorreu precocemente, as mossas ali começaram a trabalhar com uma carga menor e sendo incapazes de absorver o fluxo total de cisalhamento permitiram o início do deslizamento relativo entre o aço e o concreto para esta carga menor. Vale lembrar que o deslizamento de extremidade final representa uma média dos valores medidos naquela extremidade.

### *Comportamento carga x deformação na fôrma metálica no vão*

O comportamento carga x deformação para fibra inferior da fôrma na região de momento positivo máximo do protótipo P2S2A é ilustrado na figura 5.7. Observa-se que as curvas de descarregamento em ambos os vãos são praticamente paralelas à curva inicial. Embora as medidas de deformações e flechas tenham sido realizadas em posições diferentes, observa-se uma semelhança com as curvas das figuras 5.5 e 5.6. Qualitativamente, o alongamento do aço da fibra inferior em cada vão está coerente com

as respectivas flechas. Mais uma vez, o fato da fissuração ter ocorrido primeiro no vão 1 fez com que a fôrma começasse efetivamente a trabalhar ali mais cedo. Conseqüentemente, as deformações de tração foram maiores no vão 1.

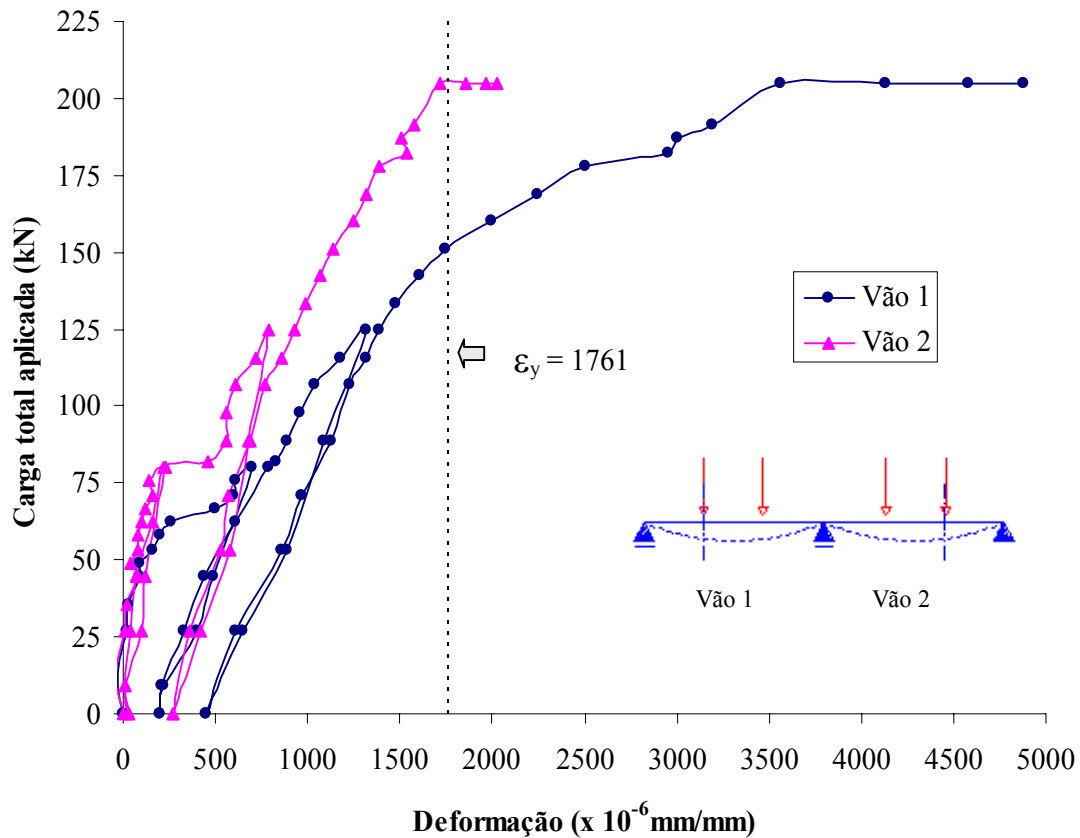


Figura 5.7 – Curva carga x deformação para fibra inferior da fôrma metálica do protótipo P2S2A sob a linha de carga externa.

Observa-se também na figura 5.7 que as deformações na fibra inferior de ambos os vãos excederam o valor limite de escoamento,  $\epsilon_y$ , sendo que no vão 1 os valores medidos ultrapassaram em muito este limite. O valor de  $\epsilon_y$  foi determinado a partir da relação linear entre tensão e deformação dada na equação 5.1, onde os valores de  $\sigma_y$  e  $E$  foram retirados da tabela 3.4, capítulo 3.

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} = \frac{342}{194187} = 1761 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \quad (5.1)$$

O fato das fibras apresentarem deformações residuais antes do aço atingir sua deformação de escoamento ( $\epsilon_y$ ) pode ser explicado pelo não fechamento total das fissuras do concreto nas etapas de descarregamento. Este não fechamento das fissuras por sua vez é devido ao deslizamento relativo que ocorreu entre o concreto e as mossas.

O comportamento carga x deformação na fibra superior da fôrma de aço para a série foi caracterizado pela inversão da deformação - de tração para compressão - durante o carregamento e pela ocorrência de flambagem local ao final do ensaio. O gráfico da figura 5.8 ilustra este comportamento para o protótipo P3S2A.

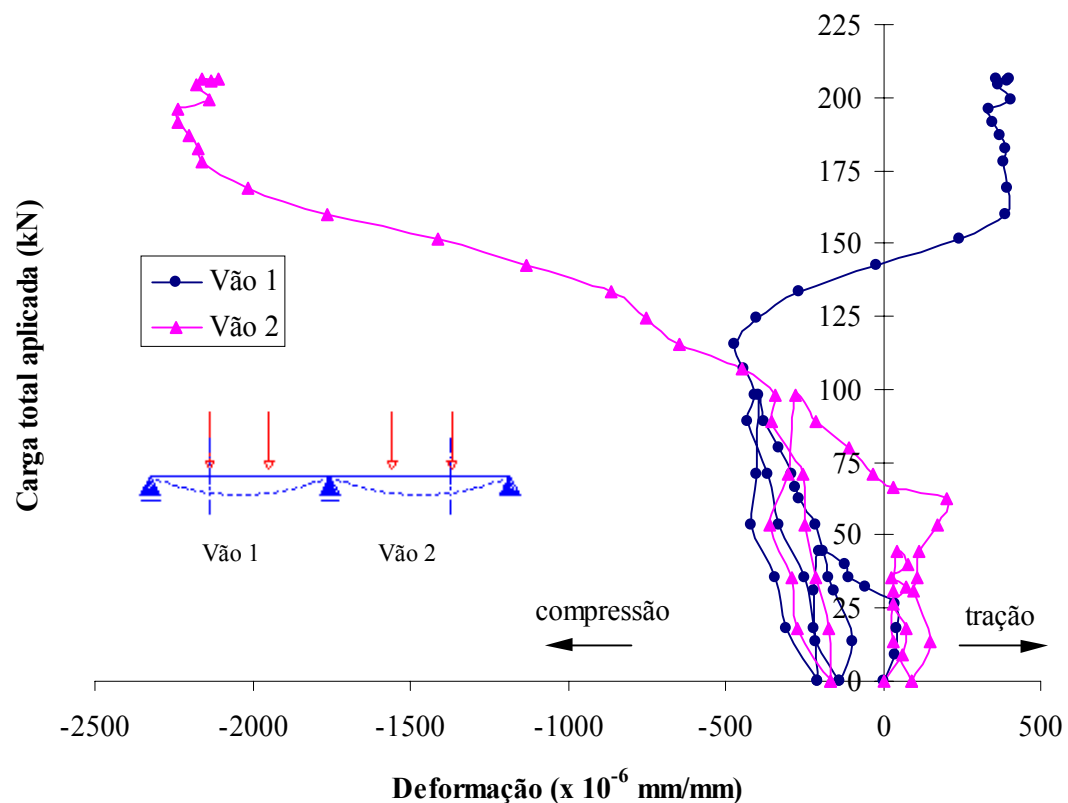


Figura 5.8 – Curva carga x deformação para a fibra superior da fôrma metálica do protótipo P3S2A sob a linha de carga extrema.

A inversão na deformação pode ser observada em ambos os vãos do protótipo e corresponde ao instante em que ocorreu a fissuração e a quebra da aderência química.

Este fato indica o surgimento de uma segunda linha neutra situada na fôrma, fazendo com que a interação entre o concreto e a fôrma deixe de ser total e passe a ser parcial. O fenômeno da flambagem local, observado no item 5.2 deste capítulo, pode ser visto na curva correspondente ao vão 1 através de uma segunda inversão das deformações de compressão para tração. Em geral, a flambagem local ocorreu muito próxima aos locais onde foram fixados os extensômetros.

### Comportamento carga x deformação e carga x curvatura da fôrma metálica na região do apoio intermediário

O comportamento carga x deformação da fibra inferior e superior da fôrma metálica próxima ao apoio intermediário é ilustrado na figura 5.9 para o protótipo P1S2A.

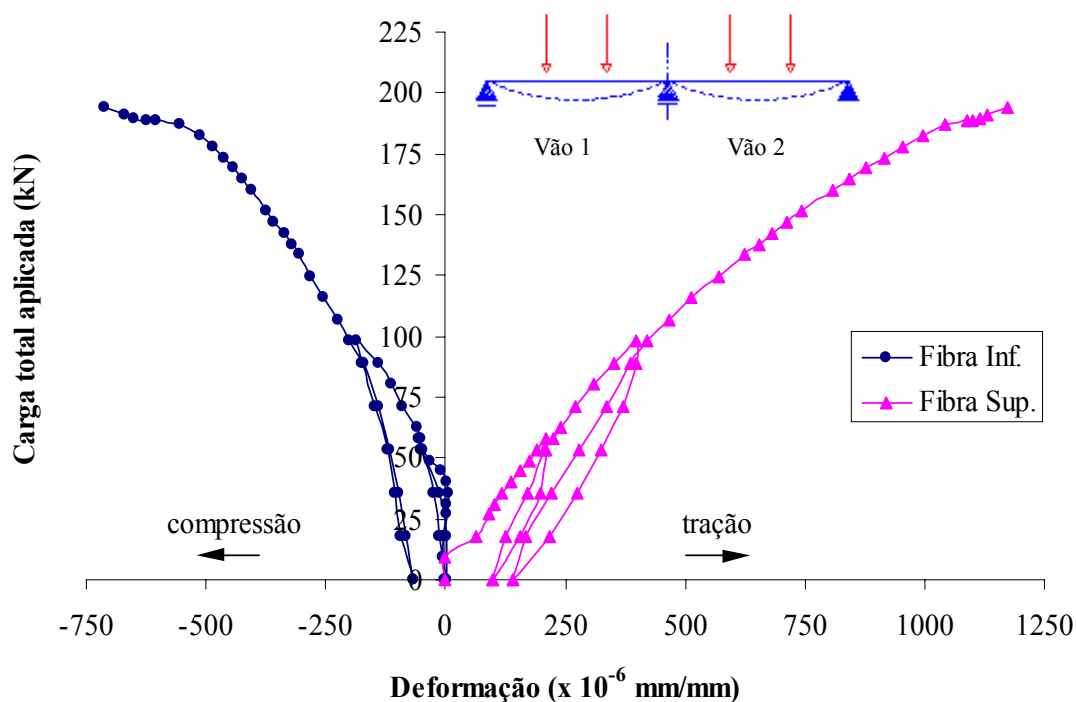


Figura 5.9 – Curva carga x deformação da fôrma metálica do protótipo P1S2A na região do apoio intermediário.

Nota-se excelente continuidade da curva, após as retomadas de cada etapa de carregamento, bem como pequenas deformações residuais decorrentes do fechamento

parcial das fissuras do concreto quando do descarregamento da estrutura. Os valores de deformação na fibra superior se tornam significativos na segunda etapa de carregamento, quando surge a primeira fissura próxima ao apoio interno. A partir deste instante, as deformações crescem progressivamente até o final do ensaio. Embora alcance uma deformação final considerável, a fibra superior não chega escoar. Com relação à fibra inferior observa-se que esteve sempre comprimida durante todo o ensaio. Não se observou nesta região a ocorrência de flambagem local da fibra comprimida. A presença da chapa na região do apoio intermediário, simulando a mesa superior da viga suporte, e do concreto comprimido atuam como enrijecedores evitando este efeito. Vale lembrar que as deformações foram medidas a 15 cm do centro do apoio interno.

As deformações medidas na fôrma metálica, na região do apoio intermediário, foram utilizadas para estimar a curvatura da seção mista, simbolizada por  $\phi$ , como mostra a figura 5.10.

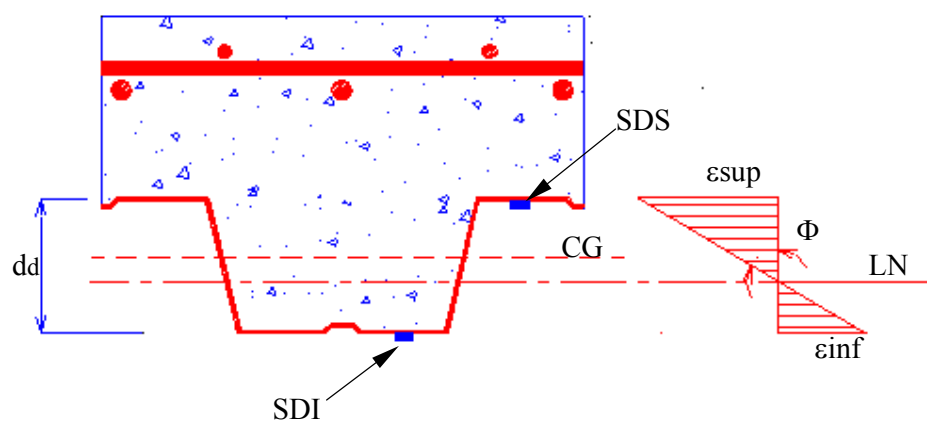


Figura 5.10 – Cálculo da curvatura da seção transversal mista a partir das deformações da fôrma metálica.

A curvatura foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\Phi = \frac{\Delta\varepsilon}{d_d} = \frac{\varepsilon_{sup} - \varepsilon_{inf}}{d_d} \left( \times \frac{10^{-6}}{\text{cm}} \right) \quad (5.2)$$

onde  $\varepsilon_{sup}$  e  $\varepsilon_{inf}$  são as deformações medidas no perfil e  $d_d$ , a altura total da fôrma metálica, dada na tabela 3.3 do capítulo 3.

A figura 5.11 mostra a relação carga x curvatura da fôrma metálica na região do apoio intermediário para o protótipo P1S2A, obtida utilizando-se a equação 5.2.

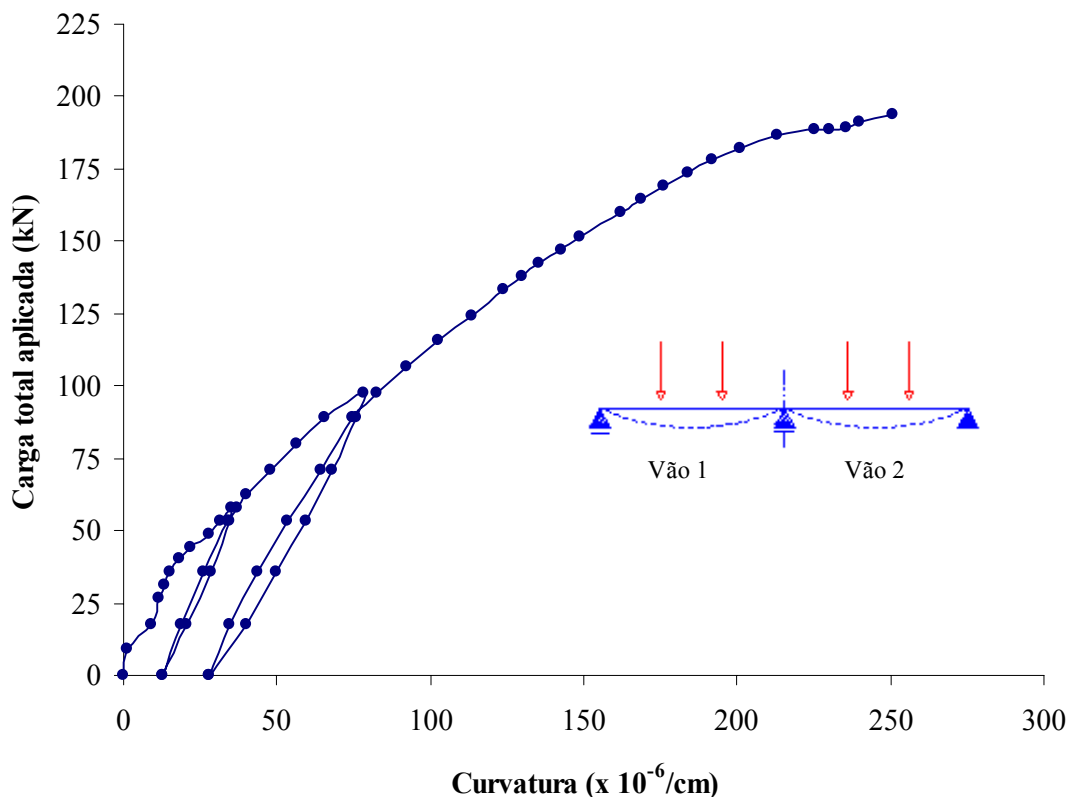


Figura 5.11 – Curva carga x curvatura da fôrma metálica do protótipo P1S2A na região do apoio intermediário.

O aspecto final da curva sugere a formação de uma rótula plástica no apoio intermediário, uma vez que a curvatura da seção transversal continua a crescer enquanto o carregamento permanece constante.

### *Comportamento carga x deformação na barra da armadura*

Infelizmente, a análise do comportamento carga x deformação na barra da armadura não foi realizada devido a problemas apresentados pelos extensômetros. Nos protótipos P1S2A e P3S2A os extensômetros apresentaram leituras inconsistentes e no protótipo P2S2A o mesmo apresentou defeito antes mesmo do início do ensaio.

Acredita-se que a principal razão do mal funcionamento e perda dos extensômetros está no longo intervalo decorrido entre a concretagem e o ensaio dos protótipos desta série (396 dias para o primeiro protótipo). Apesar disso, pelos valores de deformação e curvatura apresentados pela fôrma, acredita-se que esta armadura tenha sido bastante solicitada.

### **5.3.3 Comportamento dos protótipos da Série 2B**

#### *Comportamento carga x flecha no meio do vão*

A figura 5.12 ilustra o comportamento carga x flecha no meio do vão do protótipo P3S2B. Os trechos iniciais das curvas ilustram o comportamento elástico linear da laje, onde a interação é total na interface aço-concreto. Após a fissuração, aos cerca de 36 kN, o vão 2 experimenta uma grande perda de rigidez, caracterizada por um aumento brusco na flecha. Aos 40 kN a estrutura é descarregada e recarregada pela primeira vez. Ao se retomar o carregamento, próximo aos 45 kN, o vão 1 começa a perder rigidez. O aumento na flecha é praticamente linear. A laje sofre um novo descarregamento. Na terceira etapa do carregamento as curvas se invertem, ou seja, o vão 1 passar a apresentar flechas maiores em relação ao vão 2 mantendo esta diferença até o final do ensaio, quando se tornam horizontais, indicando que a resistência do protótipo foi esgotada. Observa-se que, como os vãos fissuraram para valores de carga bem próximos, a defasagem entre as curvas é menor. O aspecto das curvas também indica que o processo de fissuração nos vãos 1 e 2 foi muito similar.

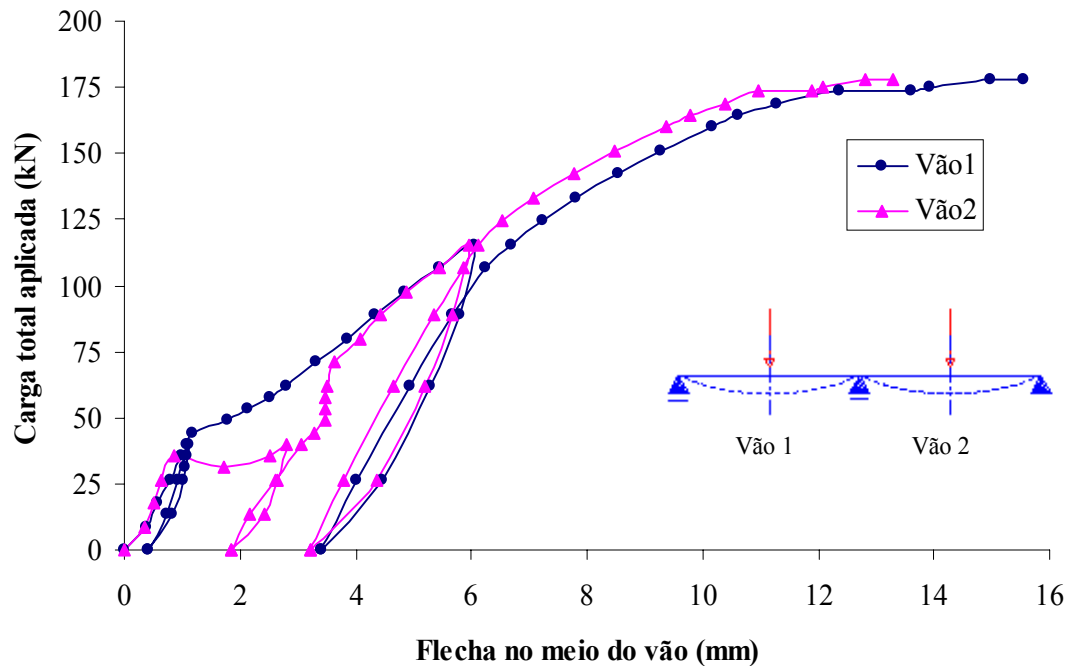


Figura 5.12 – Curva carga x flecha no meio do vão do protótipo P3S2B

### *Comportamento carga x deslizamento relativo de extremidade*

Analisando-se as curvas da figura 5.13 pode-se verificar que os protótipos desta série também apresentaram um comportamento dúctil. A carga de ruptura do protótipo P3S2B superou a carga relativa ao deslizamento de extremidade inicial em 82% e 61% para os vãos 1 e 2 respectivamente. Observa-se, tal como na série 2A, as três etapas no comportamento da laje em cada vão. O aspecto das curvas indica também um comportamento bastante similar entre os dois vãos. Sem dúvida, uma vez que o processo de fissuração ocorreu de forma similar em cada vão, tem-se que a perda de aderência mecânica nas extremidades do protótipo foi praticamente igual. O deslizamento de extremidade cresceu continuamente com a carga imposta até próximo aos 160 kN. A partir daí as curvas ficaram praticamente horizontais, isto é, o deslizamento cresceu significativamente enquanto que o carregamento permaneceu constante. Tal comportamento expressa a ductilidade apresentada pelo protótipo ensaiado.



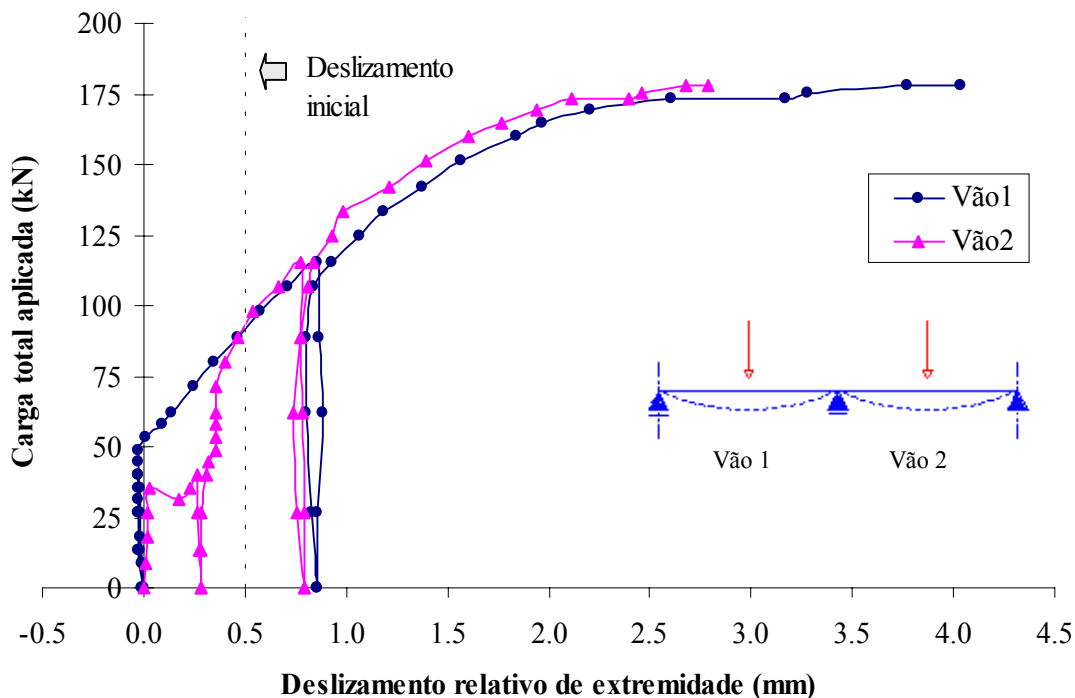


Figura 5.13 – Curva carga x deslocamento relativo dos apoios extremos do protótipo P3S2B

### *Comportamento carga x deformação na fôrma metálica no meio vão*

O comportamento carga x deformação na fibra inferior da fôrma no meio de cada um dos vãos está ilustrado pela curva relativa ao protótipo P3S2B (figura 5.14). Como nesta série as leituras de flecha e deformação foram tomadas na mesma seção, pode-se notar a semelhança com a curva carga x flecha no meio do vão, indicando que as deformações em ambos os vãos foram proporcionais às respectivas flechas. A fissuração da laje pôde ser claramente identificada nas curvas a partir do ponto onde as deformações aumentam subitamente. Ao se retomar o carregamento na etapa final do ensaio as deformações em ambos os vão são idênticas. As deformações registradas nos vãos 1 e 2 deste protótipo indicam que ocorreu escoamento da fibra interior da fôrma metálica ao final do ensaio. Tal como na série anterior foram registradas deformações residuais antes do aço atingir sua deformação de escoamento ( $\epsilon_y$ ).

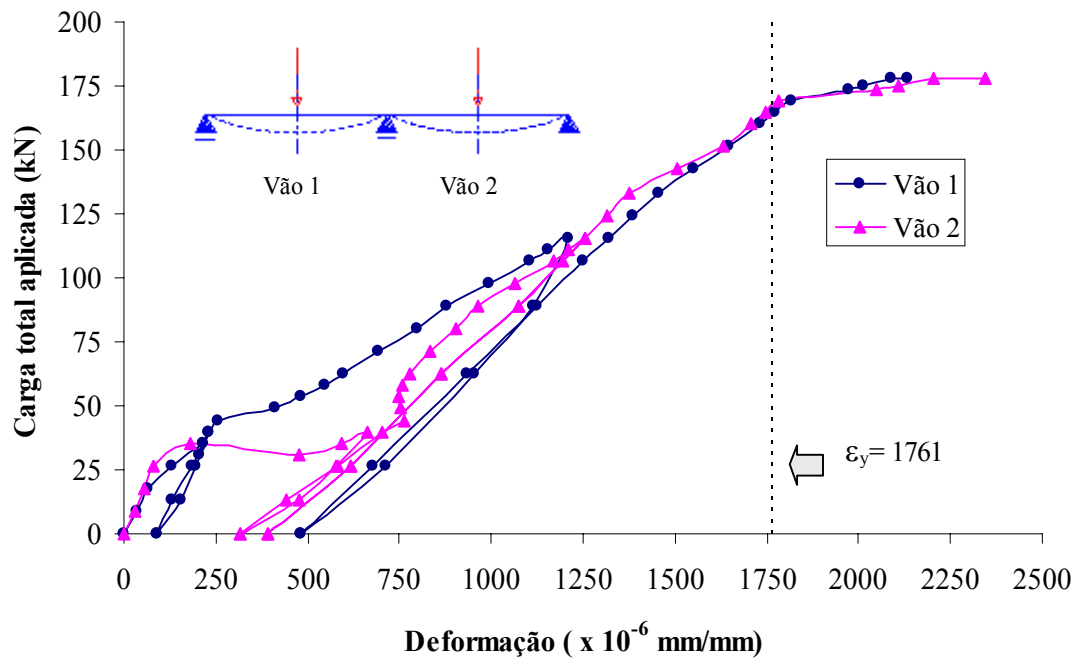


Figura 5.14 – Curva carga x deformação da fibra inferior da fôrma metálica do protótipo P3S2B no meio do vão.

O comportamento carga x deformação na fibra superior da fôrma de aço para a série foi caracterizado pela inversão da deformação, tal como observado na série 2A. O gráfico da figura 5.15 ilustra este comportamento para o protótipo P3S2B. A inversão na deformação pode ser observada em ambos os vãos do protótipo no instante em que começam a fissurar, indicando o surgimento de uma segunda linha neutra na fôrma. Observa-se ainda que a curva relativa ao vão 2 apresenta uma tendência de reversão das deformações próximo aos 130 kN de carga. Isto se explica pela ocorrência de flambagem local da fibra superior comprimida.

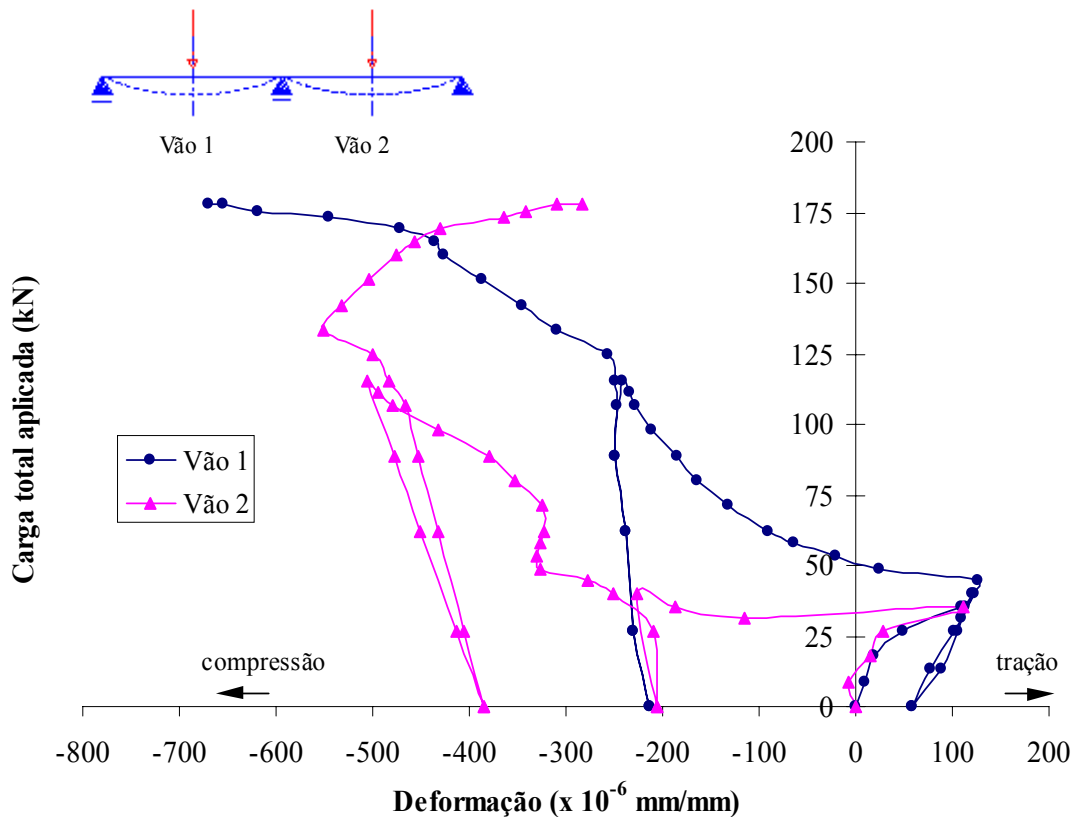


Figura 5.15 – Curva carga x deformação da fibra superior da fôrma metálica do protótipo P3S2B no meio do vão.

### Comportamento carga x deformação e carga x curvatura da fôrma metálica na região do apoio intermediário

O comportamento carga x deformação nas fibras inferior e superior da fôrma metálica na região do apoio intermediário é ilustrado na figura 5.16 para o protótipo P3S2B. Também nesta região foram registradas deformações residuais nas etapas de descarregamento, embora o aço não tenha atingido seu limite de escoamento. As deformações se tornam mais significativas após surgir a primeira fissura no apoio intermediário durante a segunda fase de carregamento. As deformações crescem progressivamente na terceira etapa com valores finais muito próximos. Apesar dos valores medidos de deformação na fibra inferior não foi observada a ocorrência de flambagem local nesta região, como visto também na série anterior.

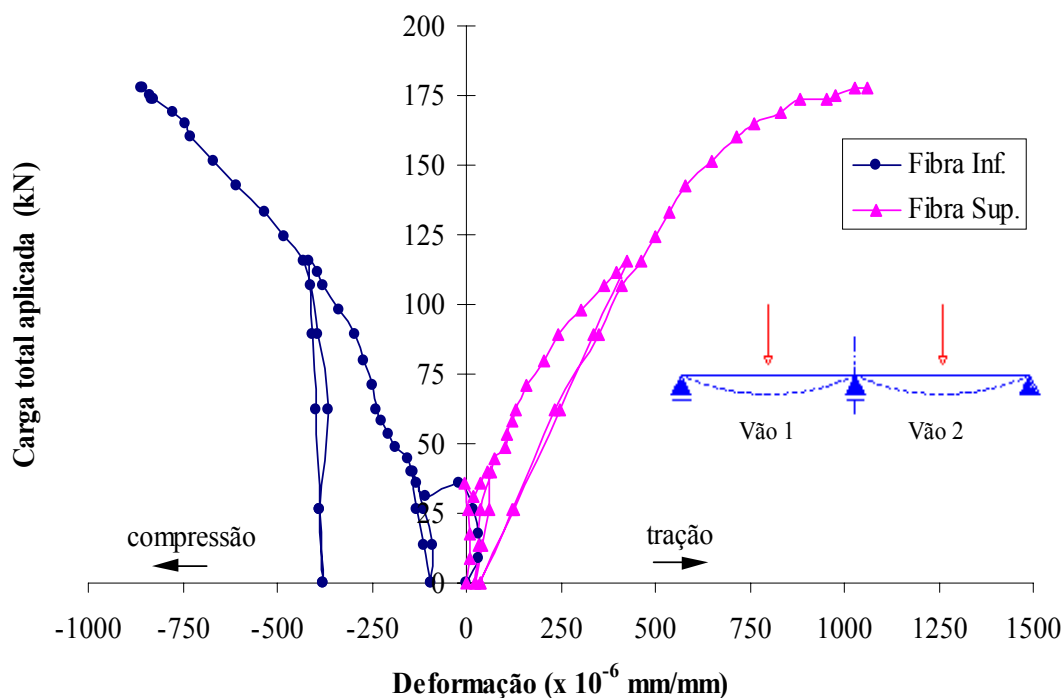


Figura 5.16 – Curva carga x deformação para a fibra inferior e superior da fôrma metálica do protótipo P3S2B na região do apoio intermediário.

A relação carga x curvatura da fôrma metálica na região do apoio intermediário para o protótipo P3S2B é mostrada na figura 5.17. Observa-se que ao final do ensaio a carga praticamente não varia enquanto que a curvatura da seção aumenta continuamente, sugerindo a formação de uma rótula plástica sobre o apoio intermediário.

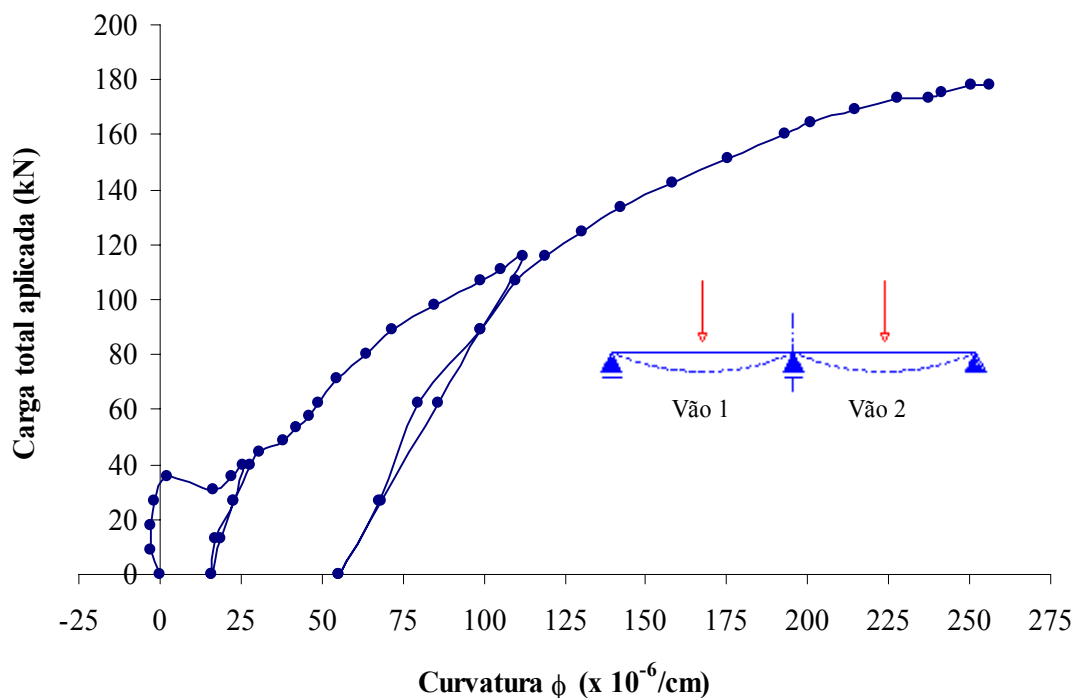


Figura 5.17 – Curva carga x curvatura da fôrma metálica do protótipo P3S2B na região do apoio intermediário.

### *Comportamento carga x deformação na barra da armadura*

Ao contrário da série 2A, apenas o último protótipo apresentou perda total do extensômetro. As leituras do protótipo P2S2B foram consistentes até aproximadamente 93% da sua carga de ruptura e a partir daí ocorreu o mal funcionamento dos extensômetros.

A deformação correspondente ao início de escoamento da barra ( $\epsilon_{yk}$ ) foi obtida utilizando-se o diagrama tensão x deformação de cálculo para aços laminados a quente preconizado pela NBR 6118 [13], mostrado na figura 5.18.

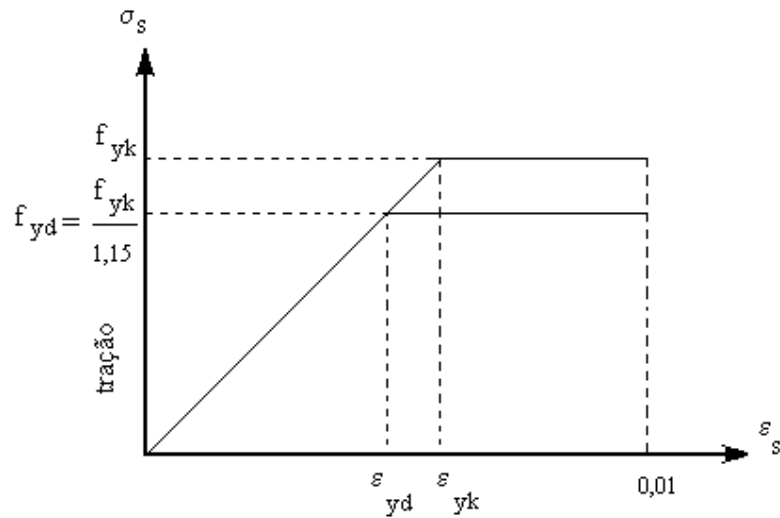


Figura 5.18 – Curva tensão x deformação para aço laminado a quente.

O valor de  $\varepsilon_{yk}$  foi determinado pela equação abaixo:

$$\varepsilon_{yk} = \frac{f_{yk}}{E_s} = \frac{500}{210000} = 2381 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \quad (5.3)$$

onde  $f_{yk}$  e  $E_s$  valem 500 MPa e 210000 MPa, respectivamente.

O gráfico da figura 5.19 apresenta o comportamento carga x deformação na armadura para o protótipo P1S2B. Tal como ocorreu com a fôrma metálica, foram registradas deformações residuais na barra nas etapas de descarregamento, embora a mesma estivesse abaixo do seu limite de escoamento. Os valores mais expressivos foram registrados a partir do final da segunda etapa de carregamento, após surgir a primeira fissura na região do apoio intermediário.

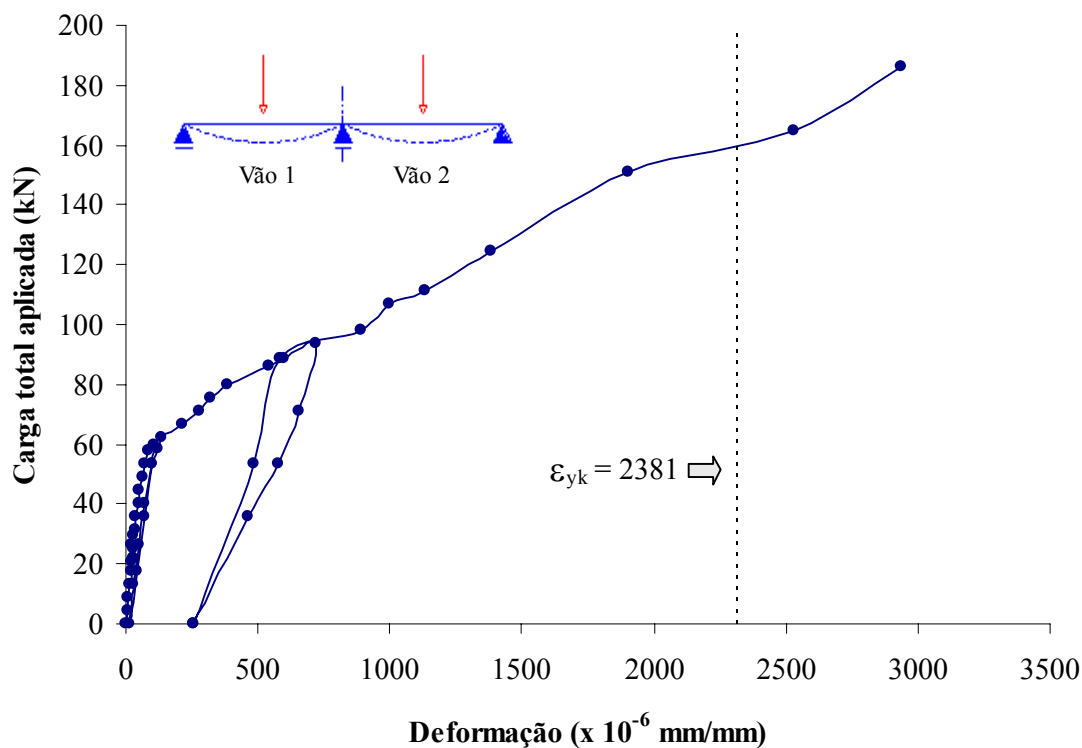


Figura 5.19 – Curva carga x deformação na barra da armadura negativa do protótipo P1S2B sobre o apoio intermediário.

O comportamento da barra pode ser dividido em três etapas. A etapa inicial refere-se a primeira fase de carregamento, onde nenhuma fissuração ocorreu na região do apoio intermediário, uma vez que deformação residual observada após o descarregamento da estrutura foi nula. Na segunda etapa, em função da fissuração, a barra começa a trabalhar como indica a mudança na inclinação da curva. Na terceira e última fase de carregamento a curva mantém a continuidade e as deformações crescem muito até cerca de 180 kN. Para este protótipo foi registrado o rompimento da tela soldada devido à ação do momento, quando o ensaio foi, então, encerrado.

### **5.3.4 Determinação da distribuição de carga nos apoios dos protótipos**

#### *Considerações iniciais*

Conforme foi mencionado no item 4.3 do capítulo precedente, as deformações ocorridas na fôrma metálica e na armadura são fundamentais para os propósitos deste trabalho. A análise apresentada no item anterior revelou, entretanto, que as leituras de deformação de alguns elementos de aço foram fortemente afetadas por efeitos localizados. A flambagem local das fibras superiores afetou as leituras dos extensômetros da região de momento máximo no vão, principalmente na etapa final dos ensaios dos protótipos de ambas as séries. Com relação às leituras de deformação da barra da armadura, apenas o primeiro e o segundo protótipos da série 2B forneceram valores consistentes até o final do ensaio. Os dados mais consistentes foram obtidos para fôrma metálica na região próxima ao apoio intermediário e somente o último protótipo da série 2A apresentou maior dispersão nas leituras.

Com base nestes fatos, a distribuição de carga para os apoios foi obtida a partir dos momentos internos resistentes das seções situadas sob as linhas cargas externas de cada vão. Com base nas deformações medidas na fibra superior e inferior da fôrma metálica foi possível determinar os momentos internos até o nível de carga anterior a ocorrência da flambagem local dos elementos comprimidos. Este fenômeno ocorreu para valores de carga abaixo da carga de ruptura dos protótipos.

#### *Cálculo do momento interno resistente*

O cálculo do momento interno resistente foi feito a partir do processo simplificado constante no item 9.7.2 do Eurocode 4 [1]. A distribuição de tensões ao longo da altura da fôrma metálica foi obtida a partir dos diagramas tensão x deformação para o aço da fôrma dados no apêndice B. O efeito da flambagem local das partes comprimidas da fôrma metálica foi considerado utilizando-se o método das larguras



efetivas, conforme as especificações do AISI [18]. Vale lembrar que o concreto confinado nas nervuras da fôrma atua como enrijecedor, retardando a flambagem local das partes comprimidas do perfil. Esta contribuição do concreto foi considerada nos cálculos de acordo as disposições do Eurocode 4 [1]. A figura 5.20 mostra a distribuição de tensões ao longo da seção da fôrma de aço e o momento resistente atuante na seção de largura  $b$ , igual a 274 mm. As hipóteses adotadas no cálculo foram:

- Tensão no aço correspondente a deformação medida;
- Tensão no bloco comprimido do concreto igual a  $f_c$ ; e
- Todo concreto tracionado é desprezado.

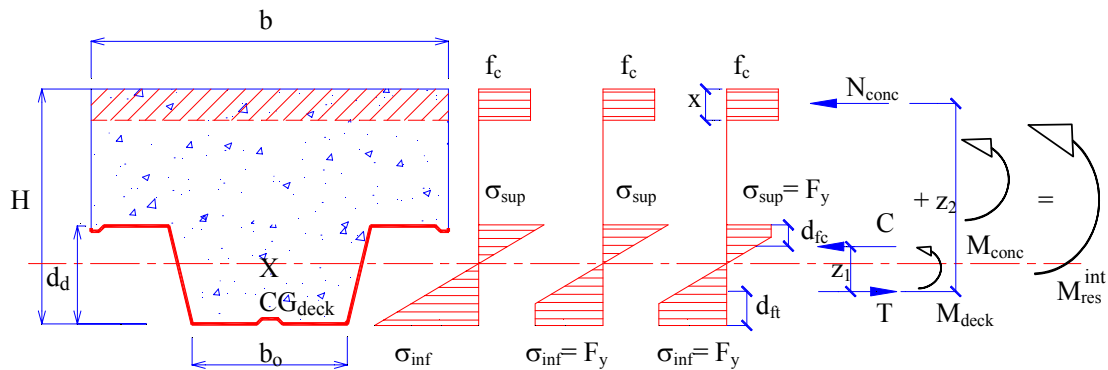


Figura 5.20– Distribuição de tensões ao longo da fôrma metálica para o momento resistente atuante na seção mista.

Os esforços resultantes de tração e compressão,  $T$  e  $C$ , são iguais aos produtos das tensões  $\sigma_{inf}$  e  $\sigma_{sup}$  pelas respectivas áreas efetivas dos elementos tracionados e comprimidos. A resultante de compressão no concreto,  $N_{conc}$ , é obtida pelo equilíbrio das forças normais atuantes na fôrma metálica:

$$N_{conc} = T - C \quad (5.4)$$

O momento interno resulta, então, da soma dos momentos na fôrma metálica,  $M_{deck}$ , e no concreto,  $M_{conc}$ :

$$M_{res}^{int} = M_{deck} + M_{conc} = C \times z_1 + N_{conc} \times z_2 \quad (5.5)$$

Os braços de alavanca  $z_1$  e  $z_2$  valem respectivamente:

$$z_1 = d_d - d_{ft} - d_{fc} \quad (5.6)$$

$$z_2 = H - d_{ft} - \frac{x}{2} \quad (5.7)$$

A altura do bloco comprimido de concreto ( $x$ ) é dada por:

$$x = \frac{N_{conc}}{b \times f_c} \quad (5.8)$$

Empregando-se a equação 5.5, os valores de momento foram calculados apenas para a última etapa de carregamento e antes da ocorrência da flambagem local. As demais etapas foram desprezadas, uma vez que se deseja conhecer as reações de apoio próximo à ruptura dos protótipos.

### *Cálculo das reações de apoio*

As reações verticais nos apoios extremos foram obtidas, para cada série ensaiada, igualando-se os momentos internos resistentes, obtidos através da equação 5.5, aos momentos externos atuantes. A reação no apoio intermediário foi determinada equilibrando-se os esforços verticais atuantes na estrutura. A figura 5.21 mostra os esquemas de cálculo das reações utilizados para os protótipos das séries 2A e 2B. O comprimento do vão ( $\ell$ ) é igual a 180 cm e os pontos a e b representam os locais onde foram medidos os momentos interno e externo.

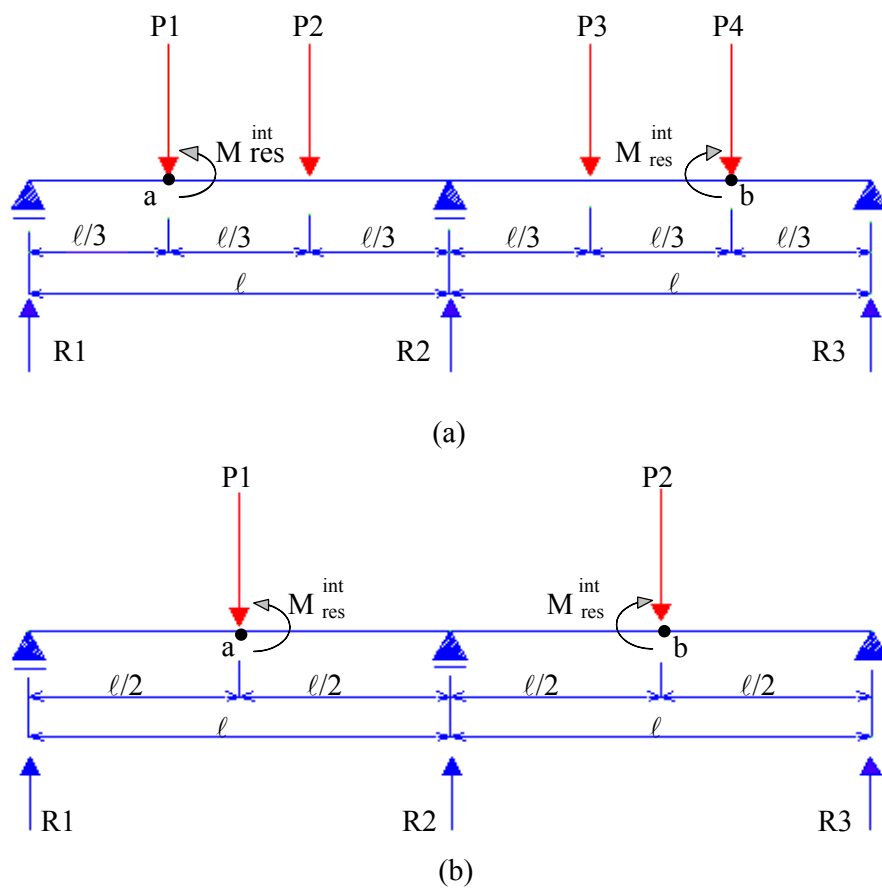


Figura 5.21 – Esquema de cálculo das reações de apoio para os protótipos: (a) série 2A  
(b) série 2B

Em ambas as séries empregaram-se as equações de equilíbrio abaixo:

$$\sum R = CT \quad (5.9)$$

$$\sum \vec{M}_a = M_{res}^{int} \quad (5.10)$$

$$\sum \overleftarrow{M}_b = M_{res}^{int} \quad (5.11)$$

Onde:  $\sum R$  é a somatória das reações de apoio, isto é,  $R1+R2+R3$ ;

$CT$  é carga total aplicada pelo atuador hidráulico.

Aplicando-se as equações 5.10 e 5.11 obtêm-se para os protótipos da série 2A as seguintes expressões para R1 e R3:

$$R1 = \frac{M_{res,a}^{int}}{\ell/3} = M_{res,a}^{int} \times \frac{3}{\ell} \quad (5.12)$$

$$R3 = \frac{M_{res,b}^{int}}{\ell/3} = M_{res,b}^{int} \times \frac{3}{\ell} \quad (5.13)$$

A reação no apoio intermediário, R2, pode ser determinada a partir de 5.9:

$$R2 = CT - R1 - R3 \quad (5.14)$$

A carga total aplicada, CT, é igual a:

$$CT = P1 + P2 + P3 + P4 \quad (5.15)$$

De maneira análoga obtêm-se as seguintes expressões para cálculo das reações de apoio dos protótipos da série 2B:

$$R1 = \frac{M_{res,a}^{int}}{\ell/2} = M_{res,a}^{int} \times \frac{2}{\ell} \quad (5.16)$$

$$R3 = \frac{M_{res,b}^{int}}{\ell/2} = M_{res,b}^{int} \times \frac{2}{\ell} \quad (5.17)$$

$$R2 = CT - R1 - R3 \quad (5.18)$$

A carga total aplicada, CT, neste caso é igual a:

$$CT = P1 + P2 \quad (5.19)$$

Os valores de R1, R2 e R3 foram, deste modo, determinados para cada valor de carga total aplicada, CT, durante a terceira etapa de ensaio. Estes valores estão listados integralmente no apêndice C deste trabalho.

### *Análise das reações de apoio obtidas*

A partir das expressões apresentadas no subitem precedente verificou-se a distribuição de cargas para os apoios extremos e intermediário dos protótipos ensaiados. Conforme foi mencionado anteriormente, a flambagem local das partes comprimidas da fôrma afetam diretamente o cálculo do momento interno resistente que por sua vez

influencia no cálculo das reações de apoio R1 e R3. Uma vez que este fenômeno ocorreu em ambos os vãos da laje e em momentos distintos do ensaio, obteve-se valores de R1 e R3 para níveis de carga diferentes. Em alguns protótipos, as reações relativas a um dos apoios foram obtidas por extrapolação, a partir de um determinado nível de carga. Esta extrapolação baseou-se na diferença média entre os valores de R1 e R3 conhecidos até o referido nível de carga. A coerência deste procedimento foi verificada através das relações carga x flecha no meio do vão dos protótipos analisados. Apresenta-se a seguir uma análise desta distribuição através da curva reação de apoio x carga para as séries 2A e 2B, relativa a terceira etapa de carregamento.

### Série 2A

As relações entre as reações nos apoios extremos, obtidas como demonstrado anteriormente e através do cálculo elástico (valor teórico na figura), e a carga total aplicada para os protótipos P2S2A e P3S2A são mostradas na figura 5.22.

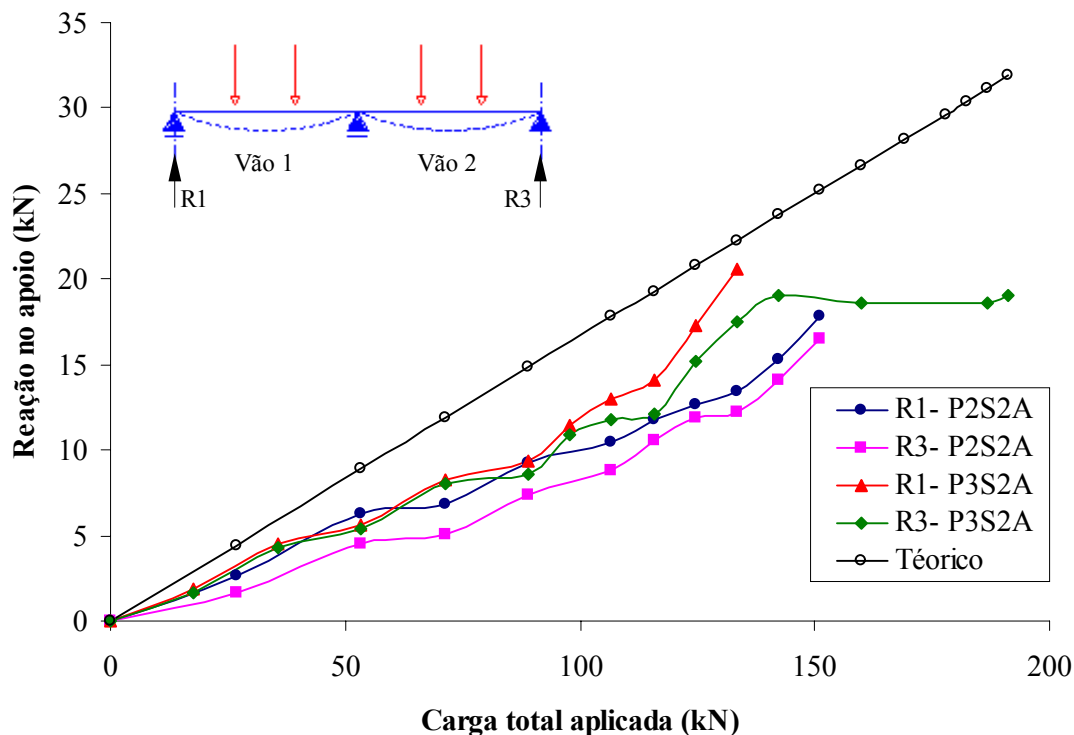


Figura 5.22 – Curva reação no apoio extremo x carga para os protótipos P2S2A e P3S2A (teórica e experimental).

Pode-se distinguir em ambos os protótipos dois trechos das curvas com inclinações diferentes. O primeiro trecho apresenta um crescimento aproximadamente linear das reações até cerca 115 kN para o protótipo P2S2A e 135 kN para o protótipo P3S2A. Observa-se ainda que a reação R1 do protótipo P2S2A alcança valores muito próximos aos das reações obtidas para o protótipo P3S2A. A reação R3 do protótipo P2S2A apresenta-se ligeiramente menor que as demais reações neste trecho. A partir daí, observa-se uma mudança na inclinação das curvas em todos os protótipos, onde as reações nos apoios passam a crescer mais em relação ao carregamento imposto. Em todos os protótipos os valores de reação são menores que o valor do cálculo elástico. Isto se deve ao fato de que no cálculo elástico das reações não é considerada a interação parcial entre a fôrma metálica e o concreto. No caso do protótipo P3S2A, identifica-se ainda na curva relativa ao apoio fixo um trecho final horizontal, onde a reação permanece constante em relação à carga aplicada, indicando que a capacidade das mossas em transferir o esforço de cisalhamento longitudinal que surge na interface aço/concreto foi esgotada.

Em relação ao protótipo P2S2A, a semelhança entre as curvas está coerente com o comportamento carga x flecha apresentado na figura 5.5. Uma vez que o vão 1 apresentou flechas maiores que o vão 2, é razoável que o apoio extremo do mesmo tenha absorvido uma parcela maior de carga.

A figura 5.23 apresenta a distribuição teórica e experimental de carga para o apoio intermediário dos protótipos P2S2A e P3S2A. Observa-se uma grande semelhança entre as curvas, com diferenças pequenas nos valores finais de R2 entre os protótipos. Uma vez que, para o mesmo nível de carga, as reações R1 e R3 são maiores no protótipo P3S2A, a reação no apoio intermediário deve ser menor. Observa-se também que a parcela de carga transmitida ao apoio intermediário foi maior que a parcela prevista pelo cálculo elástico, estando, portanto, coerente com a distribuição apresentada para os apoios extremos.

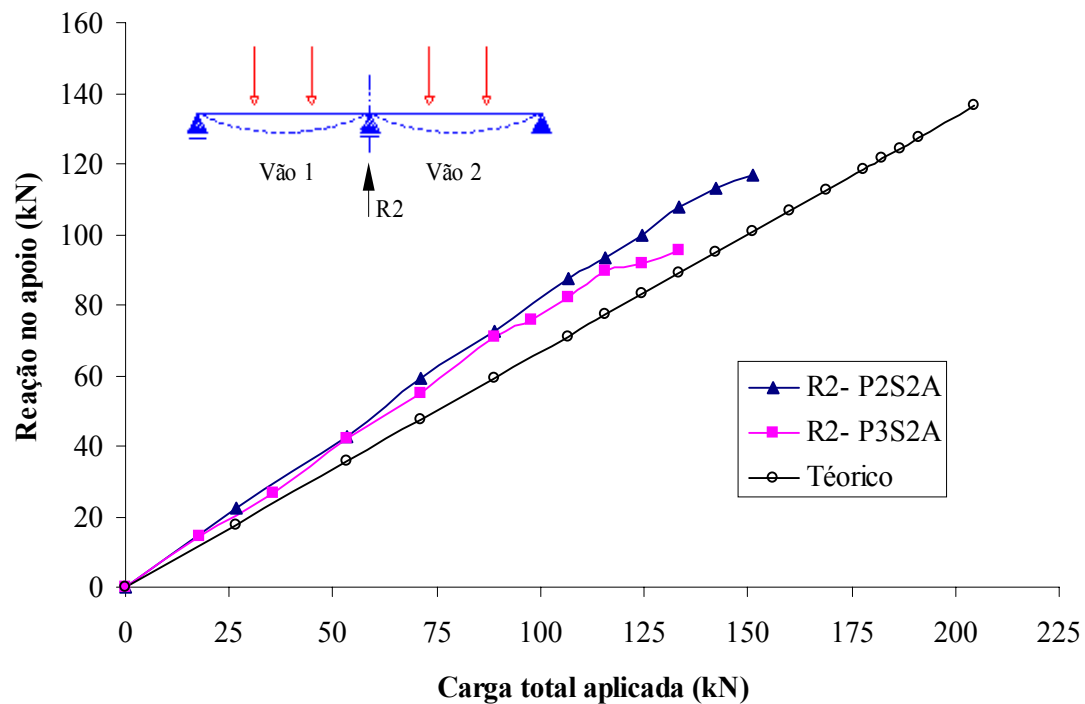


Figura 5.23 – Curva reação no apoio intermediário x carga para os protótipos P2S2A e P3S2A (teórico e experimental)

### Série 2B

A figura 5.24 mostra a relação teórica e experimental entre as reações nos apoios extremos e carga total aplicada para os protótipos P1S2B e P3S2B. No caso do protótipo P1S2B apresenta-se apenas a reação do apoio fixo extremo, uma vez que as deformações foram medidas apenas no vão 2.

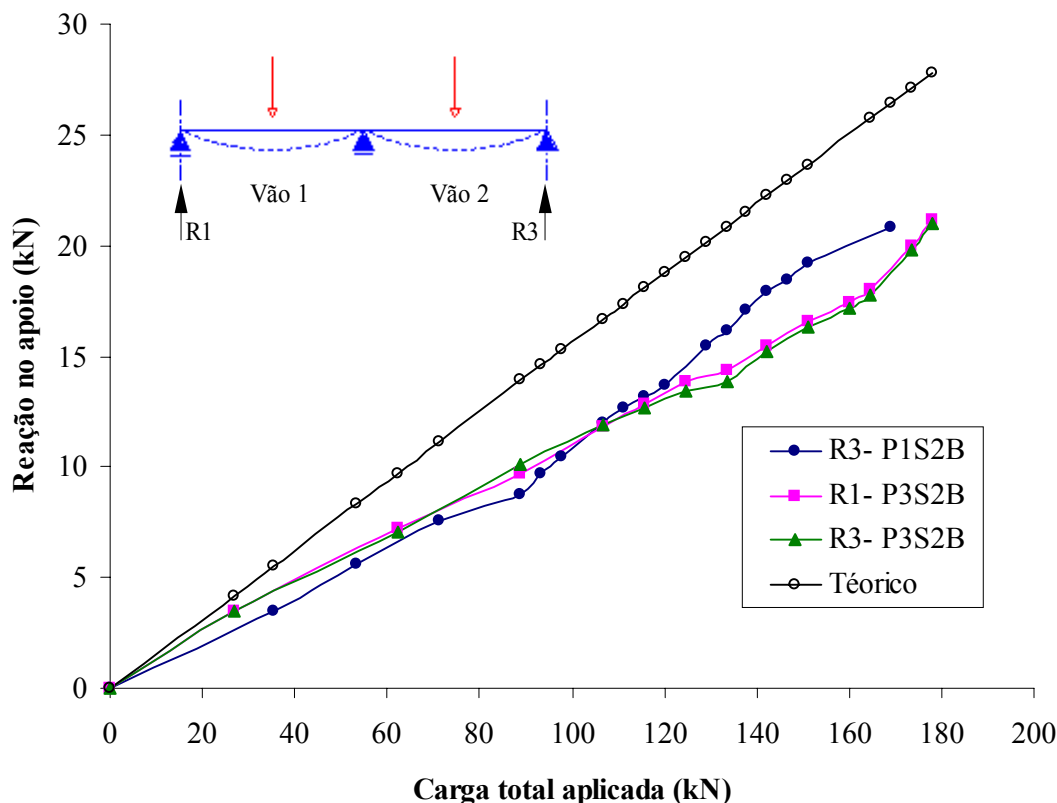


Figura 5.24 – Curva reação no apoio extremo x carga para os protótipos P1S2B e P3S2B.

Observa-se primeiramente que as curvas relativas ao protótipo P3S2B são praticamente coincidentes, indicado uma distribuição simétrica de cargas para os apoios extremos. Além disso, a relação entre as reações de apoio e carga aplicada é praticamente linear. Deve-se ressaltar que os valores de R3 acima de 133 kN de carga aplicada foram obtidos por extrapolação. Este procedimento é razoável se observarmos a relação carga x flecha no meio do vão mostrada na figura 5.12, onde os vãos do protótipo apresentam essencialmente o mesmo comportamento. Em relação ao protótipo P1S2B nota-se que a reação R3 apresenta praticamente os mesmos valores de reação do protótipo P3S2B até cerca de 125 kN. A partir daí, a diferença entre as curvas aumenta atingindo um valor máximo de 17%. Tal como na série 2A, a carga transmitida para os apoios extremos dos protótipos desta série foi inferior ao valor previsto pela teoria elástica, conforme indica a figura 5.24.



Embora os valores para  $R_1$  do protótipo P1S2B não tenham sido determinados, pelo aspecto da curva carga x flecha no meio do vão mostrado na figura 5.25, é razoável admitir que uma distribuição simétrica de cargas para os apoios extremos do referido protótipo tenha ocorrido.

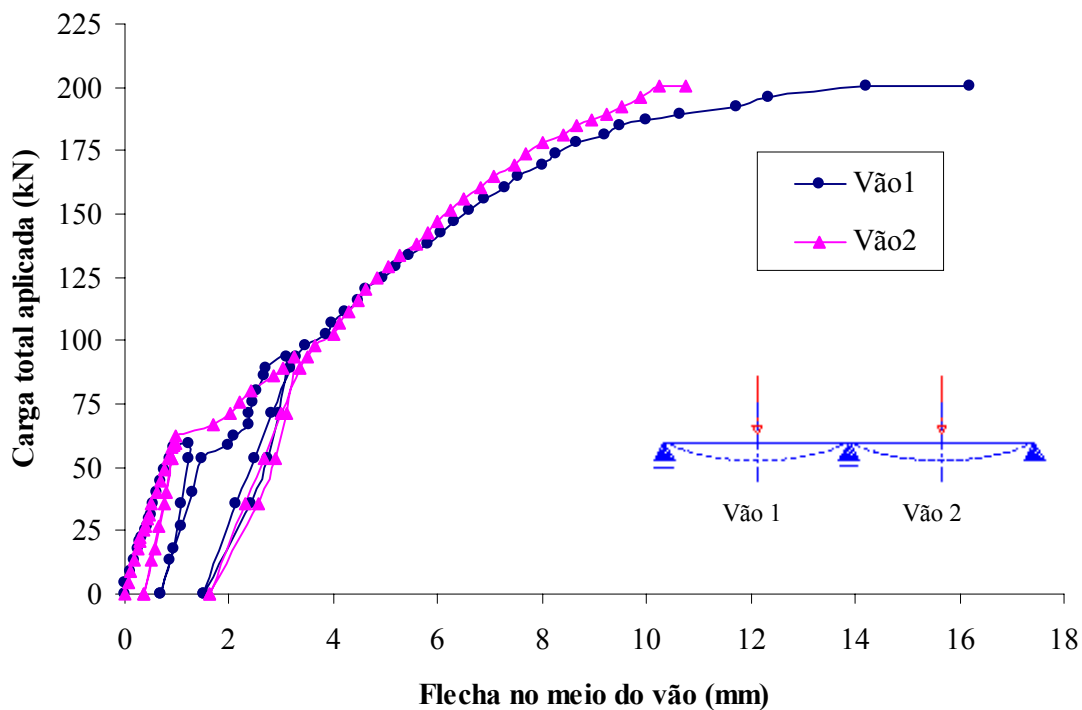


Figura 5.25 – Curva carga x flecha no meio do vão do protótipo P1S2B.

### *Resumo das reações de apoio*

A tabela 5.2 apresenta as reações de apoio e as cargas máximas correspondentes para os protótipos das séries 2A e 2B. Na tabela,  $R_1$  é a reação no apoio móvel extremo,  $R_2$  a reação no apoio intermediário e  $R_3$  a reação no apoio fixo extremo.

**Tabela 5.2 – Resumo das reações de apoio dos protótipos ensaiados**

Protótipo	Carga de ruptura (kN)	Cargas correspondentes ao cálculo das reações (kN)	Reações de apoio (kN)		
			R1	R2	R3
P1S2A	193,9	115,6	15,4	89,7	10,5
P2S2A	204,6	151,2	17,8	116,8	16,6 <sup>(1)</sup>
P3S2A	206,4	133,4	20,6	95,2	17,6
		191,2	-	-	19,0
P1S2B	187,0	169,0	-	-	20,8
P3S2B	177,9	177,9	21,2	135,7	21,0 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Valor obtido por extrapolação

Para os protótipos da série 2A foi possível determinar todas as reações para um nível de carregamento de no mínimo 60% da carga de ruptura (protótipo P1S2A). Apenas para protótipo P3S2A conseguiu-se determinar a reação do apoio fixo (R3) próximo da ruptura, sendo que o valor encontrado corresponde a uma carga aplicada igual a 93% (191,2 kN) da carga última.

Na série 2B, o protótipo P3S2B foi o único cujas três reações de apoio foram obtidas na ruptura. Os valores mostrados indicam uma distribuição simétrica da carga de ruptura deste protótipo.

A tabela 5.2 indica também que o apoio intermediário recebeu a maior parte do carregamento total aplicado na estrutura. A parcela de carga absorvida foi, em média, igual à 75% do carregamento aplicado. Este valor foi ligeiramente superior ao valor médio correspondente obtido pela teoria elástica (68%). Estes resultados revelam que as seções da laje na região do apoio interno tiveram uma grande capacidade de absorver momento fletor e por consequência foram capazes de transferir uma parcela significativa das cargas para o apoio interno. Porém, este fato não pode ser atribuído

somente à presença da armadura de continuidade, uma vez que a fôrma metálica e a tela soldada também eram contínuas.

### **5.3.5 Análise do modo de ruptura dos protótipos**

#### *Considerações iniciais*

Conforme mencionado no início deste capítulo, todos os protótipos testados apresentaram o mesmo modo de ruptura: colapso da ligação ao cisalhamento longitudinal combinado com escoamento da armadura de continuidade. Apresenta-se a seguir, uma análise mais detalhada deste modo de ruptura, a partir dos dados disponíveis para cada série de protótipos ensaiados.

#### *Série 2A*

A figura 5.26 mostra a relação momento x curvatura para seção mista situada abaixo da linha de carga extrema do vão 2 do protótipo P3S2A. Essa relação foi obtida para etapa final do ensaio. Observa-se inicialmente um crescimento na relação momento x curvatura para valores de momento de até 1100 kN.cm, correspondente a uma carga total aplicada de 142,3 kN. A partir deste ponto o momento permanece praticamente constante enquanto a curvatura cresce consideravelmente, conforme mostra o trecho horizontal da curva. Este fato indica a formação de uma rótula plástica nesta região. A formação desta rótula, contudo, não se deve à plastificação da seção mista, uma vez que ela surge em decorrência do colapso na ligação da interface aço-concreto.

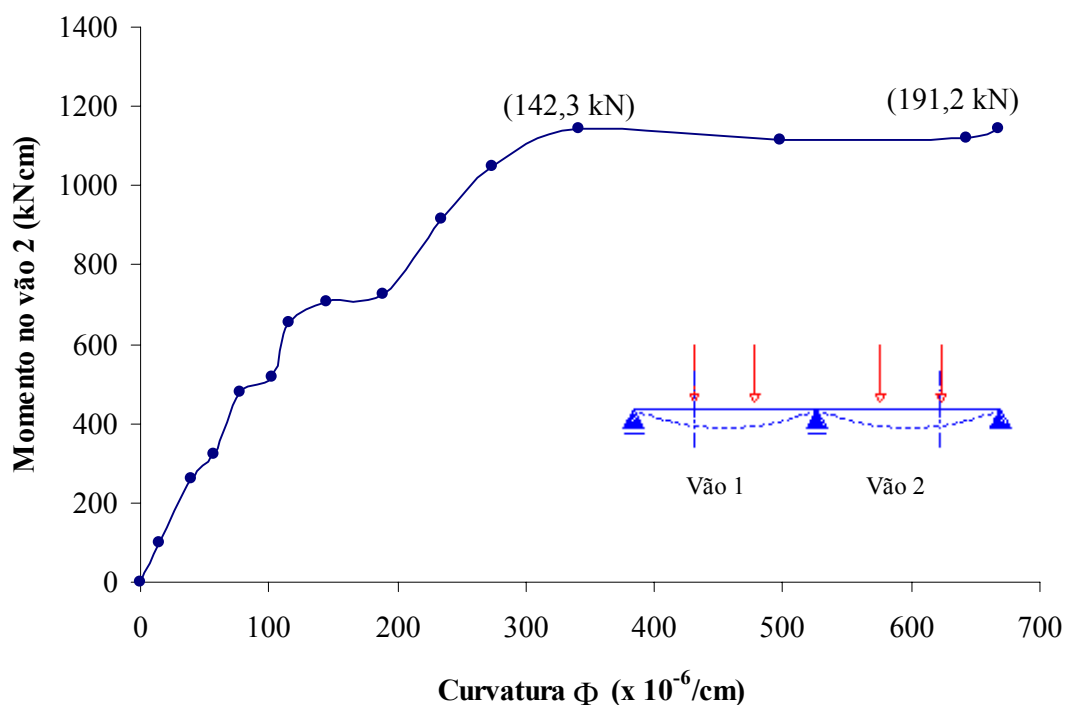


Figura 5.26 – Curva momento x curvatura do vão 2 do protótipo P3S2A

Embora a relação momento x curvatura para o vão 1 do protótipo P3S2A não possa ser determinada, acredita-se que o mesmo apresentou um comportamento muito similar ao do vão 2. O fato de surgirem rótulas nos vãos não implica no esgotamento total da capacidade portante da laje. Após a formação de tais rótulas, a laje comporta-se como uma estrutura com dois balanços, onde a rigidez à rotação proporcionada pela continuidade da laje permite que a mesma resista a novos acréscimos de carga. A figura 5.27 mostra a relação carga aplicada x curvatura na região do apoio intermediário e ilustra este fato. Observa-se que do instante em que surgiu a rótula no vão 2 (142,3 kN) até próximo da ruptura da laje (191,2 kN), o acréscimo no carregamento imposto foi considerável. O esgotamento da capacidade de carga da laje na região do apoio intermediário se dá, ao final do ensaio, pelo escoamento tanto da armadura de continuidade quanto da tela soldada. Apesar destas armaduras terem escoado, o gráfico do protótipo P3S2A não permite verificar a formação de uma rótula na região do apoio intermediário.

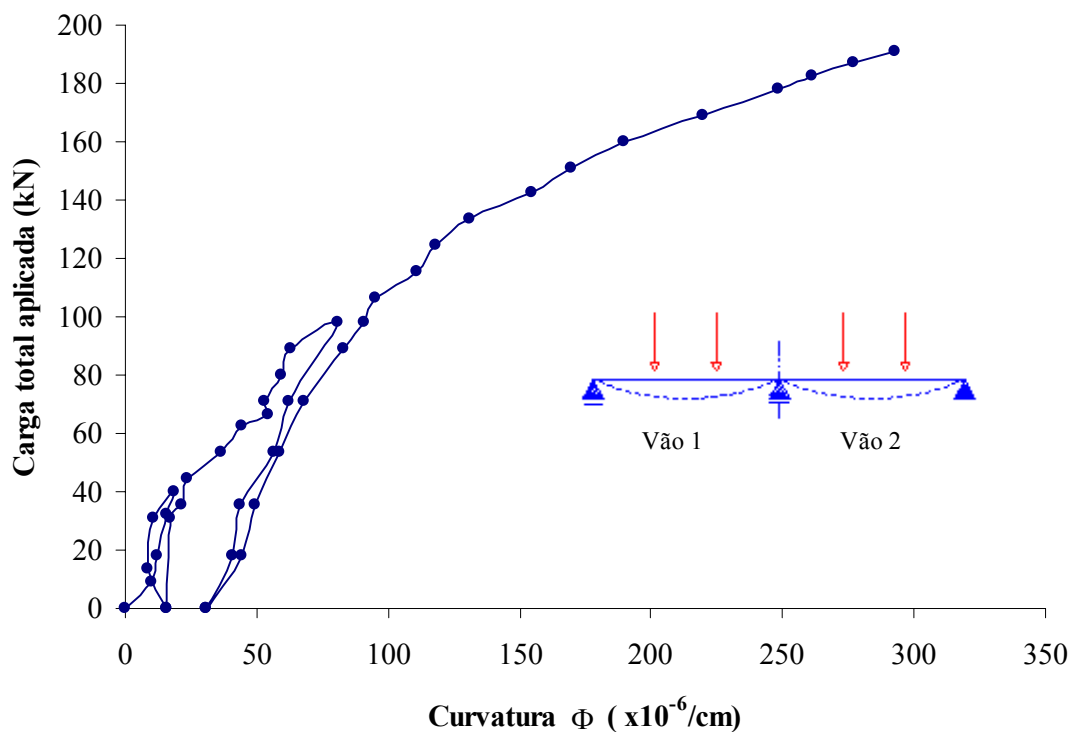


Figura 5.27 – Curva carga total aplicada x curvatura na região do apoio intermediário do protótipo P3S2A

Entretanto, para o protótipo P2S2A, a formação de uma rótula plástica na região do apoio interno pode ser vista na figura 5.28 através do trecho horizontal ao final da curva carga total aplicada x curvatura.

Com base no exposto anteriormente, pode-se dizer que o modo de ruptura apresentado pelos protótipos desta série foi devido aos dois fatores. Primeiramente o colapso da ligação ao cisalhamento longitudinal nas extremidades da laje provocou o surgimento de rótulas nos vãos. Posteriormente, devido ao escoamento da armadura e da tela soldada, uma rótula plástica se formou na região do apoio interno.

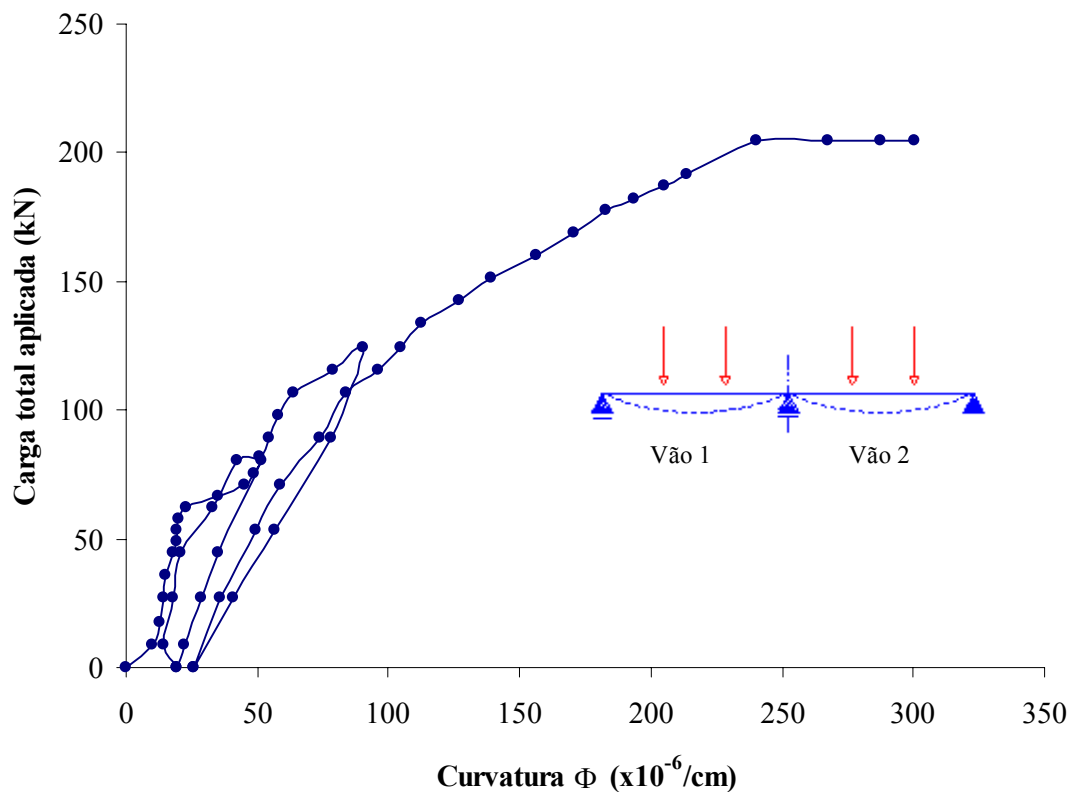


Figura 5.28 – Curva carga total aplicada x curvatura na região do apoio intermediário do protótipo P2S2A.

### Série 2B

A exemplo dos protótipos da série anterior, o modo de ruptura dos protótipos da série 2B foi devido a combinação do colapso da ligação ao cisalhamento longitudinal com o escoamento da armadura de continuidade. Entretanto a seqüência em que esses dois fatores ocorreram não foi a mesma para todos os protótipos.

A figura 5.29 mostra a relação momento x curvatura no vão 2 do protótipo P1S2B. Observa-se que o momento no vão cresce com a curvatura para valores de momento de até 1800 kNcm (correspondente a 165 kN de carga total aplicada), a partir

daí o momento é praticamente constante. Este fato sugere a formação de uma rótula devido ao colapso da ligação ao cisalhamento na interface aço/concreto.

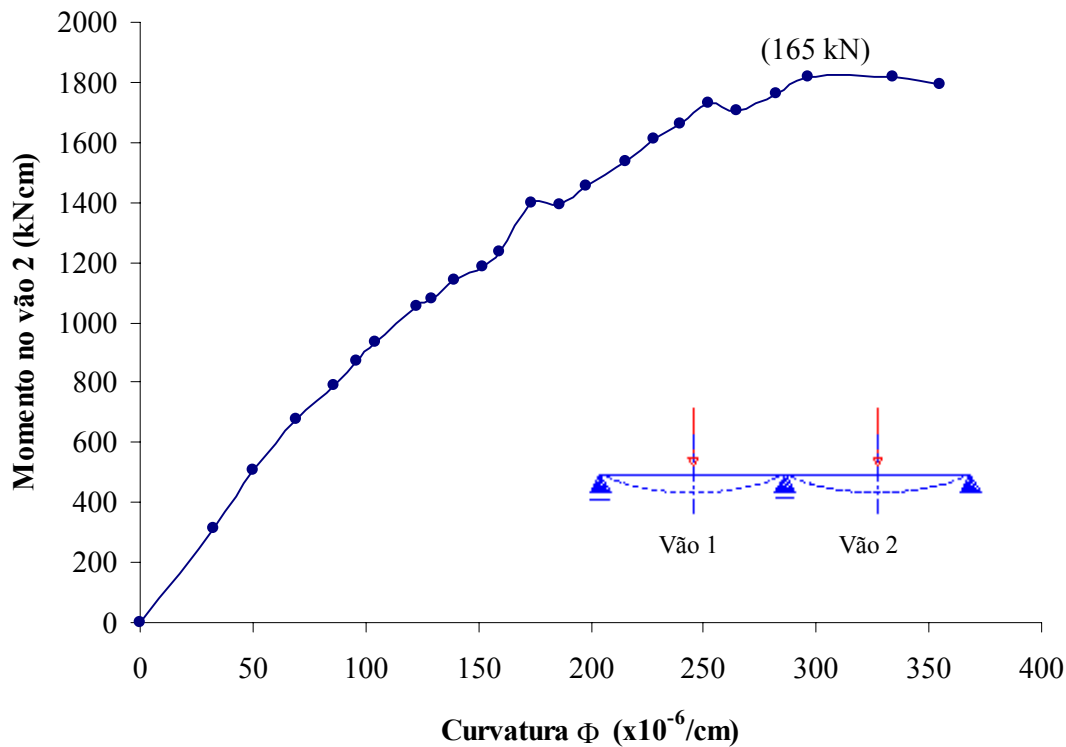


Figura 5.29 – Curva momento x curvatura no vão 2 do protótipo P1S2B

O escoamento da armadura de continuidade na região do apoio intermediário se deu para um valor de carga maior como mostra a figura 5.19. O escoamento desta armadura propiciou a formação de uma rótula plástica na região do apoio interno ao final do ensaio, quando se observou também a ruptura da tela soldada. Portanto o modo de ruptura foi caracterizado pelo colapso da ligação ao cisalhamento longitudinal seguido do escoamento da armadura de continuidade.

A figura 5.30 mostra a relação momento x curvatura no vão 1 do protótipo P3S2B.

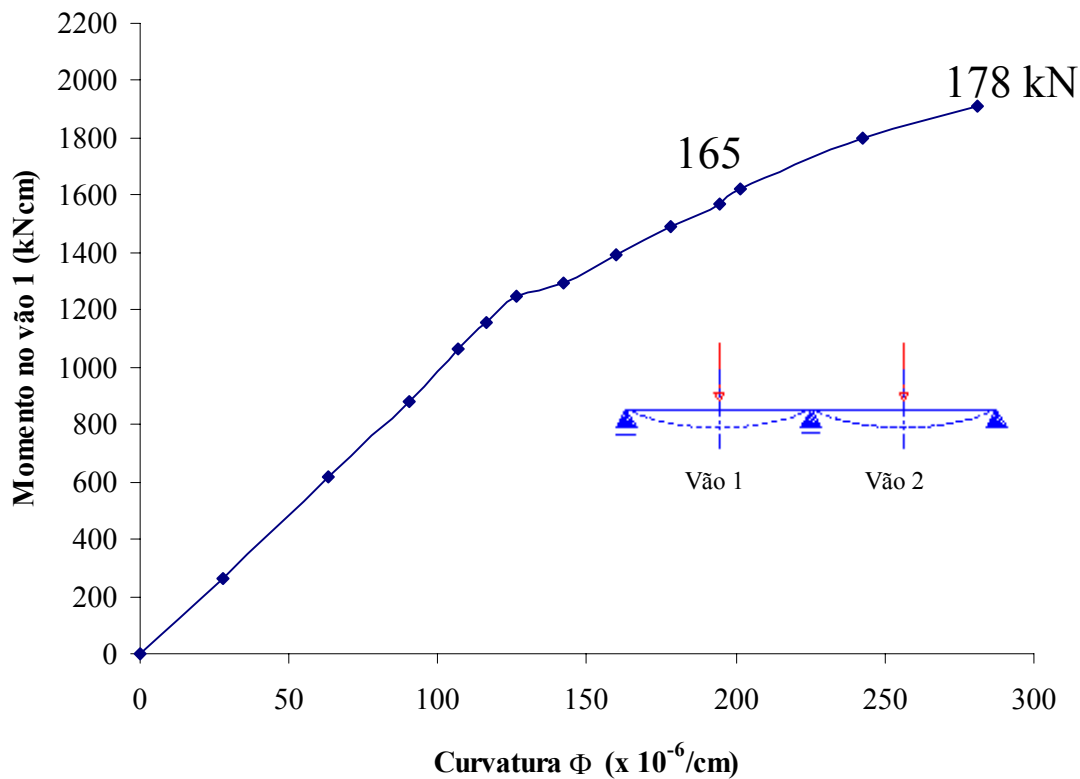


Figura 5.30 – Curva momento x curvatura no vão 1 do protótipo P3S2B

Observa-se um comportamento bastante linear até o valor de momento próximo a 1250 kNcm. A carga aplicada na estrutura neste instante correspondia ao início do processo de fissuração da região do apoio interno, isto é, 124 kN. A partir daí nota-se uma mudança de inclinação da curva, onde a curvatura passa a crescer mais em relação ao momento no vão. Contudo, diferentemente do protótipo P1S2B, a relação momento x curvatura não indica a formação de uma rótula em decorrência do colapso da ligação ao cisalhamento longitudinal na interface aço/concreto.

A figura 5.31 mostra a relação momento x curvatura na região do apoio interno do protótipo P3S2B. O momento no apoio interno, neste caso, foi obtido a partir da reação de apoio R3 e da carga aplicada no vão.



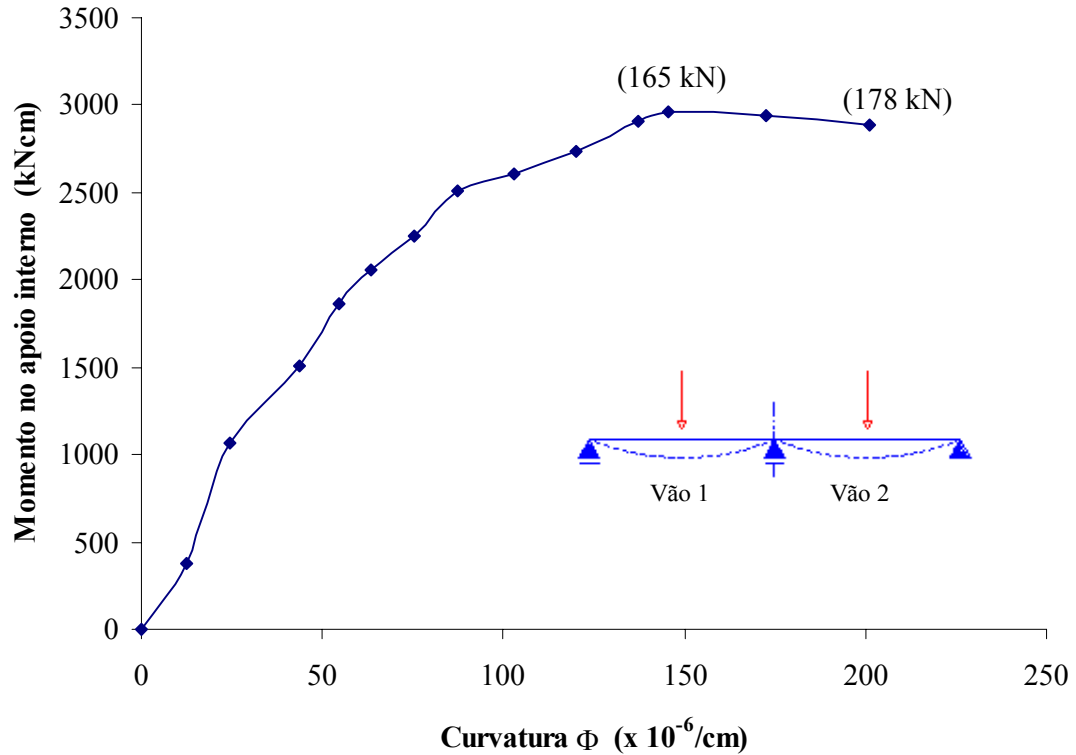


Figura 5.31 – Curva momento x curvatura no apoio interno do protótipo P3S2B

Observam-se as sucessivas mudanças na inclinação da curva, caracterizando uma perda progressiva de rigidez na região do apoio interno em decorrência do desenvolvimento do processo de fissuração do concreto. Para cargas acima de 165 .kN, a relação momento x curvatura se torna horizontal indicando a formação de uma rótula plástica na região, em consequência do escoamento da armadura de continuidade.

Pode-se constatar, portanto, que para os protótipos P2S3B e P3S2B o escoamento da armadura de continuidade se deu primeiro. Posteriormente, ocorreu o colapso ao cisalhamento longitudinal da interface aço-concreto.

## **Capítulo 6**

### **Análise comparativa com o sistema de lajes mistas simplesmente apoiado**

#### **6.1 Introdução**

Este capítulo tem por objetivo identificar os aspectos principais que diferenciam o comportamento do sistema de lajes mistas contínuas em relação ao sistema simplesmente apoiado. Para isso desenvolveu-se um estudo comparativo utilizando os resultados apresentados no capítulo anterior para os protótipos das séries 2A e 2B e os obtidos para os protótipos 2 e 5 de mesmas características (tabelas C7 e C8 do apêndice C) analisados por Melo [9]. Os protótipos da série 2A correspondem ao protótipo 2, enquanto os da série 2B correspondem ao protótipo 5. A comparação se baseou nos comportamentos carga no vão x flecha no meio do vão, carga no vão x deslizamento relativo no apoios e esforço cortante x deslizamento relativo para a série 2A. Para os protótipos da série 2B foram utilizadas as relações esforço cortante x deslizamento relativo.

#### **6.2 Série 2A x protótipo 2**

Através da comparação entre os protótipos da série 2A e o protótipo 2, cujo esquema se encontra na figura 6.1, foi possível estabelecer as diferenças principais no comportamento do sistema de lajes mistas, considerando-se o vão de extremidade contínuo ou simplesmente apoiado.

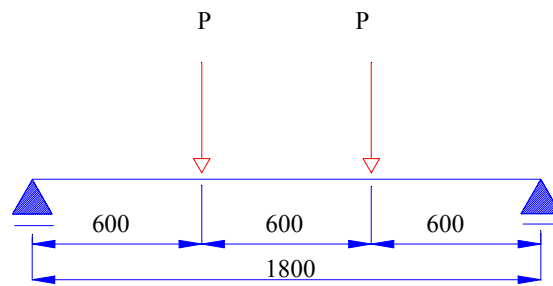


Figura 6.1 – Esquema do protótipo 2

O comportamento carga no vão x flecha no meio do vão pode ser visualizado através do gráfico da figura 6.2, onde estão apresentadas a curva correspondente ao vão 1 da laje contínua P1S2A e ao protótipo 2 simplesmente apoiado.

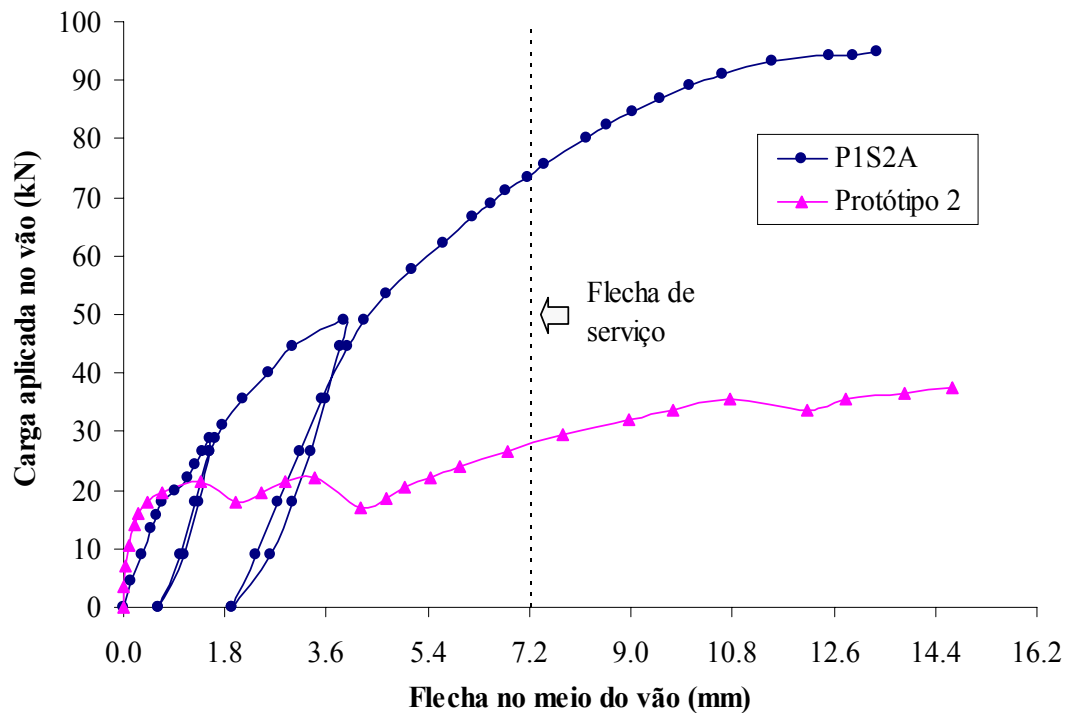


Figura 6.2 – Curva carga no vão x flecha no meio do vão dos protótipos 2 e P1S2A

O comportamento inicial dos dois protótipos foi bastante similar. Após a fissuração, a rigidez do protótipo 2 se reduz significativamente e sucessivas

acomodações de carga ocorrem. Neste instante inicia-se a fase de interação parcial entre a fôrma metálica e o concreto e a transferência do fluxo de cisalhamento passa a ser proporcionada somente pelas mossas que impedem que a laje perca sua capacidade resistente imediatamente. A estrutura esgota sua capacidade de carga quando as mossas perdem por completo a eficiência em transmitir o cisalhamento. A perda de rigidez após a fissuração no vão 1 do protótipo P1S2A, por sua vez, é bem menor e nenhuma queda subsequente no carregamento foi registrada. A presença da armadura e a continuidade da tela soldada e fôrma metálica restringem consideravelmente a rotação da extremidade interna da laje, diminuindo os deslocamentos no meio do vão. A diferença na rigidez entre os dois protótipos é tal que, para a carga última resistida pela laje simplesmente apoiada, a flecha correspondente na laje contínua representa apenas 17% do valor final atingido pela mesma.

O limite estabelecido pelo Eurocode 4 [1] para a flecha de serviço máxima (7,2 mm) é alcançado pelo protótipo 2 para uma carga de 27,75 kN ou 74 % da carga de colapso. No protótipo P1S2A, a flecha limite no meio do vão é atingida para uma carga de 73,4 kN ou 78% da carga última aplicada ao vão 1. Entretanto, observa-se que, para a flecha no meio do vão na estrutura contínua atingir o limite de serviço é necessário aplicar uma carga equivalente a 2,6 vezes a carga correspondente à da laje simplesmente apoiada.

Apesar de ter sido observado a ruptura da ligação concreto-perfil metálico (cisalhamento longitudinal) tanto nas lajes da série 2A quanto no protótipo 2, as magnitudes das cargas máximas foram bem distintas. O valor da carga média última aplicada em cada um dos vão dos protótipos da série 2A (100,81 kN) foi 170 % maior que o valor obtido no protótipo 2 (37,36 kN), o que sugere um aumento significativo na capacidade portante das lajes contínuas.

A variação do deslizamento relativo ao longo do carregamento no apoio extremo das lajes está mostrada na figura 6.3.

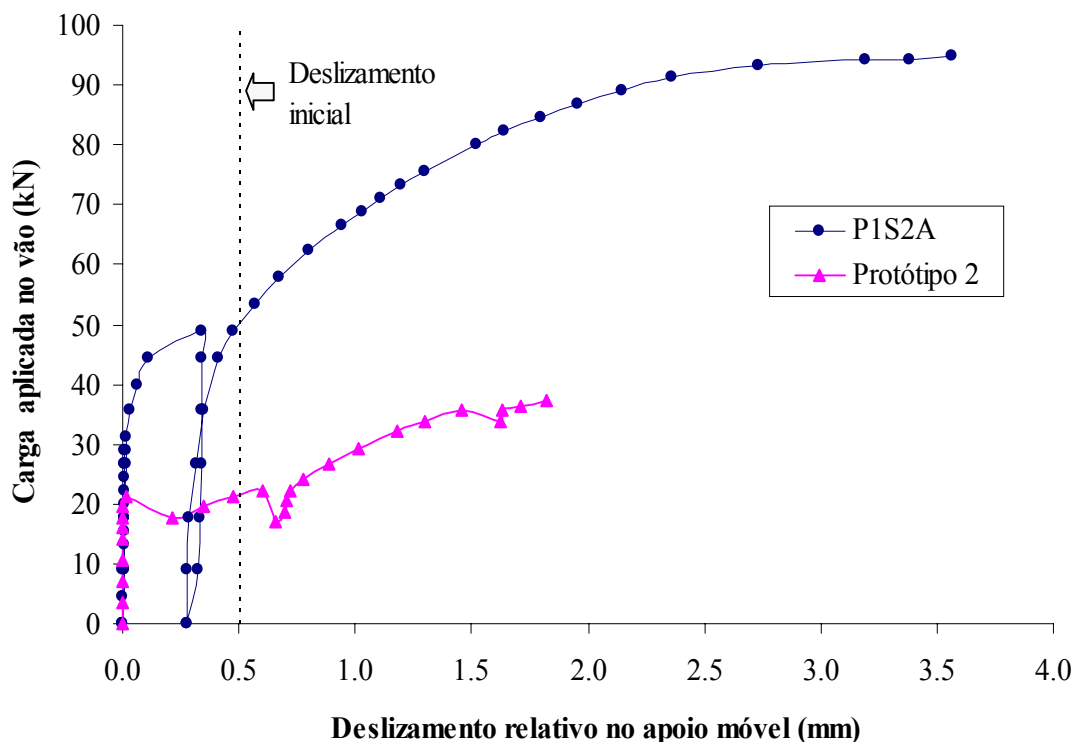


Figura 6.3 – Curva carga no vão x deslizamento relativo de extremidade dos protótipos 2 e P1S2A.

Observa-se primeiramente que o início do deslizamento relativo entre o concreto e o perfil de aço ocorreu para valores de carga no vão bastante distintos. No protótipo 2 este valor foi pouco maior que 20 kN enquanto que na laje P1S2A o início de deslizamento relativo foi registrado próximo aos 50 kN, após o surgimento de fissuras na região do apoio interno. Verifica-se também que no protótipo simplesmente apoiado o aumento inicial do deslizamento foi expressivo, diferentemente da laje contínua onde ele foi mais gradual. A partir daí, o deslizamento relativo aumenta, em ambas as lajes, com o acréscimo de carga até que a eficiência das mossas em transmitir o cisalhamento longitudinal seja esgotada. Portanto a continuidade do vão faz com que o deslizamento de extremidade só comece após a fissuração no apoio interno e não após a quebra da aderência química entre o aço e o concreto na região do vão, além de permitir também um elevado valor de deslizamento relativo de extremidade ao final do ensaio sem perda de carga.

A figura 6.3 indica também que todas as lajes estudadas apresentaram comportamento dúctil de acordo com os critérios do Eurocode 4 [1]. Porém a relação entre a carga de ruptura e a carga relativa ao deslizamento inicial de extremidade ou deslizamento de serviço foi bem diferente entre o protótipo 2 (82%) e P1S2A (55%).

A figura 6.4 ilustra a variação do deslizamento relativo de extremidade em relação ao esforço cortante no apoio extremo do vão 1 dos protótipos da série 2A, no decorrer da terceira etapa de carregamento, e do protótipo 2. Observa-se que as curvas relativas aos protótipos com vãos contínuos apresentam trechos iniciais quase verticais, onde o deslizamento varia muito pouco com o esforço de cisalhamento. Estes trechos correspondem à fase de recarregamento da estrutura nos quais a aderência química na interface aço-concreto no vão não mais existe e os valores de carga estão abaixo do valor que provocou a fissuração na região do apoio do interno.

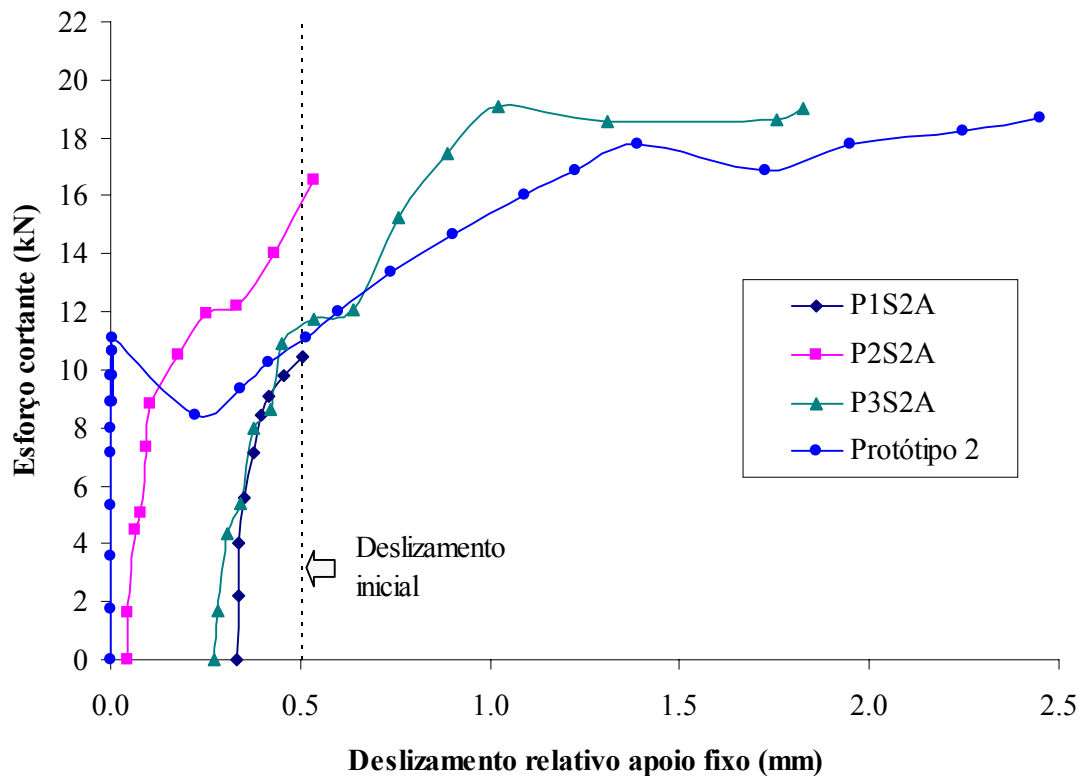


Figura 6.4 – Curva esforço cortante x deslizamento relativo de extremidade no apoio fixo dos protótipos da série 2A e do protótipo 2.

O aumento do deslizamento de extremidade nos protótipos com vãos contínuos ocorreu para valores próximos de 10 kN de esforço cortante. Esta carga também marcou o início do deslizamento no protótipo simplesmente apoiado. Este fato sugere que o início do deslizamento se dá para valores praticamente iguais de esforço cortante no apoio extremo, porém para valores de carga no vão bastante distintos. A partir daí a maior inclinação das curvas dos protótipos com vãos contínuos em relação a curva do protótipo 2, revela que a degradação da aderência mecânica na interface aço-concreto ocorreu mais lentamente. O esforço cortante total transferido para o apoio fixo destes protótipos foi, contudo, praticamente o mesmo em relação ao protótipo 2 (19 kN contra 18,7 kN) ao final do ensaio. Apesar de apenas a curva do protótipo P3S2A estar completa, as curvas desta série apresentam inclinações praticamente iguais e exibem a mesma tendência de crescimento do deslizamento em relação ao esforço cortante.

A perda total da aderência mecânica entre os dois materiais pode ser notada através do trecho horizontal da curva relativa ao protótipo P3S2A. A partir de um determinado valor de deslizamento – cerca de 1,0 mm - o esforço cortante praticamente não cresce e a laje de concreto desliza consideravelmente até a ruptura do protótipo. No protótipo 2, este comportamento pode ser notado a partir 1,5 mm de deslizamento.

Conforme visto na revisão da literatura, o Eurocode 4 [1] permite no cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal dos apoios extremos de lajes contínuas uma alteração no fator equivalência de vãos. A alteração permitida é uma redução de 10% no comprimento do vão isostático utilizado para determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal. Esta redução por sua vez produz um aumento na resistência ao cisalhamento de 11%. Apesar deste valor ser ligeiramente superior ao encontrado neste estudo pode-se dizer que o procedimento adotado pelo EUROCODE 4 é corroborado pelos resultados encontrados.

### 6.3 Série 2B x protótipo 5

A figura 6.5 mostra esquema estático relativo ao protótipo 5 utilizado na comparação com os protótipos da série 2B.

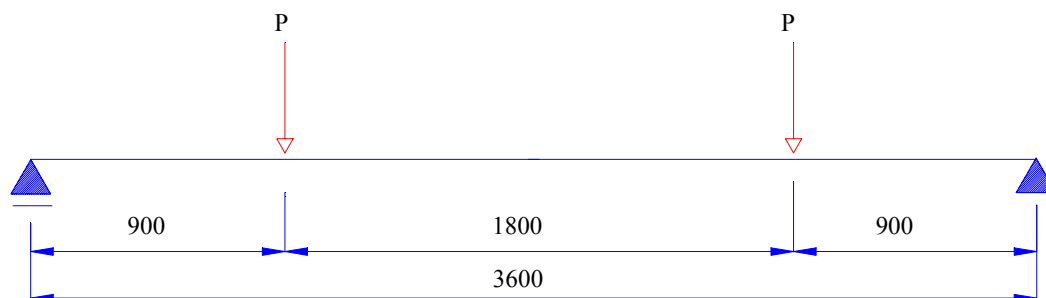


Figura 6.5 – Esquema do protótipo 5.

A figura 6.6 mostra a relação esforço cortante x deslizamento relativo de extremidade para o apoio extremo dos protótipos P1S2B, P3S2B e protótipo 5. Observa-se que, tal como na série 2A, as curvas relativas aos protótipos P1S2B e P3S2B apresentam trechos iniciais quase verticais, com variações muito reduzidas do deslizamento em relação ao esforço de cortante. Vale lembrar que esses trechos correspondem à fase de recarregamento da estrutura nos quais a aderência química na interface aço-concreto no vão não mais existe, sendo a resistência ao cisalhamento longitudinal dada apenas pela aderência mecânica das mossas e pelo atrito. A figura mostra também que o início do deslizamento relativo ocorreu para valores de esforço cortante praticamente iguais (10 kN) tanto no protótipo P1S2B quanto no protótipo 5 simplesmente apoiado. No protótipo P3S2B, este fato se deu para um esforço cortante um pouco maior: 12 kN aproximadamente. A partir deste instante nota-se a mesma tendência linear de crescimento dos deslizamentos com o aumento do esforço cortante em todos os protótipos. As inclinações, entretanto são diferentes, indicando que a degradação da aderência mecânica proporcionada pelas mossas processa-se diferentemente em cada protótipo, sendo mais lenta nas lajes contínuas em função da maior rigidez.



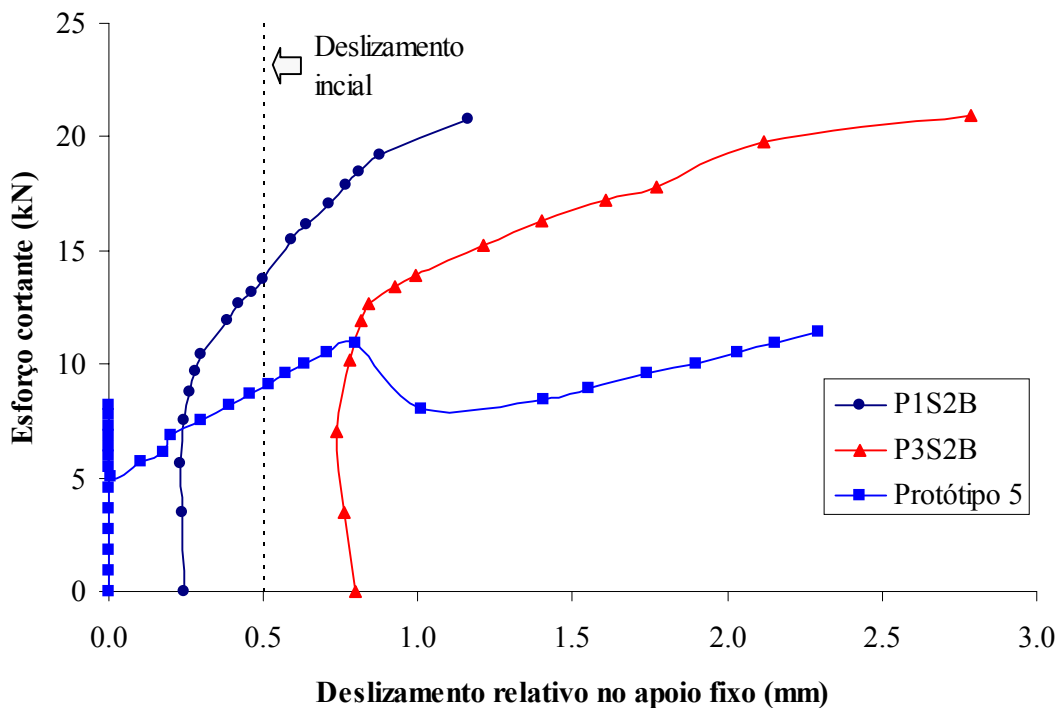


Figura 6.6 – Curva esforço cortante x deslizamento relativo de extremidade no apoio fixo dos protótipos P1S2B, P3S2B e 5.

Embora o gráfico da figura 6.6 indique claramente uma maior capacidade em absorver esforço cortante dos apoios de extremidade dos protótipos P1S2B e P3S2B em relação ao protótipo 5, esta não pode ser atribuída somente a continuidade da laje uma vez que os vãos dos protótipos contínuos correspondiam à metade do vão do protótipo 5. Tal diferença entre vãos constitui um parâmetro que influencia diretamente a rigidez da laje mista e não pode ser desprezado.

## Capítulo 7

### Conclusões e recomendações

#### 7.1 Introdução

Ao término desse trabalho, pode-se dizer que o objetivo principal foi atingido. Tal objetivo consistiu em avaliar, experimentalmente, o comportamento e a resistência do sistema de lajes mistas com fôrma metálica incorporada considerando-se o efeito da a continuidade dos vãos.

Seis protótipos em escala natural, com vãos duplos simétricos e contínuos sobre um apoio interno foram construídos e ensaiados até ruptura. Os protótipos foram submetidos a um carregamento simétrico, sendo efetuado três ciclos de carregamento até a ruptura. A continuidade estrutural foi assegurada pela presença de uma armadura negativa, além da continuidade da fôrma metálica e da tela soldada sobre o apoio interno. O cálculo da armadura negativa foi feito a partir dos resultados obtidos para protótipos simplesmente apoiados, considerando um comportamento dúctil das seções sobre o apoio intermediário de acordo com as prescrições da NBR 6118 [13]. A análise dos resultados se baseou nas relações carga x flecha no meio do vão, carga x deslizamento relativo de extremidade e carga x deformações nas barras e no perfil de aço. Realizou-se, ainda, uma análise comparativa dos resultados obtidos com lajes ensaiadas na condição de simplesmente apoiadas.

Com base nos resultados obtidos e na análise dos mesmos apresentam-se a seguir as conclusões do trabalho. Algumas recomendações são apresentadas ao final deste capítulo, com o intuito de orientar estudos futuros, visto que muito ainda precisa

ser compreendido sobre o comportamento do sistema de lajes mistas contínuas. Espera-se com isto motivar a realização de mais estudos sobre o tema.

## 7.2 Conclusões

A melhoria no desempenho global do sistema de lajes mistas devido a continuidade foi comprovada pelo aumento da rigidez e da capacidade portante das lajes. A análise dos resultados revelou um comportamento dúctil dos protótipos. A comparação com os protótipos simplesmente apoiados, de mesmas características, revelou um aumento médio de 170% na capacidade portante das lajes mistas.

Em todos os casos, o modo de ruptura observado para os protótipos testados foi devido à combinação de cisalhamento longitudinal com escoamento da armadura negativa. A capacidade última das lajes se deu pela perda da aderência mecânica entre a fôrma metálica e o concreto nas regiões próximas aos apoios extremos combinada com a incapacidade das seções da laje na região do apoio interno em absorver acréscimos de momento fletor após o escoamento da armadura de continuidade.

As regiões do vão exibiram um comportamento similar ao observado nas lajes simplesmente apoiadas. Verificou-se a formação de fissuras verticais principais abaixo das linhas externas de carga em cada vão. Porém, o efeito da continuidade retardou o surgimento do deslizamento relativo entre a fôrma metálica e a laje de concreto e conseqüentemente da interação parcial entre os dois materiais, característico deste sistema de lajes mistas. A interação parcial foi também comprovada pela inversão da deformação medida na parte superior da fôrma metálica nas proximidades das linhas de carga extremas. Esta deformação passou de tração para compressão indicando o surgimento de uma segunda linha neutra abaixo do topo da fôrma metálica. A continuidade dos vãos, contudo, não alterou a capacidade de carga das seções extremas da laje mista. Tanto nos protótipos com vãos contínuos quanto nos protótipos com vão simples, as seções de extremidade das lajes absorveram praticamente a mesma quantidade de carga vertical.

A capacidade de transferir carga para os apoios extremos parece estar condicionada a uma faixa de valores de deslizamento relativo de extremidade, a partir da qual esta capacidade se esgota. A faixa de valores de deslizamento relativo parece estar entre 1 e 2 mm.

Apesar dos poucos dados coletados, o comportamento das seções na região do apoio interno foi semelhante ao de lajes convencionais de concreto armado. O modo de fissuração observado é uma indicação significativa deste comportamento. Pode-se constatar que a armadura, a tela soldada e a forma metálica contribuem efetivamente no enrijecimento desta região. A armadura e tela soldada, contudo, foram mais solicitadas. O escoamento da armadura comprovou a ductilidade das seções da região. A capacidade de transferência de carga da laje na região do apoio intermediário foi sempre muito superior à das extremidades. O apoio interno absorveu em média 75% da carga total aplicada, sendo este valor ligeiramente maior que o previsto pelo cálculo elástico.

O procedimento utilizado no dimensionamento de armaduras em lajes convencionais de concreto mostrou ser adequado e seguro para emprego no sistema de lajes mistas. Tal fato foi comprovado uma vez que a resistência alcançada por cada série ensaiada ter sido sempre superior à respectiva resistência prevista pelo dimensionamento. Deve-se, contudo, lembrar que a continuidade da fôrma e principalmente da tela soldada não foram consideradas nos cálculos.

O processo utilizado na determinação das reações nos apoios de extremidade mostrou-se limitado devido à ocorrência da flambagem local dos elementos comprimidos da fôrma metálica. Tal limitação impossibilitou a determinação completa das reações de apoio para todos os protótipos na ruptura.

Para fins de dimensionamento prático, propõe-se o seguinte modelo de cálculo para lajes mistas que possuam as mesmas características e condição de carregamento dos protótipos avaliados neste trabalho. O ponto de partida do modelo é a utilização, nos apoios extremos da laje, do valor do esforço cortante de serviço determinado pelo método semi-empírico *m e k* para esta mesma laje mista na condição de simplesmente

apoiada. Com este valor do esforço cortante, o momento atuante na região do apoio interno deverá ser calculado com base numa análise elástica da estrutura. A armadura de continuidade será avaliada a partir deste momento empregando-se para tal os procedimentos usuais para dimensionamento à flexão simples de seções em concreto armado, observando sempre os critérios necessários para se garantir um comportamento dúctil das seções.

Com base nos aspectos mencionados, parece muito claro que o uso da continuidade no projeto de lajes mistas constitui uma solução estrutural mais eficiente em relação ao sistema simplesmente apoiado normalmente utilizado. Uma vez que na prática, geralmente, a laje mista cobre vários vãos e que existe uma continuidade natural sobre os apoios intermediários da tela soldada e, em algumas situações, da fôrma metálica, seria necessário especificar apenas a armadura. Esta armadura poderia ser composta de barras isoladas, como realizado neste trabalho, ou na forma de tela soldada, o que facilitaria o processo construtivo. Evidentemente, cuidados no posicionamento da armadura deve ser adotados a fim de se alcançar a eficiência estrutural desejada.

Um aspecto muito importante ao se considerar a continuidade estrutural do sistema de lajes mistas está na relação custo/benefício. A utilização de uma armadura sobre os apoios internos constitui, muito provavelmente, a solução mais econômica em relação ao aumento da espessura do perfil metálico ou da altura da laje ou ainda à combinação destas duas soluções, quando se necessita de uma maior rigidez ou capacidade de carga em lajes mistas. A presença desta armadura auxiliaria, também, em muito os mecanismos de resistência da laje em situação de incêndio.

### **7.3 Recomendações para estudos futuros**

A fim de se conhecer com mais profundidade a influência da continuidade no comportamento estrutural das lajes mistas, recomenda-se a realização de estudos e ensaios que envolvam protótipos fabricados com perfis metálicos de diferentes espessuras e formas de seção transversal. Lajes com diferentes relações vão de cisalhamento – altura total poderiam também ser analisadas. O uso combinado de conectores de cisalhamento nos apoios extremos com a armadura sobre o apoio intermediário deveria também ser avaliado.

Uma vez que o comportamento da região do apoio interno é influenciado pela presença da armadura e pela continuidade da fôrma metálica e da tela soldada, recomenda-se também, o estudo da contribuição isolada de cada um destes elementos sobre o momento resistente. Atenção especial deve ser dada à contribuição isolada da tela soldada, uma vez que a mesma está sempre presente. A quantificação da contribuição de cada um destes elementos, com certeza, irá proporcionar um aproveitamento mais racional da continuidade dos vãos.

Sugere-se também a avaliação do comportamento e da resistência do sistema de lajes mistas contínuas com um diferente número e comprimento dos vãos. A consideração de outras condições de carregamento, como, por exemplo, cargas em vãos alternados poderá revelar uma condição mais crítica de trabalho da estrutura.

Finalmente, acredita-se que os estudos acima recomendados são indispensáveis para a proposição de uma metodologia abrangente de cálculo aplicável ao sistema de lajes mistas contínuas.

## Referências bibliográficas

- [1] EUROCODE 4: EN 1994 - **Design of composite steel and concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings**. European Committee for Standardization, Draft No. 2., 2000.
- [2] ROEDER, C. W. **Point loads on composite deck-reinforced slabs**. *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 107, No. ST12, p.2421-2429, December 1981.
- [3] PATRICK, M. **Design of continuous composite slabs – The issue of ductility**. In: *Steel Construction, Journal of the Australian Institute of Steel Construction*, Vol. 23, No. 3, p. 2-10, August 1989.
- [4] DANIELS, B. J., O'LEARY, D.C., CRISINEL, M. **Testing of continuous composite slabs with HIBOND 55 profiled sheeting**. *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*, Mars 1990 (Publication ICOM 229).
- [5] DANIELS, B. J. **Comportement et capacité portante des dalles mixtes: modélisation mathématique et étude expérimentale**. Lausanne, 1990. Thèse (Doctorat es Sciences Techniques) - École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [6] DANIELS, B. J., CRISINEL, M. **Composite slab behavior and strength analysis. Part I: Calculation Procedure**. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 1, p. 16-35, January 1993.

- [7] DANIELS, B. J., CRISINEL, M. **Composite slab behavior and strength analysis. Part II: Comparasions with teste results and parametric analysis.** *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 1, p. 36-49, January 1993.
- [8] STARK, J. W. B., BREKELMANS, J.W.P.M., **Plastic design of continuous composite slabs.** *Journal of Constructional Steel Research*, vol 15, p. 23-47, 1990.
- [9] MELO, C. B. F. **Análise do comportamento e da resistência do sistema de lajes mistas.** Belo Horizonte, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.
- [10] SCHUSTER, M. R. **Strength and behaviour of the P-2430-12HB composite slab system (normal weight concrete).** Report No. WRI 110-12-02, CANAM, April 1984.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – procedimento – NBR 14323** – Rio de Janeiro, 1999.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. Método dos estados limites – NBR 8800/86** – Rio de Janeiro, 2ed., 1986 e errata n.1 Julho, 1988.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento – NBR 6118** – Rio de Janeiro, 1980.
- [14] METFORM S.A. **Steel deck MF-75 – Noções de utilização e dimensionamento.** Betim, revisão 01, 2000.



- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – NBR 7223** – Rio de Janeiro, 1992.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos – Procedimento – NBR 5739** – Rio de Janeiro, 1994.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação do módulo de deformação estático e diagrama tensão – deformação – Método de ensaio – NBR 8522** – Rio de Janeiro, 1984.
- [18] AMERICAN IRON and STEEL INSTITUTE – **Load and resistance factor design for cold-formed steel structural members**. AISI, Washington, March, 1991.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais metálicos – Determinação das propriedades mecânicas à tração – Método de ensaio – NBR 6152** – Rio de Janeiro, 1984.

## **Apêndice A**

### **Cálculo das armaduras**

#### **A.1 Introdução**

Este apêndice contém o cálculo da área de armadura necessária para resistir ao momento externo atuante no apoio intermediário, devido a continuidade da laje sobre o apoio intermediário, para os protótipos das séries 2A e 2B. A determinação do momento externo atuante no apoio intermediário se baseou na hipótese de que o máximo esforço cortante no apoio extremo é o  $V_{ut}$  correspondente aos protótipos simplesmente apoiados ensaiados por Melo [9]. Para os protótipos 2 e 5, os valores determinados para  $V_{ut}$  foram 27,3 kN/m e 22,4 kN/m respectivamente. Estes valores incluem o peso próprio das vigas de aplicação de carga e dos protótipos. As presenças da fôrma metálica e da tela soldada não foram consideradas nos cálculos.

#### **A.2 Série 2A**

##### **A.2.1 Momento externo atuante sobre o apoio intermediário**

A determinação do momento externo atuante no apoio intermediário pode ser feita resolvendo-se o esquema estaticamente indeterminado mostrado na figura A1. A solução da viga pode ser feita utilizando os vários métodos conhecidos da análise elástica de estruturas.

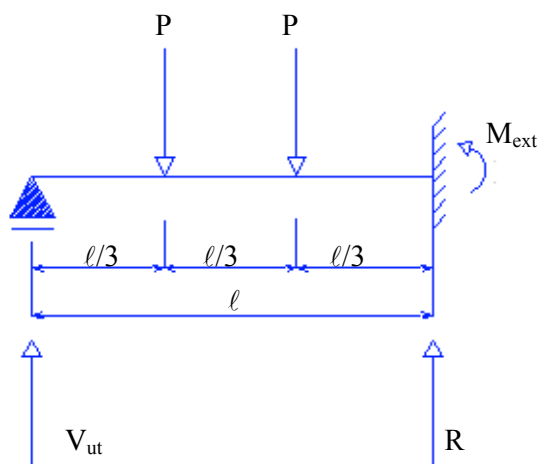


Figura A1 – Esquema de cálculo para os protótipos da série 2A

Logo, tem-se as expressões 1 e 2:

$$V_{ut} = \frac{2}{3} \times P \quad (\text{A.1})$$

$$R = \frac{4}{3} \times P \quad (\text{A.2})$$

Como  $V_{ut}$  é igual a 27,3 kN/m, tem-se ao resolver 1:

$$P = \frac{3}{2} \times V_{ut} \quad (\text{A.3})$$

$$P = 41 \text{ kN/m}$$

O momento por metro linear no apoio é dado por:

$$M_{ext} = P \times \frac{\ell}{3} \quad (\text{A.4})$$

$$M_{ext} = 24,6 \text{ kN m/m}$$

Com  $\ell$  igual 1,80 m.

O comprimento  $a$  do trecho de momento negativo é dado pela razão entre o  $M_{\text{ext}}$  e  $R$ :

$$a = \frac{M_{\text{ext}}}{R} \quad (\text{A.5})$$

$$a = \frac{\ell}{4} = 0,45 \text{ m}$$

## A.2.2 Dimensionamento ao momento externo

O dimensionamento da armadura resistente ao momento externo foi feito com base na teoria desenvolvida para vigas de concreto armado submetidas à flexão normal simples. A figura A2 mostra a seção transversal da laje mista relativa à largura  $B$ . Embora seja uma seção em T, a seção se comporta com retangular, uma vez que mesa superior trabalha a tração. Desta forma, considerou-se uma seção retangular de largura  $b_o$  para fins de dimensionamento da armadura como mostra a área hachurada na figura 2.

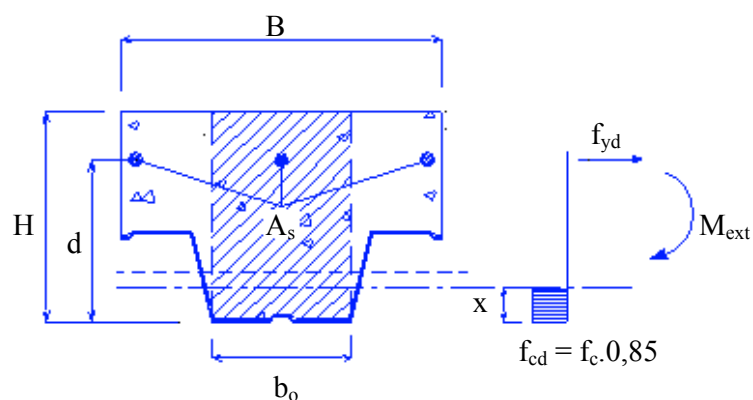


Figura A2 – Seção mista de largura  $B$  submetida à flexão normal simples

Onde:  $B = 274 \text{ mm}$   
 $b_o = 119 \text{ mm}$   
 $H = 140 \text{ mm}$   
 $d = 120 \text{ mm}$

O momento externo atuante na seção mista vale:

$$M_{\text{ext}} \times b = 24,6 \text{ kN m/m} \times 0,274 \text{ m} = 6,74 \text{ kN.m} \cong 67400 \text{ kgf.cm}$$

Considerando um comportamento dúctil para a seção mista (seção subarmada) e conforme as prescrições dadas na NBR 6118 [13], a área de aço necessária para resistir ao momento externo atuante é igual a:

$$A_s = 1,622 \text{ cm}^2/\text{ nervura}$$

$$A_s = 5,918 \approx 6,0 \text{ cm}^2/\text{ metro} \rightarrow \text{usar } 7 \phi 10 \text{ c/ } 12,5 \text{ cm}$$

### A.3 Série 2B

#### A.3.1 Momento externo atuante sobre o apoio intermediário

O cálculo do momento negativo para os protótipos desta série segue o mesmo procedimento da série anterior. O esquema hiperestático a ser resolvido é mostrado na figura A3.

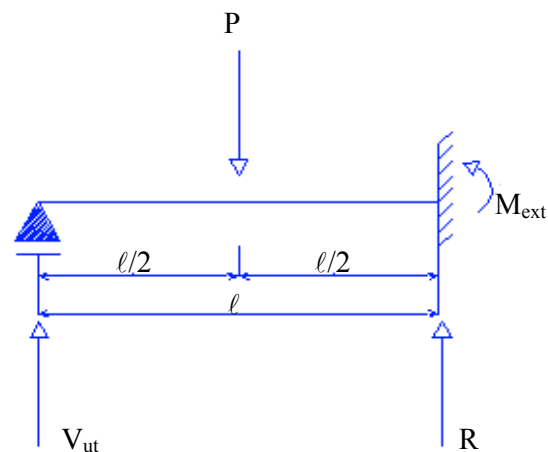


Figura A3 – Esquema de cálculo para os protótipos da série 2B

As reações de apoio valem:

$$V_{ut} = \frac{5}{16} \times P \quad (\text{A.6})$$

$$R = \frac{11}{16} \times P \quad (\text{A.7})$$

Mas  $V_{ut}$  é igual a 22,4 kN/m, tem-se:

$$P = \frac{16}{5} \times V_{ut} \quad (\text{A.8})$$

$$P = 71,7 \text{ kN/m}$$

O momento por metro linear no apoio é dado por:

$$M_{ext} = \frac{3}{16} \times P \times \ell \quad (\text{A.9})$$

$$M_{ext} = 24,2 \text{ kN m/m}$$

Com  $\ell$  igual 1,80 m.

O comprimento  $x$  do trecho de momento externo é dado pela razão entre o  $M_{ext}$  e

R:

$$x = \frac{M_{ext}}{R} \quad (\text{A.10})$$

$$x = \frac{3}{11} \times \ell = 0,491 \text{ m}$$

### A.3.2 Dimensionamento ao momento externo

O dimensionamento da armadura resistente ao momento externo para a série 2B foi feito de maneira análoga ao que foi apresentado para a série 2A. Com relação as dimensões mostradas na figura A2, apenas os valores de  $H$  e  $d$  são diferentes e valem

respectivamente, 180 mm e 160 mm. Utilizando-se as mesmas expressões da série anterior tem-se, então, a área de aço necessária para resistir ao momento na seção mista.

O momento negativo na seção mista vale:

$$M_{\text{ext}} \times b = 24,2 \text{ kN.m/m} \times 0,274 \text{ m} = 6,63 \text{ kN.m} \cong 66308 \text{ kgf.cm}$$

E para a seção subarmada, a área de aço necessária para resistir ao momento externo atuante é igual a:

$$A_s = 1,059 \text{ cm}^2/\text{nervura}$$

$$A_s = 3,865 \text{ cm}^2/\text{metro} \rightarrow \text{usar } 5 \phi 10 \text{ c/ } 20 \text{ cm}$$

## Apêndice B

### Propriedades mecânicas do aço do perfil metálico

A tabela B1 apresenta as características e as propriedades mecânicas dos dois corpos de prova ensaiados no laboratório de materiais da EEUFMG. Os corpos de prova foram confeccionados e testados segundo a NBR 6152 [19].

**Tabela B1 – Dimensões dos corpos de prova e propriedades mecânicas do aço do perfil metálico.**

CP	w (mm)	t (mm)	$A_g$ (mm <sup>2</sup> )	$L_o$ (mm)	L (mm)	$F_y$ (MPa)	$F_u$ (MPa)	A (%)
1	10,95	0,77	8,43	50	66,7	356,1	455,9	33,4
2	12,04	0,77	9,27	50	65,7	327,8	421,0	31,9
<b>Valor médio</b>						341,9	438,4	32,6

Onde:

$F_y$  = tensão limite de escoamento;

$F_u$  = tensão limite de ruptura;

A = alongamento na ruptura;

$A_g$  = área bruta da seção transversal do CP ( $w \times t$ );

$L_o$  = comprimento inicial para o cálculo do alongamento na ruptura; e

L = comprimento final para o cálculo do alongamento na ruptura.

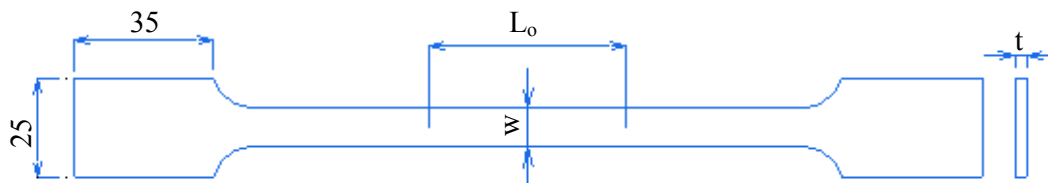


Figura B1 – Detalhe do corpo-de-prova (medidas em mm)



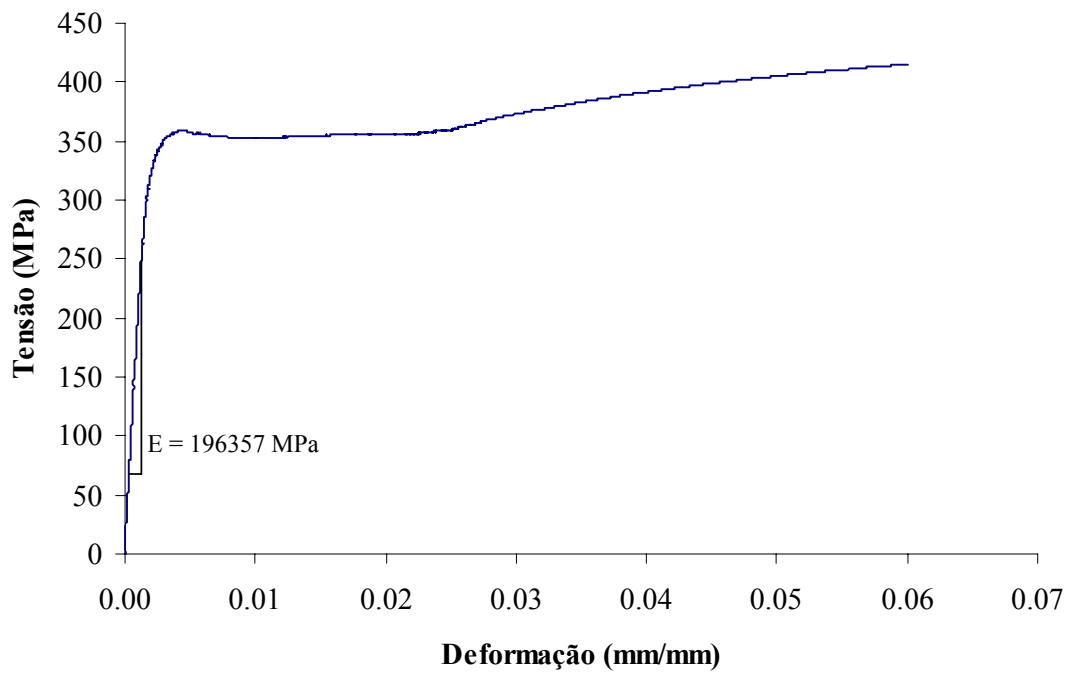


Figura B2 – Gráfico tensão x deformação do CP 1

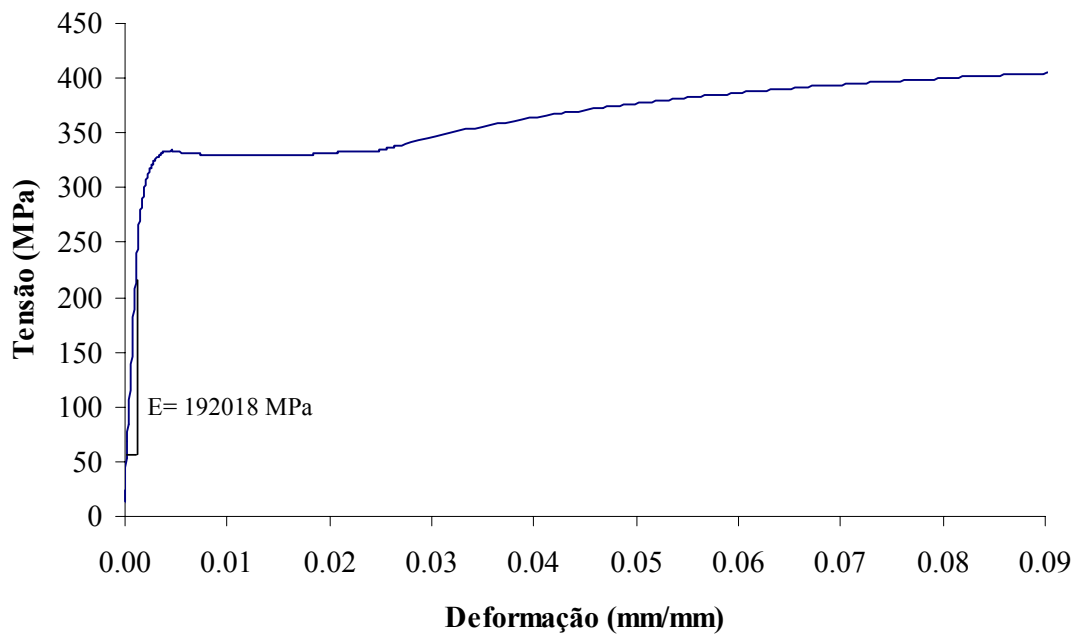


Figura B3 – Gráfico tensão x deformação do CP 2

## Apêndice C

### Tabelas de resultados

#### C.1 Introdução

Neste apêndice são apresentados, em forma de tabelas, todos os resultados obtidos nos ensaios realizados para os protótipos com vãos contínuos, incluindo as reações apoio. Os resultados obtidos por Melo [9] também foram listados. A nomenclatura utilizada para identificação das deformações no perfil metálico e para as reações de apoio é:

- **SDI** – Steel Deck Inferior;
- **SDS** – Steel Deck Superior;
- **R1** – Reação Apoio Móvel;
- **R2** – Reação Apoio Intermediário; e
- **R3** – Reação Apoio Fixo

Para as deformações, valor positivo indica tração no elemento, enquanto que o valor negativo corresponde à compressão.

## C.2 Tabelas

Tabela C1 – Resultados obtidos para o protótipo *PIS2A* (Série 2A)

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
0,0	0,00	0,00	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	-
8,9	0,15	0,14	0,000	0,000	4	21	0	-7	3	20	-
17,8	0,34	0,38	0,004	0,000	7	43	62	-5	3	41	-
26,7	0,48	0,59	0,005	0,010	6	60	89	2	3	60	-
31,1	0,58	0,72	0,005	0,015	4	69	101	2	4	74	-
35,6	0,69	0,83	0,008	0,015	4	83	117	5	4	90	-
40,0	0,93	0,95	0,008	0,020	4	98	136	1	-2	116	-
44,5	1,16	1,11	0,009	0,030	12	122	158	-7	-18	169	-
48,9	1,27	1,60	0,010	0,120	15	133	176	-33	-128	345	-
53,4	1,40	1,82	0,010	0,155	17	152	191	-47	-172	421	-
57,8	1,54	1,99	0,011	0,185	22	175	209	-56	-199	475	-
53,4	1,52	1,97	0,011	0,185	21	170	208	-52	-204	468	-
35,6	1,34	1,77	0,011	0,185	18	138	198	-14	-209	394	-
17,8	1,07	1,48	0,006	0,175	12	98	158	2	-215	299	-
0,0	0,64	0,99	0,003	0,155	7	54	98	1	-207	184	-
17,8	1,00	1,38	0,007	0,171	11	91	126	-14	-195	285	-
35,6	1,29	1,71	0,010	0,171	18	133	171	-24	-196	381	-

Continuação da tabela C1

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
					SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
53,4	1,54	2,03	0,014	0,193	24	171	207	-46	-217	474	-
57,8	1,62	2,13	0,015	0,209	30	190	225	-51	-226	516	-
62,3	1,76	2,27	0,018	0,228	28	207	239	-61	-244	555	-
71,2	2,13	2,49	0,031	0,273	20	276	271	-88	-284	625	-
80,1	2,58	2,68	0,063	0,305	7	470	310	-112	-324	685	-
89,0	3,01	2,89	0,110	0,350	-33	623	352	-139	-370	755	-
97,8	3,91	3,00	0,338	0,390	-171	914	399	-187	-412	791	-
89,0	3,83	2,96	0,338	0,390	-185	894	399	-170	-420	766	-
71,2	3,60	2,78	0,338	0,390	-185	805	371	-138	-437	692	-
53,4	3,33	2,58	0,338	0,390	-187	711	327	-118	-450	612	-
35,6	3,00	2,31	0,335	0,390	-176	610	275	-97	-452	531	-
17,8	2,61	1,98	0,323	0,373	-166	505	219	-83	-437	429	-
0,0	1,92	1,39	0,276	0,330	-149	364	142	-65	-361	286	-
17,8	2,35	1,74	0,279	0,335	-142	466	169	-92	-336	391	-
35,6	2,75	2,04	0,289	0,335	-147	578	223	-106	-331	488	-
53,4	3,13	2,35	0,316	0,351	-156	692	279	-122	-353	585	-
71,2	3,53	2,66	0,346	0,376	-164	812	335	-148	-378	687	-
89,0	3,97	2,93	0,410	0,398	-179	938	386	-176	-407	775	-
97,8	4,28	3,08	0,478	0,418	-186	1034	419	-200	-429	824	-
106,7	4,68	3,29	0,569	0,455	-153	1158	465	-226	-471	888	-

Continuação da tabela C1

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
115,6	5,12	3,54	0,672	0,507	-123	1290	513	-256	-533	960	-
124,5	5,67	3,87	0,802	0,561	-18	1471	572	-280	-631	1052	-
133,4	6,21	4,10	0,942	0,620	281	1675	626	-305	-740	1134	-
137,9	6,51	4,23	1,026	0,645	494	1792	654	-320	-800	1173	-
142,3	6,80	4,35	1,110	0,674	732	1924	681	-334	-864	1210	-
146,8	7,17	4,50	1,197	0,713	1079	2081	712	-357	-949	1255	-
151,2	7,48	4,62	1,299	0,747	1475	2255	743	-373	-1036	1293	-
160,1	8,20	4,94	1,518	0,841	2277	2664	810	-404	-1288	1380	-
164,6	8,58	5,10	1,644	0,895	2867	2931	843	-422	-1445	1414	-
169,0	9,03	5,25	1,795	0,935	3342	3278	878	-444	-1563	1444	-
173,5	9,52	5,38	1,958	0,978	3994	3808	917	-461	-1658	1472	-
177,9	10,05	5,49	2,146	1,013	4528	4599	955	-483	-1728	1497	-
182,3	10,63	5,59	2,359	1,048	6835	5491	996	-510	-1790	1523	-
186,8	11,52	5,65	2,736	1,073	6466	5518	1045	-553	-1838	1539	-

**Tabela C2 – Resultados obtidos para o protótipo P2S2A (Série 2A)**

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
					SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
0,0	0,00	0,00	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	-
8,9	0,09	0,08	0,007	0,000	-40	-31	-	-75	-74	-40	-
17,8	0,23	0,18	0,008	0,000	-42	-17	-	-94	-76	-29	-
26,7	0,30	0,27	0,008	0,000	-22	19	-	-	-38	11	-
35,6	0,38	0,39	0,008	0,000	-34	26	-	-108	-53	17	-
44,5	0,52	0,49	0,008	0,000	0	85	8	-	0	77	-
48,9	0,64	0,54	0,008	0,000	-39	91	-	-138	-62	41	-
53,4	0,74	0,58	0,008	0,000	-19	157	6	-	-9	81	-
57,8	0,87	0,63	0,008	0,000	-35	199	4	-	-30	80	-
62,3	1,02	0,68	0,008	0,000	-40	264	23	-147	-40	96	-
66,7	1,42	0,72	0,017	0,000	-118	502	105	-	-10	124	-
71,2	1,59	0,76	0,019	0,000	-132	604	165	-	28	163	-
75,6	1,72	0,84	0,022	0,000	-204	612	-	-184	-41	145	-
80,1	1,86	0,92	0,025	0,000	-180	701	194	-	22	219	-
44,5	1,45	0,69	0,025	0,000	-226	492	147	-116	-36	116	-
26,7	1,20	0,56	0,025	0,000	-182	399	-	-	-1	103	-
8,9	0,81	0,40	0,024	0,000	-174	224	97	-71	-77	8	-
0,0	0,60	0,29	0,020	0,000	-112	204	136	-8	-24	33	-
8,9	0,72	0,37	0,020	0,000	-147	205	90	-	-48	5	-
26,7	1,00	0,52	0,021	0,000	-153	325	97	-	-50	44	-

Continuação da tabela C2

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
44,5	1,32	0,67	0,021	0,000	-197	441	97	-	-62	74	-
62,3	1,63	0,81	0,024	0,000	-188	607	172	-	14	165	-
80,1	2,04	0,98	0,026	0,000	-227	785	221	-	34	234	-
81,8	2,15	1,42	0,032	0,000	-255	824	285	-99	-1	458	-
89,0	2,25	1,68	0,032	0,000	-241	887	-	-	-9	554	-
97,8	2,59	1,88	0,064	0,000	-368	954	318	-	-81	559	-
106,7	2,98	2,11	0,139	0,022	-474	1040	354	-	-117	611	-
115,6	3,43	2,35	0,230	0,035	-539	1176	457	-136	-66	719	-
124,5	3,95	2,58	0,361	0,077	-665	1322	522	-158	-72	793	-
89,0	3,55	2,28	0,366	0,072	-693	1085	466	-121	-99	678	-
53,4	2,88	1,86	0,369	0,068	-594	890	369	-54	-73	578	-
26,7	2,20	1,47	0,345	0,063	-453	653	296	-13	-59	424	-
0,0	1,23	0,95	0,186	0,047	-248	446	224	30	-37	272	-
26,7	1,71	1,28	0,194	0,043	-276	605	254	-13	-39	362	-
53,4	2,41	1,67	0,258	0,064	-369	859	323	-49	-59	531	-
71,2	2,87	1,97	0,319	0,082	-498	963	369	-73	-71	572	-
89,0	3,30	2,21	0,356	0,097	-539	1123	459	-97	-62	691	-
106,7	3,70	2,45	0,401	0,107	-608	1232	510	-117	-52	768	-
115,6	3,95	2,72	0,439	0,179	-632	1320	581	-140	-43	859	-
124,5	4,23	2,99	0,479	0,253	-674	1389	622	-163	-34	932	-
133,4	4,67	3,29	0,545	0,334	-745	1474	660	-186	-24	990	-

Continuação da tabela C2

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
142,3	5,18	3,62	0,634	0,434	-793	1602	717	-233	5	1070	-
151,2	5,64	3,93	0,726	0,537	-806	1750	767	-274	44	1140	-
160,1	6,31	4,32	0,876	0,662	-763	1996	864	-309	128	1251	-
169,0	6,93	4,66	1,029	0,777	-763	2241	905	-377	186	1320	-
177,9	7,59	5,01	1,214	0,899	-761	2503	955	-417	235	1389	-
182,3	8,33	5,35	1,427	1,023	-761	2750	995	-458	277	1446	-
186,8	8,56	5,51	1,496	1,073	-760	3003	1036	-500	319	1503	-
191,2	8,93	5,79	1,600	1,184	-747	3193	1097	-508	369	1576	-
204,6	9,99	6,61	1,886	1,499	-765	3558	1202	-601	358	1715	-
204,6	11,28	7,27	2,322	1,767	-761	4136	1345	-660	347	1858	-
204,6	12,25	7,69	2,639	1,952	-738	4576	1468	-689	359	1964	-
204,6	12,69	8,02	2,866	2,127	-714	4878	1540	-712	355	2026	-



**Tabela C3 – Resultados obtidos para o protótipo P3S2A (Série 2A)**

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
0,0	0,00	0,00	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	-
8,9	0,12	0,34	0,002	0,000	41	56	122	46	60	65	-
17,8	0,30	0,62	0,002	0,000	46	81	139	50	70	99	-
26,7	0,64	0,86	0,006	0,000	37	159	45	7	32	97	-
32,0	1,20	1,03	0,020	0,000	-54	376	120	4	72	111	-
35,6	1,32	1,06	0,023	0,000	-108	391	10	-37	26	83	-
40,0	1,52	1,12	0,040	0,000	-122	478	129	-13	77	127	-
44,5	1,77	1,22	0,073	0,000	-203	529	33	-57	46	132	-
31,1	1,65	1,14	0,077	0,000	-220	460	33	-45	35	101	-
13,3	1,36	0,93	0,077	0,000	-213	356	52	-13	31	60	-
0,0	0,95	0,58	0,072	0,000	-136	274	168	51	89	60	-
13,3	1,23	0,90	0,081	0,005	-98	396	262	83	147	136	-
31,1	1,59	1,15	0,090	0,015	-158	484	142	11	96	141	-
35,6	1,79	1,24	0,092	0,015	-175	550	160	1	108	167	-
44,5	1,90	1,31	0,100	0,015	-192	591	171	-5	114	186	-
53,4	2,23	1,52	0,131	0,015	-215	682	286	14	175	258	-
62,3	2,50	1,88	0,165	0,015	-269	781	324	-7	202	421	-
66,7	2,54	2,52	0,175	0,082	-277	804	494	88	34	654	-
71,2	2,62	2,77	0,177	0,128	-292	825	475	76	-34	731	-
80,1	2,90	3,14	0,215	0,207	-330	905	512	64	-109	834	-

Continuação da tabela C3

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
89,0	3,20	3,52	0,260	0,290	-378	995	511	37	-211	942	-
97,8	3,52	3,91	0,308	0,382	-395	1109	649	42	-277	1078	-
71,2	3,25	3,64	0,316	0,382	-403	979	553	84	-303	953	-
53,4	2,98	3,38	0,321	0,382	-416	833	490	67	-362	814	-
35,6	2,62	3,07	0,321	0,367	-344	737	430	101	-291	735	-
17,8	2,18	2,66	0,309	0,343	-308	569	371	63	-275	585	-
0,0	1,52	2,06	0,284	0,275	-211	419	304	72	-166	449	-
0,0	1,52	2,06	0,284	0,275	-211	419	304	72	-166	449	-
17,8	1,88	2,40	0,289	0,283	-219	528	367	35	-175	547	-
35,6	2,27	2,79	0,301	0,309	-247	686	431	63	-212	700	-
53,4	2,69	3,16	0,318	0,344	-333	798	488	48	-248	791	-
71,2	3,09	3,54	0,329	0,378	-363	957	546	34	-255	939	-
89,0	3,46	3,93	0,347	0,420	-427	1057	644	20	-354	1030	-
97,8	3,68	4,18	0,366	0,453	-408	1163	693	12	-340	1146	-
106,7	4,03	4,56	0,411	0,535	-439	1263	720	5	-448	1257	-
115,6	4,36	5,00	0,475	0,640	-473	1345	779	-52	-645	1389	-
124,5	4,76	5,47	0,569	0,760	-401	1485	838	-46	-750	1617	-
133,4	5,25	6,02	0,700	0,890	-266	1591	910	-72	-863	1804	-
142,3	5,80	6,50	0,848	1,020	-22	1707	1013	-148	-1134	2036	-
151,2	6,46	6,97	1,050	1,152	244	1878	1117	-153	-1414	2308	-
160,1	7,18	7,57	1,259	1,308	388	2047	1248	-177	-1765	2580	-

Continuação da tabela C3

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
169,0	8,05	8,05	1,569	1,435	397	2321	1379	-271	-2015	2726	-
177,9	9,07	8,61	1,919	1,585	381	2950	1509	-356	-2158	2910	-
182,3	9,54	8,94	2,066	1,673	389	3429	1575	-385	-2170	3048	-
186,8	10,04	9,25	2,233	1,755	374	4033	1640	-435	-2201	3230	-
191,2	10,47	9,48	2,376	1,826	347	4624	1705	-491	-2237	3388	-
195,7	11,12	9,77	2,597	1,905	339	5462	1771	-534	-2239	3696	-
199,2	11,70	10,01	2,795	1,993	405	5591	1823	-593	-2135	3999	-
204,6	12,72	10,21	3,381	2,065	363	5594	1924	-681	-2180	4126	-
205,5	-	10,23	3,776	2,075	392	5594	1940	-695	-2131	4246	-
206,4	-	10,23	4,209	2,085	361	5594	1957	-710	-2163	4231	-

**Tabela C4 – Resultados obtidos para o protótipo PIS2B (Série 2B)**

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
0,0	0,00	0,00	0,000	0,000	-	-	0	0	0	0	0
4,4	0,02	0,06	0,000	0,000	-	-	-2	-2	6	10	5
8,9	0,12	0,10	0,000	0,000	-	-	0	-4	10	22	6
13,3	0,18	0,17	0,005	0,000	-	-	-1	-3	14	28	13
17,8	0,26	0,24	0,005	0,000	-	-	-3	-4	18	40	20
20,5	0,30	0,28	0,005	0,000	-	-	-3	-3	24	49	24
22,2	0,34	0,31	0,005	0,000	-	-	-3	-3	25	50	27
24,9	0,39	0,36	0,008	0,000	-	-	-2	-1	27	61	29
26,7	0,42	0,38	0,008	0,000	-	-	0	0	30	66	24
29,4	0,46	0,45	0,009	0,000	-	-	-2	2	30	71	32
31,1	0,49	0,46	0,009	0,005	-	-	-2	1	32	78	33
35,6	0,56	0,52	0,010	0,005	-	-	-2	2	39	89	38
40,0	0,60	0,60	0,013	0,005	-	-	-3	1	44	100	49
44,5	0,68	0,67	0,013	0,005	-	-	-7	-4	53	112	53
48,9	0,78	0,76	0,014	0,003	-	-	-7	-10	65	133	63
53,4	0,85	0,84	0,014	0,001	-	-	-11	-12	77	153	72
57,8	0,95	0,91	0,015	-0,004	-	-	-13	-17	93	181	82
59,6	1,23	0,97	0,016	-0,008	-	-	-21	-40	101	187	105
53,4	1,21	0,92	0,016	-0,007	-	-	-20	-39	97	176	98
35,6	1,10	0,78	0,018	0,003	-	-	-15	-22	82	143	73

Continuação da tabela C4

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
17,8	0,95	0,59	0,015	0,010	-	-	-8	1	64	105	45
0,0	0,70	0,35	0,013	0,011	-	-	7	27	45	61	15
13,3	0,88	0,51	0,018	0,011	-	-	-1	17	54	85	30
26,7	1,09	0,65	0,015	0,009	-	-	-6	-4	68	120	52
40,0	1,29	0,78	0,014	0,007	-	-	-13	-24	85	150	72
53,4	1,48	0,90	0,015	0,001	-	-	-17	-35	97	175	97
58,7	2,00	0,96	0,025	-0,006	-	-	-24	-20	105	186	124
62,3	2,10	0,98	0,025	-0,007	-	-	-26	-21	109	191	135
66,7	2,40	1,69	0,054	0,001	-	-	232	65	26	501	212
71,2	2,40	2,02	0,054	0,006	-	-	259	67	-12	597	275
75,6	2,45	2,20	0,054	0,012	-	-	278	79	-19	663	319
80,1	2,53	2,41	0,054	0,033	-	-	300	80	-41	722	386
86,3	2,68	2,85	0,063	0,143	-	-	332	70	-106	819	539
89,0	2,71	3,04	0,063	0,185	-	-	343	57	-131	871	597
93,4	3,10	3,25	0,165	0,222	-	-	376	40	-151	940	722
71,2	2,95	3,10	0,168	0,225	-	-	327	74	-173	862	653
53,4	2,74	2,89	0,165	0,228	-	-	288	83	-170	750	575
35,6	2,43	2,57	0,160	0,241	-	-	248	59	-165	634	466
0,0	1,53	1,64	0,143	0,246	-	-	170	15	-114	369	258
35,6	2,14	2,31	0,156	0,239	-	-	203	15	-126	599	-
53,4	2,49	2,68	0,165	0,234	-	-	290	15	-125	736	482

Continuação da tabela C4

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
71,2	2,82	3,01	0,175	0,241	-	-	330	15	-136	865	-
89,0	3,16	3,35	0,213	0,261	-	-	370	15	-165	966	584
93,4	3,28	3,50	0,230	0,278	-	-	403	19	-172	1030	-
97,8	3,45	3,64	0,263	0,300	-	-	425	26	-184	1084	892
102,3	3,86	4,00	0,353	0,373	-	-	458	19	-216	1189	-
106,7	3,99	4,11	0,375	0,383	-	-	489	-13	-236	1218	998
111,2	4,22	4,28	0,433	0,421	-	-	516	-22	-251	1277	1134
115,6	4,46	4,48	0,480	0,465	-	-	531	-41	-290	1331	-
120,1	4,64	4,64	0,520	0,497	-	-	546	-60	-304	1378	-
124,5	4,93	4,84	0,593	0,531	-	-	585	-73	-329	1490	1380
129,0	5,20	5,06	0,653	0,593	-	-	624	-87	-353	1525	-
133,4	5,45	5,27	0,705	0,640	-	-	645	-109	-381	1590	-
137,9	5,83	5,58	0,805	0,715	-	-	691	-124	-423	1676	-
142,3	6,07	5,79	0,868	0,767	-	-	735	-138	-445	1746	-
146,8	6,30	6,00	0,929	0,811	-	-	776	-149	-476	1803	-
151,2	6,61	6,26	0,993	0,877	-	-	799	-180	-506	1871	1902
155,7	6,89	6,50	1,073	0,931	-	-	821	-211	-571	1896	-
160,1	7,29	6,82	1,168	1,009	-	-	876	-228	-625	1975	-
164,6	7,56	7,06	1,245	1,076	-	-	932	-245	-668	2036	2527
169,0	8,01	7,46	1,365	1,164	-	-	987	-262	-751	2125	-
173,5	8,27	7,70	1,435	1,254	-	-	1023	-291	-830	2158	-

Continuação da tabela C4

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
177,9	8,67	8,03	1,550	1,387	-	-	1059	-321	-897	2248	-
181,5	9,21	8,42	1,715	1,455	-	-	1105	-349	-1032	2303	-
185,0	9,51	8,65	1,818	1,520	-	-	1150	-377	-1111	2335	-
186,8	10,01	8,96	2,003	1,606	-	-	1173	-391	-1174	2389	2939

**Tabela C5 – Resultados obtidos para o protótipo P2S2B (Série 2B)**

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
					SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
0,0	0,00	0,00	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	-
8,9	0,06	0,08	0,000	0,000	13	22	5	-	13	22	-
17,8	0,13	0,17	0,000	0,000	21	42	6	-	-	-	-
26,7	0,22	0,26	0,000	0,000	118	132	90	51	110	133	-
35,6	0,30	0,34	0,000	0,000	117	143	79	-	-	-	-
44,5	0,38	0,42	0,006	0,000	178	206	-	68	166	208	-
48,9	0,42	0,46	0,006	0,000	115	-	67	-	-	-	-
53,4	0,46	0,50	0,007	0,000	166	216	-	45	-	-	-
57,8	0,51	0,56	0,007	0,000	191	254	-	-	176	236	-
62,3	0,55	0,61	0,008	0,000	195	266	-	-	179	241	-
66,7	0,63	0,65	0,010	0,000	113	-	23	-46	-	-	-
71,2	0,70	0,71	0,010	0,000	112	-	1	-73	-	-	-
75,6	0,78	0,77	0,013	0,000	220	329	61	-33	168	259	457
72,9	1,52	0,73	0,019	0,000	132	595	99	-26	187	268	622
75,6	1,72	0,73	0,038	0,000	123	663	212	-27	188	267	682
80,1	1,93	0,74	0,047	0,000	165	782	286	15	232	313	880
53,4	1,75	0,61	0,047	0,000	51	605	212	-17	132	193	-
35,6	1,52	0,49	0,047	0,000	66	525	220	23	125	171	-
17,8	1,24	0,37	0,046	0,000	99	458	237	69	131	162	-
0,0	0,84	0,16	0,037	0,000	158	382	261	141	156	161	532



Continuação da tabela C5

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck – Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
17,8	0,97	0,33	0,037	0,000	138	427	229	97	141	166	-
35,6	1,25	0,46	0,042	0,005	85	496	202	36	122	158	-
53,4	1,54	0,58	0,049	0,005	75	595	208	2	133	188	-
71,2	1,84	0,68	0,059	0,005	51	693	205	-42	129	201	-
80,1	2,05	0,74	0,067	0,010	176	865	337	-	-	-	958
84,5	2,30	0,76	0,126	0,010	52	853	-	-42	-	-	-
89,0	2,56	0,78	0,193	0,010	130	1008	371	-	-	-	1085
97,8	3,16	0,84	0,386	0,010	56	1152	397	-28	232	319	1210
94,3	3,31	1,77	0,464	0,046	-57	1105	460	-66	13	499	1171
97,8	3,31	2,03	0,464	0,079	19	1177	557	-13	33	629	1458
102,3	3,33	2,38	0,464	0,139	16	1199	597	-17	-22	695	1536
66,7	2,97	2,06	0,465	0,139	-32	979	-	12	-65	572	1233
40,0	2,50	1,73	0,464	0,134	-62	786	-	-	-86	437	894
17,8	1,99	1,33	0,432	0,128	-70	602	317	-	-85	314	580
0,0	1,29	0,88	0,278	0,093	7	462	257	43	-28	251	347
17,8	1,52	1,11	0,278	0,093	-61	502	312	27	-86	328	-
40,0	1,97	1,48	0,299	0,097	-97	645	381	6	-80	425	-
66,7	2,63	1,93	0,417	0,130	-113	851	463	-19	-73	541	-
89,0	3,12	2,30	0,493	0,152	-7	1103	532	-40	-66	638	1356
97,8	3,33	2,52	0,530	0,169	-26	1169	560	-48	-93	677	1448
102,3	3,46	2,65	0,558	0,190	-115	1147	570	-70	-181	696	-

Continuação da tabela C5

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
106,7	3,63	2,84	0,598	0,217	-77	1238	580	-92	-164	715	-
115,6	3,94	3,17	0,688	0,274	-107	1359	620	-121	-218	768	-
124,5	4,37	3,59	0,817	0,358	-107	1589	708	-133	-255	857	1823
133,4	4,82	4,02	0,958	0,444	-149	1852	748	-189	-348	913	1880
142,3	5,35	4,52	1,131	0,549	-102	2426	819	-240	-390	1026	2177
146,8	5,68	4,84	1,253	0,622	-133	2753	855	-266	-478	1038	-
151,2	5,97	5,10	1,346	0,675	-108	2941	898	-282	-501	1088	2295
155,7	6,25	5,29	1,441	0,726	-67	3228	949	-287	-511	1135	2448
164,6	7,06	5,84	1,713	0,848	142	4372	1045	-339	-545	1226	2769
169,0	7,51	6,11	1,871	0,920	406	5282	1143	-363	-493	1339	3176
173,5	8,23	6,51	2,137	1,020	739	5562	1240	-386	-468	1428	3223
177,9	8,83	6,85	2,357	1,105	879	5571	1337	-409	-531	1472	3362
182,3	9,65	7,29	2,664	1,235	1164	5571	1434	-433	-486	1516	-
185,0	10,20	7,58	2,864	1,323	1221	5571	1509	-482	-543	1561	-
186,8	10,91	7,94	3,131	1,438	1396	5571	1559	-515	-489	1591	-
188,6	11,56	8,25	3,398	1,543	1386	5571	1644	-579	-565	1620	-
191,2	12,53	8,64	3,788	1,668	1557	5571	1708	-602	-494	1663	-
191,2	13,66	8,98	4,258	1,783	1573	5571	1772	-676	-514	1676	-

**Tabela C6 – Resultados obtidos para o protótipo P3S2B (Série 2B)**

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
0,0	0,00	0,00	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	-
8,9	0,39	0,35	-0,006	0,014	10	36	11	34	-8	31	-
17,8	0,58	0,51	-0,015	0,019	19	64	11	31	15	53	-
26,7	0,79	0,64	-0,018	0,023	49	129	7	17	29	83	-
35,6	1,00	0,88	-0,020	0,029	110	214	-2	-18	111	179	-
31,1	1,06	1,72	-0,023	0,177	109	206	19	-106	-116	475	-
35,6	1,09	2,51	-0,023	0,233	113	217	38	-131	-186	591	-
40,0	1,13	2,80	-0,023	0,268	120	231	54	-139	-	664	-
26,7	1,02	2,66	-0,023	0,268	106	196	59	-114	-226	577	-
13,3	0,83	2,43	-0,023	0,273	88	156	41	-89	-	479	-
0,0	0,43	1,85	-0,004	0,279	59	90	24	-96	-205	315	-
13,3	0,73	2,18	-0,019	0,282	76	133	32	-110	-210	444	-
26,7	0,94	2,63	-0,024	0,284	102	187	39	-130	-251	584	-
40,0	1,09	3,05	-0,027	0,307	122	231	64	-146	-278	703	-
44,5	1,17	3,29	-0,027	0,322	127	254	75	-156	-327	763	-
48,9	1,77	3,47	-0,027	0,356	24	409	101	-187	-330	754	-
53,4	2,13	3,46	0,012	0,356	-20	480	110	-208	-327	750	-
57,8	2,51	3,48	0,089	0,356	-64	546	119	-226	-323	759	-
62,3	2,80	3,52	0,139	0,356	-90	600	130	-236	-325	778	-
71,2	3,32	3,65	0,244	0,359	-131	693	159	-250	-353	832	-

Continuação da tabela C6

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck – Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
80,1	3,85	4,09	0,351	0,404	-163	799	204	-273	-380	905	-
89,0	4,34	4,44	0,465	0,462	-185	877	243	-295	-432	964	-
97,8	4,86	4,88	0,576	0,539	-211	993	303	-335	-480	1064	-
106,7	5,46	5,44	0,711	0,662	-229	1103	366	-378	-495	1168	-
115,6	6,06	5,96	0,859	0,774	-234	1154	426	-417	-506	1212	-
89,0	5,80	5,69	0,867	0,776	-241	1212	337	-408	-478	1257	-
62,3	5,31	5,19	0,881	0,781	-248	1116	247	-399	-450	1074	-
26,7	4,46	4,38	0,856	0,797	-239	953	128	-387	-413	865	-
0,0	3,42	3,23	0,856	0,797	-213	484	38	-378	-385	390	-
26,7	4,01	3,80	0,826	0,759	-213	484	123	-386	-405	390	-
62,3	4,94	4,66	0,806	0,738	-229	676	235	-364	-432	619	-
89,0	5,69	5,37	0,801	0,777	-239	932	350	-393	-452	865	-
106,7	6,26	5,88	0,837	0,813	-248	1124	412	-413	-465	1074	-
115,6	6,68	6,14	0,929	0,842	-248	1251	462	-429	-484	1194	-
124,5	7,25	6,55	1,066	0,926	-250	1319	500	-481	-501	1255	-
133,4	7,81	7,07	1,184	0,989	-256	1387	537	-532	-551	1316	-
142,3	8,54	7,78	1,374	1,212	-309	1455	580	-608	-533	1377	-
151,2	9,26	8,48	1,571	1,397	-345	1550	648	-669	-504	1505	-
160,1	10,18	9,39	1,844	1,605	-386	1645	717	-729	-475	1633	-
164,6	10,62	9,79	1,966	1,770	-427	1730	763	-742	-456	1708	-
169,0	11,28	10,38	2,209	1,942	-437	1774	831	-777	-429	1745	-

Continuação da tabela C6

Carga (kN)	Flecha (mm)		Deslizamento nos apoios extremos (mm)		Deformação ( $\mu\text{mm/mm}$ )						
					Steel Deck - Vão1		Steel Deck - Apoio Intermediário		Steel Deck - Vão2		Armadura negativa
	Vão 1	Vão 2	Móvel	Fixo	SDS	SDI	SDS	SDI	SDS	SDI	
173,5	12,38	10,96	2,604	2,116	-472	1816	883	-827	-364	1782	-
173,5	13,62	11,89	3,166	2,400	-545	1973	952	-831	-	2049	-
175,2	13,92	12,10	3,284	2,462	-619	2012	976	-835	-341	2109	-
177,9	14,97	12,81	3,771	2,680	-654	2091	1026	-853	-309	2203	-
177,9	15,56	13,30	4,039	2,787	-669	2134	1060	-862	-283	2345	-

Tabela C7 – Resultados obtidos para o Protótipo 2 (Melo [9])

Carga (kN)	Flecha (mm)	Deslizamento nos apoios (mm)		Deformações ( $\mu\text{mm/mm}$ )	
				Steel Deck	
		Móvel	Fixo	SDI	SDS
0	0,00	0,000	0,000	0	0
3,6	0,00	0,000	0,000	18	0
7,1	0,03	0,000	0,000	34	0
10,7	0,09	0,000	0,000	50	8
14,2	0,19	0,000	0,000	75	10
16,0	0,26	0,000	0,000	91	13
17,8	0,43	1,000	0,002	115	16
19,6	0,70	1,000	0,002	242	56
21,3	1,38	0,018	0,004	317	63
17,8	1,97	0,215	0,005	329	53
19,6	2,43	0,350	0,005	420	-15
21,3	2,87	0,473	0,005	466	-62
22,2	3,39	0,604	0,005	529	-132
16,9	4,19	0,656	0,223	547	-262
18,7	4,66	0,697	0,342	589	-305
20,5	4,98	0,702	0,415	627	-326
22,2	5,43	0,718	0,515	677	-357
24,0	5,95	0,773	0,600	726	-393
26,7	6,81	0,886	0,742	811	-467
29,3	7,78	1,015	0,901	903	-542
32,0	8,97	1,184	1,090	1015	-631
33,8	9,74	1,296	1,226	1076	-697
35,6	10,74	1,456	1,388	1173	-760
33,8	12,12	1,627	1,725	1230	-843
35,6	12,82	1,630	1,951	1285	-857
36,5	13,84	1,713	2,249	1338	-873
37,4	14,69	1,825	2,451	1379	-888

Tabela C8 – Resultados obtidos para o *Protótipo 5* (Melo [9])

Carga (kN)	Flecha (mm)	Deslizamento nos apoios (mm)		Deformações ( $\mu\text{mm/mm}$ )	
		Móvel	Fixo	Steel Deck	
				SDI	SDS
0,00	0,00	0,000	0,000	0	0
1,83	0,08	0,000	0,000	7	0
3,65	0,24	0,000	0,000	11	0
5,48	0,40	0,000	0,000	20	0
7,31	0,55	0,000	0,000	40	5
9,14	0,75	0,000	0,000	58	18
10,96	0,97	0,000	0,000	75	21
11,88	1,13	0,000	0,000	95	24
12,79	1,47	0,000	0,000	124	42
13,70	1,77	0,000	0,000	182	60
14,62	2,29	0,000	0,000	204	85
15,53	2,62	0,000	0,000	212	91
16,44	2,83	0,000	0,000	228	99
10,05	3,88	0,000	0,012	217	81
11,42	4,610	0,000	0,112	257	90
12,33	5,170	0,000	0,184	332	103
13,70	5,560	0,000	0,211	348	116
15,07	6,080	0,000	0,303	364	129
16,44	6,820	0,000	0,398	390	146
17,36	7,250	0,000	0,461	406	152
18,27	7,730	0,000	0,522	421	158
19,19	8,170	0,000	0,581	433	159
20,10	8,780	0,000	0,643	462	162
21,01	9,290	0,000	0,712	482	175
21,93	10,000	0,000	0,807	517	179
15,99	10,560	0,000	1,020	473	158
16,90	11,690	0,000	1,414	480	163
17,82	12,310	0,000	1,561	485	163
19,19	13,100	0,000	1,749	497	169
20,10	13,580	0,000	1,903	506	170
21,01	14,280	0,000	2,040	530	178
21,93	14,640	0,000	2,164	547	180
22,84	15,420	0,000	2,299	570	183

**Tabela C9 – Reações de apoio obtidas para o protótipo *P1S2A* (Série 2A)**

Carga (kN)	Reações de apoio (kN)		
	R1	R2	R3
0,0	0,0	0,0	0,0
17,8	1,7	14,0	2,1
35,6	3,6	28,2	3,8
53,4	5,5	42,7	5,2
71,2	7,5	56,6	7,1
89,0	9,6	71,0	8,4
97,8	11,2	77,6	9,1
106,7	13,2	83,7	9,8
115,6	15,4	89,7	10,5
124,5	-	-	-
133,4	-	-	-
137,9	-	-	-
142,3	-	-	-
146,8	-	-	-
151,2	-	-	-

**Tabela C10 – Reações de apoio obtidas para o protótipo *P2S2A* (Série 2A)**

Carga (kN)	Reações de apoio (kN)		
	R1	R2	R3
0,0	0,0	0,0	0,0
26,7	2,6	22,5	1,6
53,4	6,2	42,7	4,5
71,2	6,8	59,3	5,1
89,0	9,2	72,4	7,3
106,7	10,5	87,5	8,8
115,6	11,8	93,3	10,5
124,5	12,6	100,0	11,9
133,4	13,4	107,8	12,2
142,3	15,3	113,0	14,0
151,2	17,8	116,8	16,6



**Tabela C11 – Reações de apoio obtidas para o protótipo *P3S2A* (Série 2A)**

Carga (kN)	Reações de apoio (kN)		
	R1	R2	R3
0,0	0,0	0,0	0,0
17,8	1,9	14,2	1,7
35,6	4,5	26,8	4,3
53,4	5,6	42,4	5,4
71,2	8,2	55,0	8,0
89,0	9,3	71,0	8,6
97,8	11,5	75,5	10,9
106,7	13,0	82,0	11,8
115,6	14,1	89,5	12,1
124,5	17,3	92,0	15,2
133,4	20,6	95,3	17,6
142,3	-	-	19,6
151,2	-	-	21,2

**Tabela C12 – Reações de apoio obtidas para o protótipo *P1S2B* (Série 2B)**

Carga (kN)	Reações de apoio (kN)		
	R1	R2	R3
0,0	-	-	0,0
35,6	-	-	3,5
53,4	-	-	5,6
71,2	-	-	7,5
89,0	-	-	8,8
93,4	-	-	9,7
97,8	-	-	10,4
106,7	-	-	12,0
111,2	-	-	12,7
115,6	-	-	13,1
120,1	-	-	13,7
129,0	-	-	15,5
133,4	-	-	16,2
137,9	-	-	17,1
142,3	-	-	17,9
146,8	-	-	18,5
151,2	-	-	19,2
160,1	-	-	19,6
164,6	-	-	20,2
169,0	-	-	20,8

**Tabela C14 – Reações de apoio obtidas para o protótipo *P3S2B* (Série 2B)**

Carga (kN)	Reações de apoio (kN)		
	R1	R2	R3
0,0	0,0	0,0	0,0
26,7	3,4	19,8	3,4
62,3	7,2	48,0	7,1
89,0	9,7	69,1	10,1
106,7	11,8	83,0	11,9
115,6	12,9	90,1	12,7
124,5	13,9	97,2	13,4
133,4	14,4	105,2	13,9
142,3	15,5	111,6	15,2
151,2	16,5	118,4	16,3
160,1	17,4	125,5	17,2
164,6	18,0	128,8	17,8
173,5	20,0	133,7	19,8
177,9	21,2	135,7	21,0

## Apêndice D

### Fotografias



Figura D1 – Detalhe da fissura principal abaixo da linha de carga extrema



Figura D2 – Detalhe da flambagem local da fôrma metálica



Figura D3 – Detalhe da fissura principal devido ao momento atuante no apoio interno.



Figura D4 – Detalhe do deslizamento relativo da extremidade