3.
Descrição dos Testes Experimentais

Neste capítulo serão descritos todos os testes experimentais realizados.

3.1.
Considerações Iniciais

O sistema estrutural construído consiste em uma laje mista com perfil “C” enrijecido e preenchido com concreto estrutural. Foram realizados oito testes nos quais apenas uma bandeja foi utilizada (somente um perfil “C” na laje mista) e dois testes nos quais foram utilizadas três bandejas.

Alguns testes foram executados para ruína com momentos positivos e três para momentos negativos. Os testes foram denominados de BMP-1, BMP-2, BMP-3, BMP-4, BMP-5, BMP-6, BMP-7, BMN-1, BMN-2 e BMN-3, sendo que BMP refere-se os testes com momentos positivos e BMN os testes com atuação de momentos negativos.

As dimensões das lajes mistas testadas são apresentadas na Tabela 3.1.

Laje	Largura (m)	Vão (m)
BMN - 1	0.2	4.8
BMN - 2	0.2	2.3
BMN - 3	0.2	2.3
BMP – 1	0.2	4.8
BMP – 2	0.2	4.8
BMP – 3	0.2	2.8
BMP – 4	0.2	4.8
BMP – 5	0.2	4.8
BMP – 6	0.58	4.8
BMP – 7	0.58	4.8

Tabela 3.1 – Dimensões das lajes mistas testadas.

A Figura 3.1 apresenta a seção transversal do perfil utilizado nas lajes mistas BMN 1 – 3 e BMP 1 - 5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

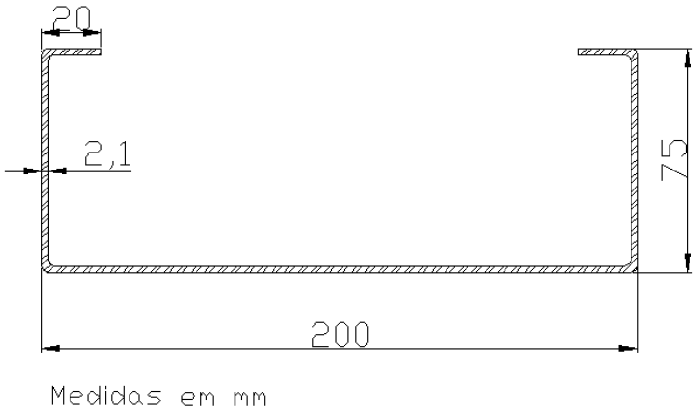

Figura 3.1 – Seção transversal do perfil “C” enrijecido.

3.2
Descrição Geral dos Testes Experimentais

Para realização dos testes, alguns parâmetros foram pré-definidos e alguns procedimentos adotados:

- todas as lajes mistas ensaiadas foram bi-apoiadas: um apoio era de primeiro gênero e o outro de segundo gênero, conforme apresentado na Figura 3.2;
- a carga foi aplicada igualmente em dois pontos, distantes de 1/3 do vão (Figuras 3.2, 3.3 e 3.4). Para aplicar a carga, foi necessário utilizar uma viga de distribuição de cargas;
- nas lajes mistas compostas de apenas uma bandeja, a aplicação da carga foi de 0,5 em 0,5 kN até a carga máxima, isto é, até atingir o colapso da laje. Nas lajes mistas compostas de três bandejas, a aplicação de carga foi de 2 em 2 kN. Após 10 kN a carga foi aplicada de 1 em 1 kN até atingir o colapso da laje.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

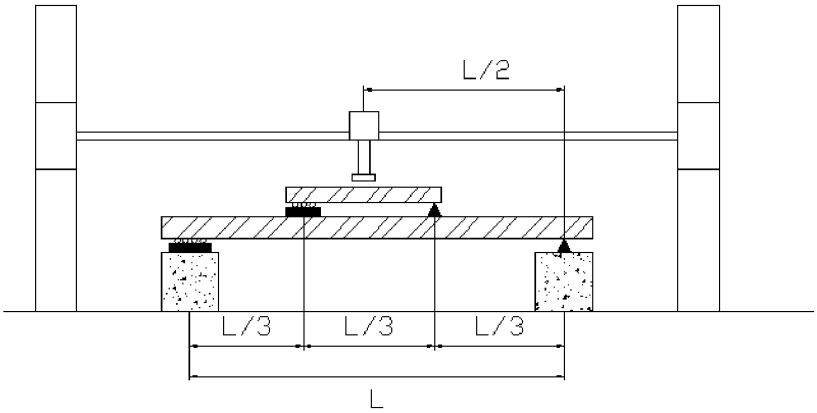

Figura 3.2 - Esquema da aplicação de carga.

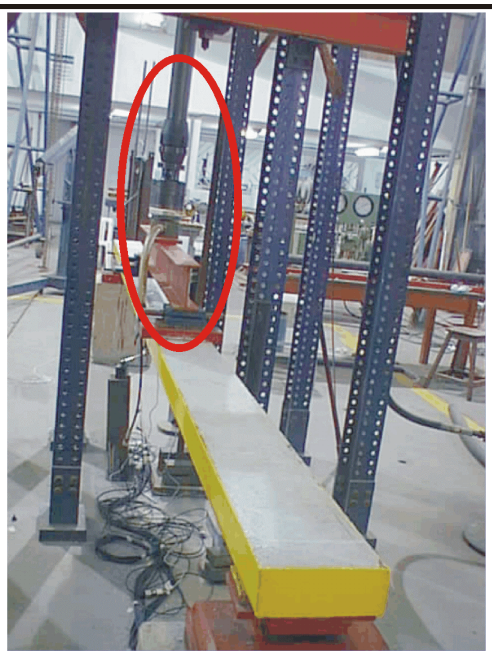

Figura 3.3 - Esquema de aplicação de carga para laje mista com uma bandeja.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

Figura 3.4- Esquema de aplicação de carga para laje mista com três bandejas.

3.2.1
Preparação dos Testes

Nos próximos itens serão apresentados todas as etapas de preparação dos testes e as instrumentações utilizadas.

3.2.1.1
Fôrma de Contenção Lateral

As lajes mistas compostas de apenas uma bandeja não precisaram de fôrma de contenção lateral e nem de escoras. As fôrmas eram os próprios perfis e foram concretadas diretamente no local do teste (Figura 3.5).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

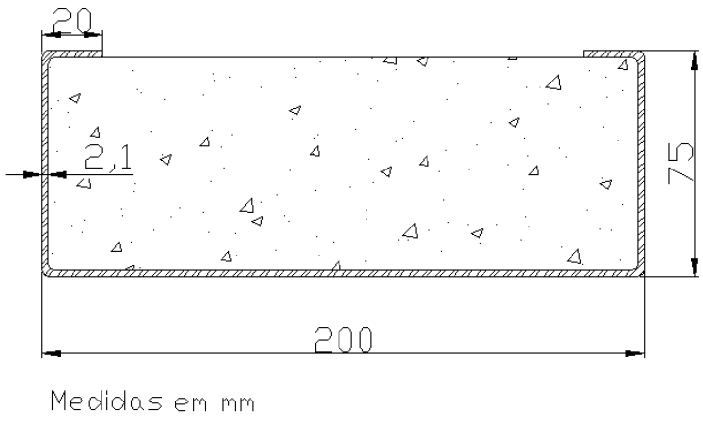

Figura 3.5 - Modelo da seção transversal da laje mista.

As lajes mistas compostas de três bandejas tinham dimensões de 0,58 x 4,8 metros. Apesar de a estrutura ser auto-sustentável e não necessitar de escoras, fez-se necessário o uso de uma fôrma de contenção lateral para o concreto, pelo fato da laje mista ter uma capa de 50 milímetros. conforme pode ser visto nas Figuras 3.6 e 3.7.

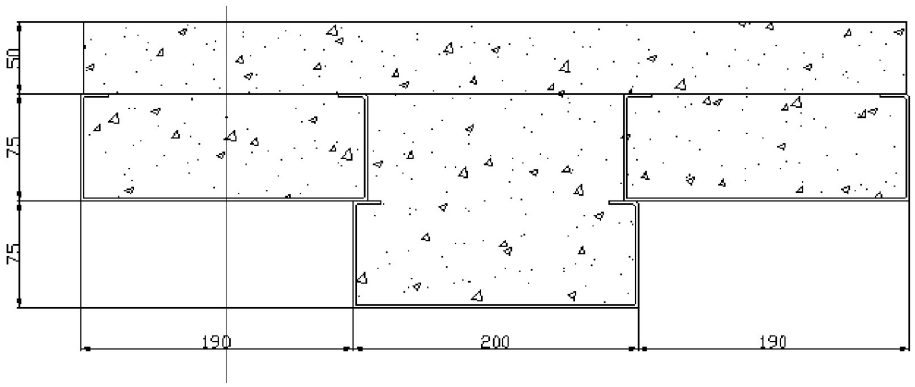

Figura 3.6 - Modelo da seção transversal da laje mista de três bandejas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

Figura 3.7 - Fôrma de contenção lateral da laje mista.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

3.2.1.2
Armadura de Pele Contra Fissuras de Superfície

Para evitar fissuras nas lajes mistas, foi utilizada uma armadura de pele simples com vergalhões de bitola de 5.0 milímetros a cada 200 milímetros em ambas as direções. Esta armadura foi disposta acima do perfil, proporcionando a ligação entre os perfis e a capa de concreto de 50 milímetros. A armadura foi empregada somente nas lajes mistas que continham os três perfis (BMP-6 e BMP-7).

Com o objetivo de aumentar a capacidade de carga, foi empregada uma armadura positiva na laje constituída de 3 vergalhões de 5 /16” (Figura 3.8).

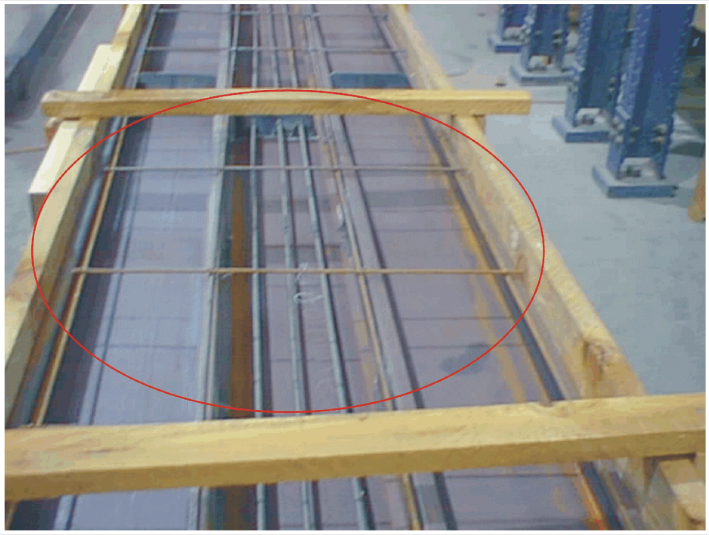

Figura 3.8- Armadura de pele.

3.2.1.3
Apoios

O sistema estrutural utilizado foi o sistema bi-apoiado. Em uma extremidade foi utilizado o apoio de primeiro gênero, que impede apenas o deslocamento vertical, deixando livre o deslocamento horizontal e a rotação. Na outra extremidade foi utilizado o apoio de segundo gênero, que impede o deslocamento vertical e o horizontal, deixando livre somente a rotação.

A distância entre os apoios da laje variou de acordo com o comprimento das mesmas. Os apoios da viga de distribuição de carga seguiram o mesmo padrão dos apoios das lajes mistas: em uma extremidade, apoio de primeiro gênero e, na outra, apoio de segundo gênero (Figuras 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

Figura 3.9 - Apoio de primeiro gênero da laje mista.

Figura 3.10 - Apoio de segundo gênero da laje mista.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

Figura 3.11- Apoio de primeiro gênero da viga de distribuição.

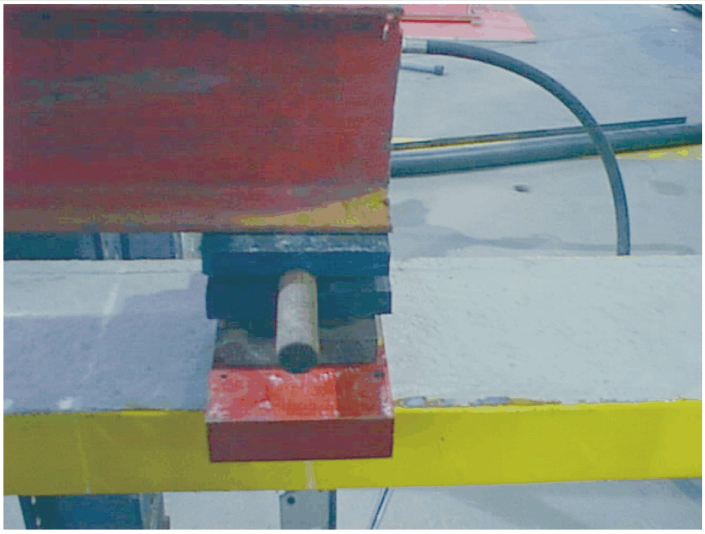

Figura 3.12 - Apoio de segundo gênero da viga de distribuição.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

3.2.1.4
Concreto

Para a realização dos testes foi obtido um concreto de 20 MPa de resistência. O traço utilizado foi de 1 : 2,68 : 3,68 (cimento, areia e brita) para um fator água/cimento (X) que variava de 0,4 a 0,45, dependendo da umidade do material utilizado.

Foram utilizados corpos de prova padrão com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, obtendo-se uma área de 78,5 cm^2. Os corpos de prova foram preparados de acordo com a ABNT [7].

Para os testes das lajes com apenas um perfil, houve rompimento dos corpos de prova somente no dia do ensaio, para verificar se a resistência atual estava aproximadamente 20 MPa. Para as lajes com três perfis (BMP-6 e BMP-7), houve rompimento aos 3 , 7 , 21 e 28 dias, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Teste	**Resistência (MPa)**				
	3 dias	**7 dias**	**21 dias**	**28 dias**	**teste**
BMP - 6					
CP - 1	11.7	14.3	22.1	23.4	22.1
CP - 2	14.6	18.5	20.5	24.2	20.5
BMP - 7					
CP - 1	X	23.1	31.2	28.1	31.2
CP - 2	X	21.1	36.6	34.9	36.6
CP - 3	X	24.3	30.5	31.7	30.5
CP - 4	X	X	31.3	31.8	31.3
CP - 5	X	X	26.2	35.4	26.2
CP - 6	X	X	29.2	32.4	29.2

Tabela 3.2 – Resultados dos corpos de prova ensaiados.

3.2.1.5
Instrumentação

A instrumentação foi utilizada para medir os valores das cargas aplicadas, os deslocamentos e as deformações da estrutura. As leituras da carga foram feitas por duas células de carga da marca KYOWA, uma com capacidade de 10 toneladas e outra com capacidade de 20 toneladas. Os deslocamentos foram medidos por LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*) da marca Gerfran, com curso de 50 e de 300 milímetros, e por relógios (para consulta analógica) da marca Tesa, com curso de 50 milímetros. As deformações foram obtidas por meio de extensômetros elétricos lineares (*strain gages*).

A célula de carga e os LVDTs foram todos calibrados antes da realização dos testes, definindo as constantes de calibração de cada instrumento.

As leituras dos LVDTs e dos extensômetros foram obtidas por meio de um micro-computador conectado através de uma interface HP-IB, modelo 82990A, conectada a uma unidade de controle de aquisição de dados, modelo 3497A,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

com 110 canais, e a um expansor, modelo 3498A, com 60 canais. Tanto a unidade de controle quanto o expansor são da marca HEWLETT-PACKARD. Para verificação das leituras dos LVDTs foram empregados relógios analógicos com curso máximo de 50 milímetros. As características dos instrumentos utilizados são apresentadas na Tabela 3.3.

Instrumento	Marca	Curso / Capacidade	Sensibilidade
LVDTS	GERFRAN	50 mm	0.001 mm
	GERFRAN	300 mm	0.001 mm
Relógio	TESA	50 mm	0.01 mm
Células de Carga	KYOWA	10 t	
	KYOWA	20 t	

Tabela 3.3 – Características dos instrumentos utilizados.

As Figuras 3.13, 3.14 e 3.15 mostram os instrumentos que foram utilizados nos testes.

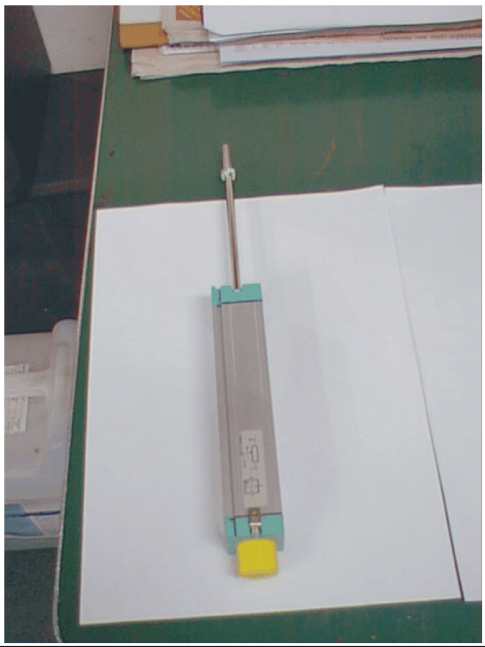

Figura 3.13 – LVDT de 50 milímetros.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

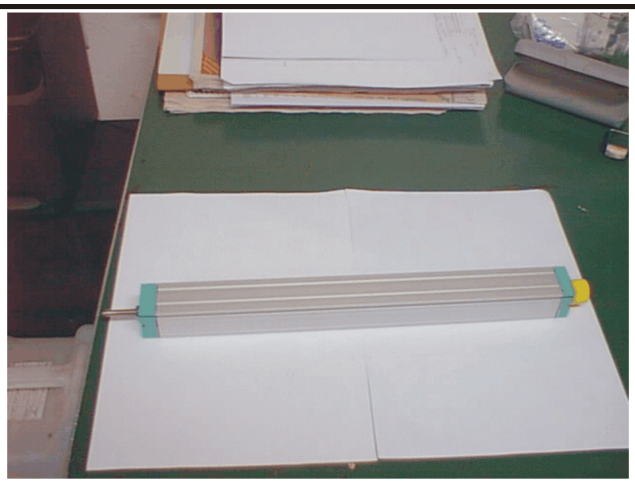

Figura 3.14 – LVDT de 300 milímetros.

Figura 3.15 – Relógio analógico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

3.3
Testes Experimentais

3.3.1
Testes das Lajes BMP–1 e BMP–2

O primeiro e o segundo testes (respectivamente, BMP–1 e BMP–2) utilizaram uma laje de dimensões 0,2 x 5,0 metros com séptos nas extremidades. Não existia nenhuma conexão mecânica entre o aço e o concreto,

e a resistência ao cisalhamento na interface aço/concreto é resultante do confinamento do concreto na viga deformada de aço.

Os apoios foram colocados a 10 cm de cada extremidade, restando um vão livre de 4,8 metros.

Para estes testes foram utilizados três LVDTs de curso de 50 milímetros e um relógio analógico. O relógio e um LVDT foram colocados no meio do vão, e os outros dois LVDTs foram colocados a cada 1/3 do vão. (Figura 3.16, 3.17 e 3.18).

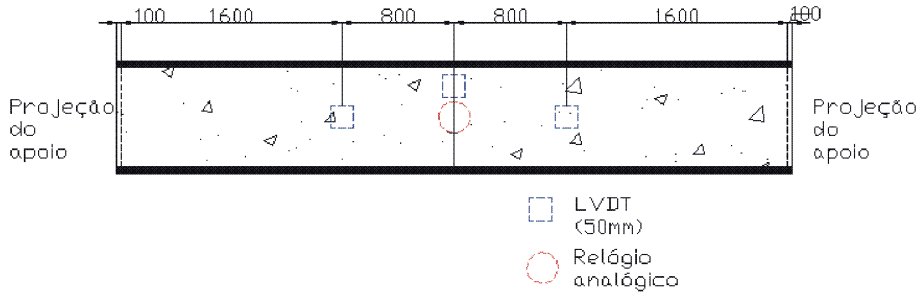

Figura 3.16 – Posicionamento dos LVDTs e do relógio na laje mista.

Figura 3.17 – Detalhe do relógio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

Figura 3.18 – Detalhe do LVDT.

No teste da laje BMP–1 foram colocados dois extensômetros no meio do vão para medir a deformação do concreto, como mostram as Figuras 3.19 e 3.21. No teste da laje BMP–2 foram colocados dois extensômetros no meio do vão para medir a deformação da fôrma (aço), como mostra a Figura 3.20.

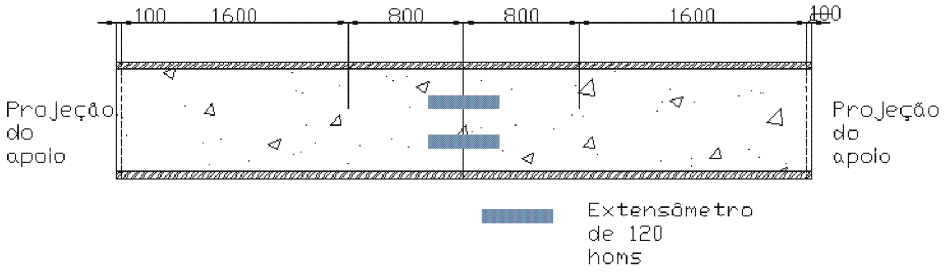

Figura 3.19 – Esquema do extensômetro no concreto na laje mista BMP–1.

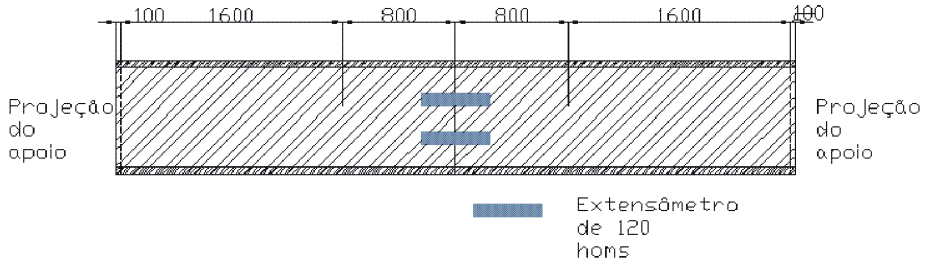

Figura 3.20 – Esquema do extensômetro no aço na laje mista BMP–2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

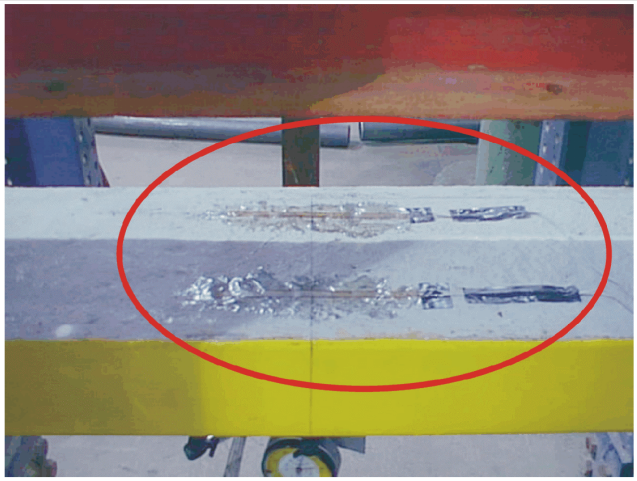

Figura 3.21 – Detalhe dos extensômetros no concreto na laje mista BMP–1.

O teste foi iniciado após a devida instrumentação da estrutura. A carga foi aplicada a cada 0,5 kN continuamente até a estrutura atingir o colapso. A medição dos deslocamentos e das deformações se fazia após cada carregamento de 0,5 kN. A célula de carga utilizada foi a de 10 toneladas.

3.3.2
Teste da Laje BMN–1

O terceiro teste (BMN–1) foi realizado com a laje de 0,2 x 5,0 metros com séptos nas extremidades, para momento negativo. Neste teste, o aço (fôrma) foi submetido à compressão e o concreto à tração. Houve a necessidade da inversão da posição da laje mista, como mostrado na Figura 3.22.

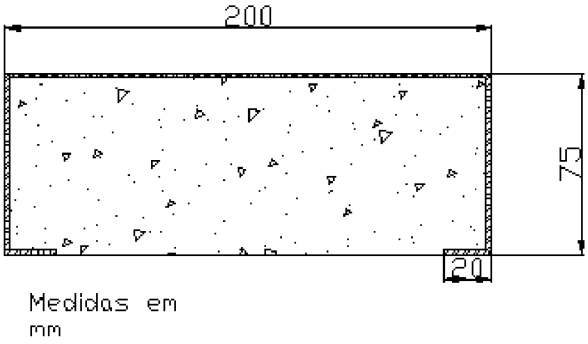

Figura 3.22 – Detalhe da laje BMN –1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

Como nos BMP–1 e BMP–2, neste teste os apoios foram colocados a 10 centímetros das extremidades, resultando em um vão livre de 4,8 metros.

Para a medição dos deslocamentos, foram utilizados três LVDTs com curso de 50 milímetros e um relógio analógico. O relógio e um LVDT foram colocados no meio do vão e os outros LVDTs foram colocados a cada 1/3 do vão. O esquema da posição dos LVDTs e do relógio foi apresentado na Figura 3.16.

Para medição da deformação foram utilizados dois extensômetros de 120 homs no concreto. O esquema da posição dos extensômetros foi mostrado na Figura 3.19.

Assim como BMP–1 e BMP–2, o teste BMN–1 foi iniciado. A célula de carga utilizada foi a 10 toneladas.

3.3.3
Teste da Laje BMP–3

O quarto teste realizado (BMP–3) foi com uma laje mista de 0,2 x 3,0 metros para momento positivo. Esta laje mista, além dos séptos nas extremidades, tinha séptos a cada terço do vão, como mostra a Figura 3.23. Todos os séptos foram feitos do próprio material da fôrma (aço) e com uma espessura de 2,10 milímetros.

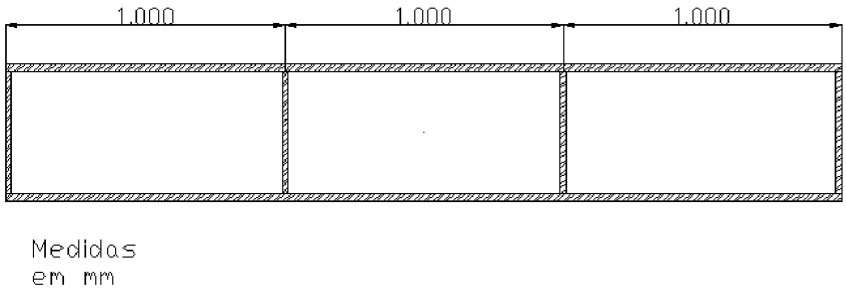

Figura 3.23 – Detalhe da fôrma com séptos nas extremidades e a cada terço do vão.

Como nos testes anteriores, os apoios foram colocados a 10 centímetros das extremidades, resultando um vão livre de 2,8 metros.

Para medição dos deslocamentos foram utilizados um relógio analógico e três LVDTs, sendo que dois eram de curso de 300 milímetros e um era de curso de 50 milímetros. O relógio e um LVDT de 300 milímetros foram colocados no

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

meio do vão, enquanto os outros dois foram colocados a cada 1/3 do vão, como mostra a Figura 3.24.

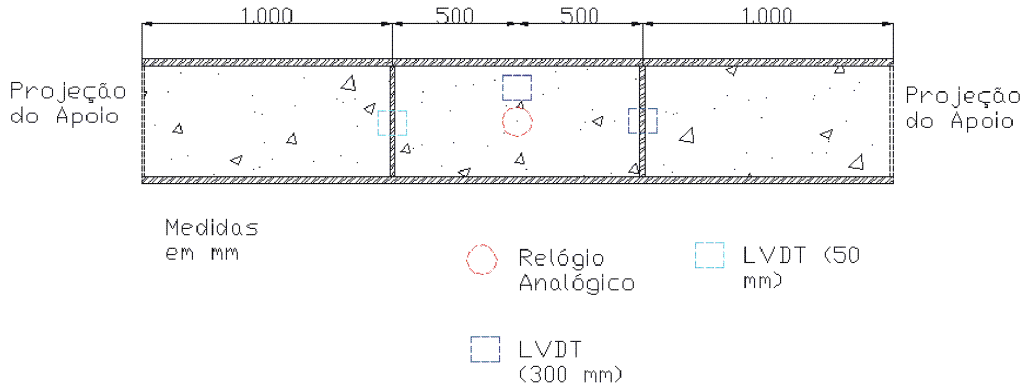

Figura 3.24 – Posicionamento dos LVDTs e do relógio na laje mista.

Não foram utilizados extensômetros para medição de deformação do concreto e do aço, pelo fato de já se ter uma idéia do comportamento da estrutura.

Como anteriormente, o teste teve início após a instrumentação. O carregamento foi realizado de 0,5 em 0,5 kN até que o colapso da estrutura fosse atingido. A medição estrutural foi realizada a cada incremento de carga, isto é, a cada 0,5 kN. A célula de carga utilizada foi a com capacidade de 10 toneladas.

3.3.4
Testes das Lajes BMN–2 e BMN–3

O quinto e o sexto testes (BMN–2 e BMN–3) realizados foram com lajes de 0,2 x 2,5 metros para momentos negativos. Essas duas lajes não tinham séptos nas extremidades e nem a cada terço do vão, mas tinham armadura de 3 ϕ 5/16”, ao longo do comprimento (Figura 3.25). Novamente foi invertida a bandeja, isto é, o aço (fôrma) foi submetido a esforços de compressão e o concreto foi submetido a esforços de tração.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

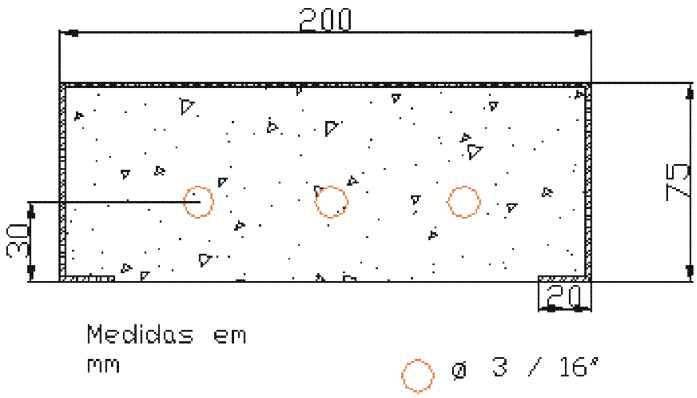

Figura 3.25 – Detalhe das lajes BMN–2 e BMN–3.

Para as medições dos deslocamentos nos testes das lajes BMN–2 e BMN–3, foram utilizados um relógio analógico e três LVDTs, sendo dois com curso de 300 milímetros e um com curso de 50 milímetros. Novamente o relógio e um LVDT (com curso de 300 milímetros) foram colocados no meio do vão e os outros dois LVDTs foram colocados em cada terço do vão (Figura 3.26). O vão livre desta laje era de 2,3 metros.

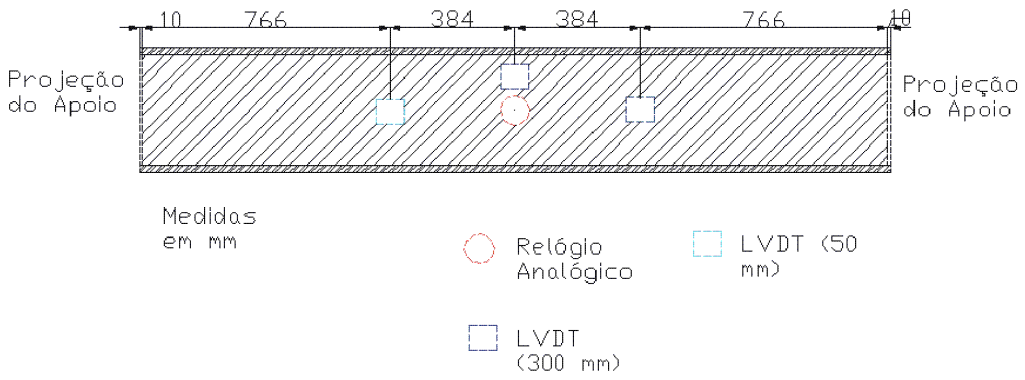

Figura 3.26 – Posicionamento dos LVDTs e do relógio nas lajes BMN–1 e BMN–2.

Não foram utilizados extensômetros para medição de deformação do concreto e do aço, pelo fato de já se ter uma idéia do comportamento da estrutura.

Novamente o teste teve início após a devida instrumentação. O carregamento foi realizado de 0,5 em 0,5 kN até atingir-se o colapso da

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

estrutura. A medição estrutural foi realizada a cada incremento de carga. A célula de carga utilizada foi a que tinha capacidade de suportar 10 toneladas.

3.3.5
Testes das Lajes BMP–4 e BMP–5

O sétimo e o oitavo testes (BMP–4 e BMP–5) realizados para momentos positivos foram com lajes mistas de 0,2 x 5,0 metros de comprimentos, com séptos nas extremidades e a cada terço do vão, conforme apresentado na Figura 3.27.

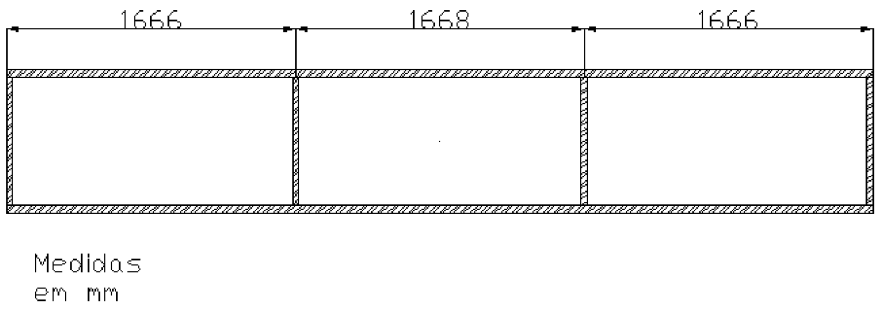

Figura 3.27 – Detalhe da fôrma com séptos nas extremidades e em cada terço do vão.

Os equipamentos utilizados para medições de deslocamentos foram: três LVDTs, sendo um com curso de 50 milímetros e os outros dois com curso de 300 milímetros, e um relógio analógico. Um LVDT de curso de 300 milímetros e o relógio foram colocados no meio do vão e os outros LVDTs foram colocados a cada terço do vão, como mostra a Figura 3.28.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

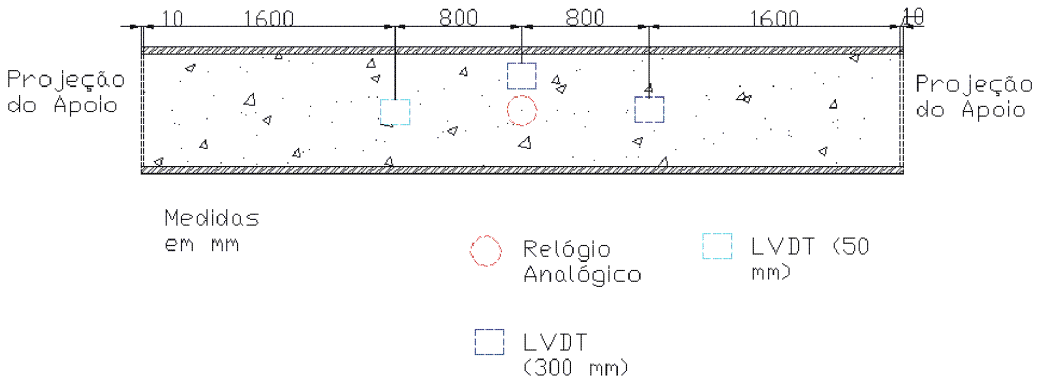

Figura 3.28 – Posicionamento do relógio e dos LVDTs nas lajes mistas.

O teste foi iniciado após a devida instrumentação. A carga foi aplicada continuamente até o colapso das estruturas em intervalos de 0,5 kN e as medições foram feitas a cada incremento de carga. A célula de carga utilizada no ensaio tinha capacidade de suportar 10 toneladas.

3.3.6
Testes das Lajes BMP–6 e BMP–7

Os testes BMP–6 e BMP–7 consistiram na utilização de lajes mistas de dimensões de 0,58 x 5,0 metros, testadas para momentos positivos. Essas lajes mistas eram constituídas da junção de três bandejas, como mostra a Figura 3.31. Essas bandejas foram soldadas entre si. As soldas tinham o comprimento de 100 milímetros e eram espaçadas de 300 milímetros. (Figuras 3.29 e 3.30).

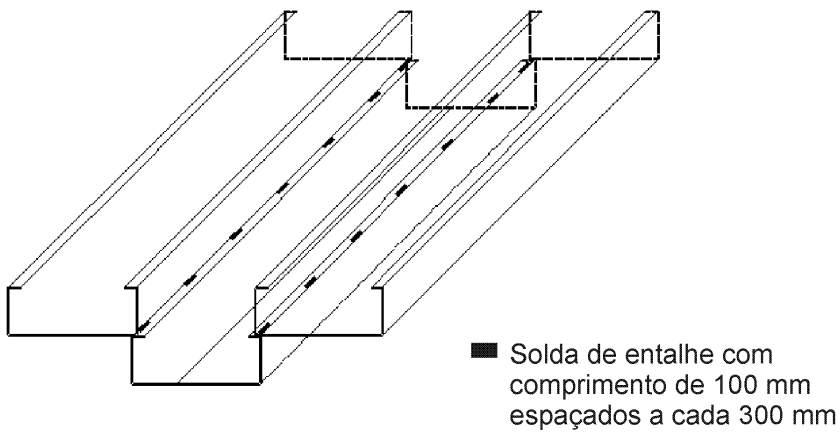

Figura 3.29 – Detalhe das fôrmas soldadas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

Figura 3.30 – Detalhe da solda nas fôrmas.

As lajes mistas tinham séptos nas extremidades e em cada terço do vão, e uma armadura de comprimento de 4,0 metros centrados em relação ao vão (3 ϕ de 8 milímetros). Esta armadura foi colocada somente na bandeja mais baixa, a uma altura de 30 milímetros da fôrma. Para obter esse espaçamento, foram confeccionados espaçadores de vergalhões dobrados, como mostra a Figura 3.32. Essas lajes tiveram também uma capa de concreto de 50 milímetros de espessura. Entre as fôrmas e a capa de concreto, foi colocada uma malha feita com vergalhões de bitola de 5,0 milímetros a cada 200 milímetros em ambas as direções. O detalhe da armadura foi apresentado na Figura 3.8.

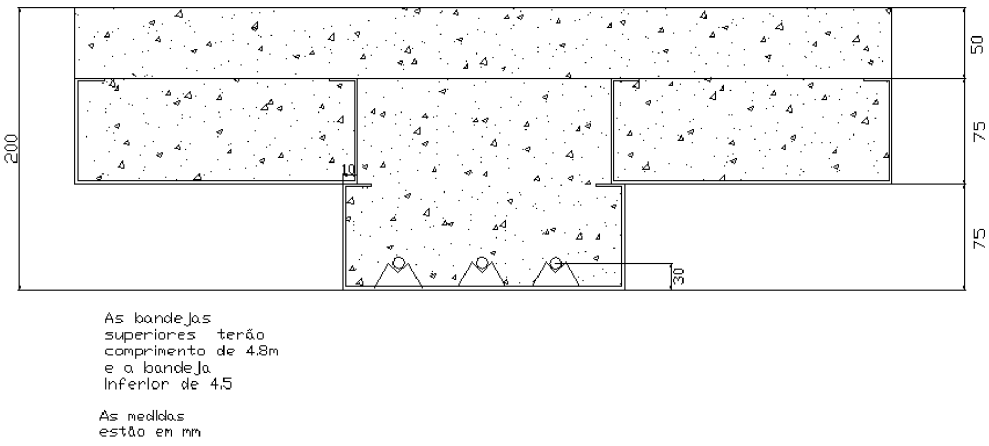

Figura 3.31 – Detalhe da seção transversal das lajes BMP–6 e BMP–7.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

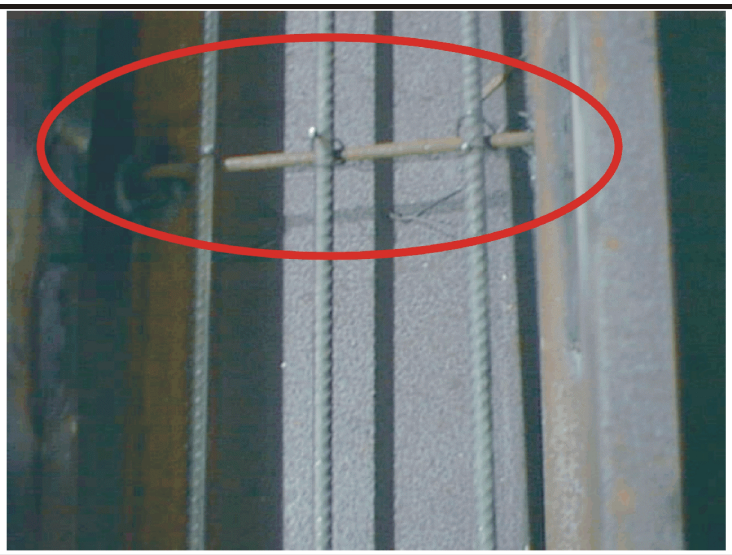

Figura 3.32 – Detalhe dos espaçadores de vergalhões dobrados.

Como a armadura era ao longo do comprimento das lajes, foi necessário perfurar os séptos nos terços do vão para a passagem dos vergalhões, como mostram as Figuras 3.33 e 3.34.

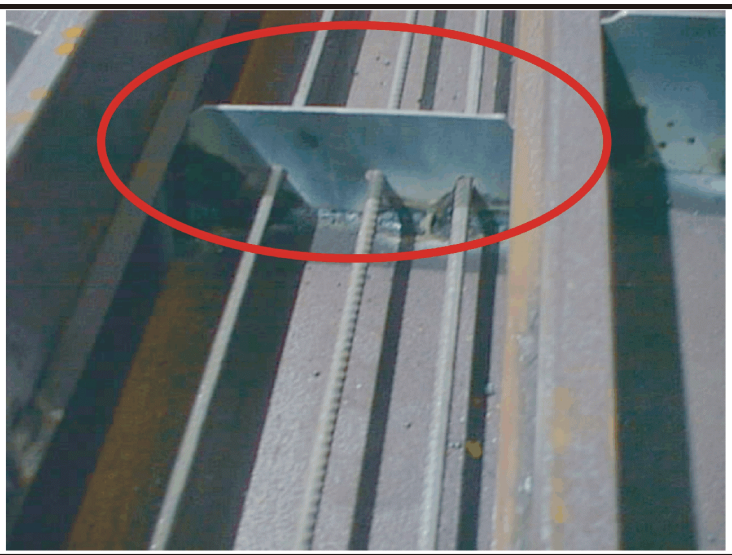

Figura 3.33 – Detalhe dos vergalhões nos séptos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA

Figura 3.34 – Vista superior da laje.

Para medição dos deslocamentos, foram utilizados somente três relógios analógicos. Os relógios foram posicionados da seguinte maneira: um no centro do vão e os outros dois em cada terço. A célula de carga utilizada no teste foi a que tinha capacidade de suportar 20 toneladas.

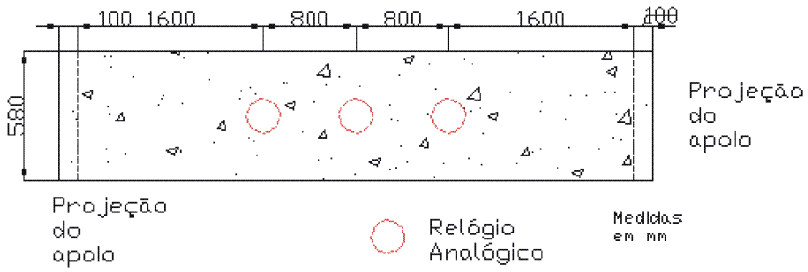

Figura 3.35 – Posicionamento dos relógios na laje mista.

Após a devida instrumentação o teste foi iniciado. A carga foi aplicada continuamente em intervalos de 200 Kg até a estrutura atingir o colapso.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115543/CA