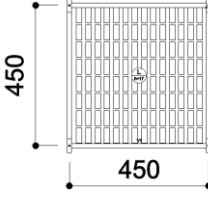
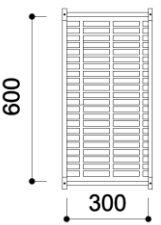


As dimensões das peças a serem concretadas nos dois modelos eram idênticas, variando-se em cada caso a armadura da nervura principal e também inserindo-se, em alguns casos, uma tubulação de PVC, no diâmetro de 12,5 mm, disposta longitudinalmente na mesa da seção de concreto. Os diâmetros das armaduras que foram utilizadas aparecem especificados no item anterior deste trabalho.

As faixas de laje escolhidas para estudo (nervuras) possuem relação entre a seção e o comprimento que as torna semelhantes a vigas. Por isso, para designá-las adotou-se neste texto a nomenclatura “V”, seguida pelo número de cada elemento. A fim de resumir os dados de cada faixa a ser confeccionada e ensaiada será apresentada a tabela a seguir (tabela 7).

Tabela 7 – Resumo das peças executadas, calculadas pelos modelos I e II

Modelo de Cálculo	Dimensões dos modelos	Faixas (vigas)	Quant. de faixas (vigas)	$A_{s,adotado}$ (cm ² /nerv.) (nerv.princ.) (nerv. sec.)	Armadura (barras)	Obs:
I		V-1	1	0,5 1,51	1Ø10mm 3Ø8mm	s/ conduíte
		V-2A	1	0,79 1,51	1Ø10mm 3Ø8mm	c/ conduíte
II		V-2B	1	0,5 1,51	1Ø8mm 3Ø8mm	c/ conduíte
		V-3	1	0,79 1,51	1Ø8mm 3Ø8mm	s/ conduíte

Para os ensaios das faixas a serem estudadas e que são baseadas nos modelos I e II, foram confeccionadas um total de cinco vigas, sendo duas vigas do modelo I e duas vigas do modelo II. Em duas vigas foram inseridas tubulações ao longo da mesa com o objetivo de verificar a influência da mesma em uma laje com altura de mesa de 4 cm.

As características de elementos do tipo V-1, V-2 e V-3, sem inserção de tubulação na mesa, são apresentadas na figura a seguir (figura 58)

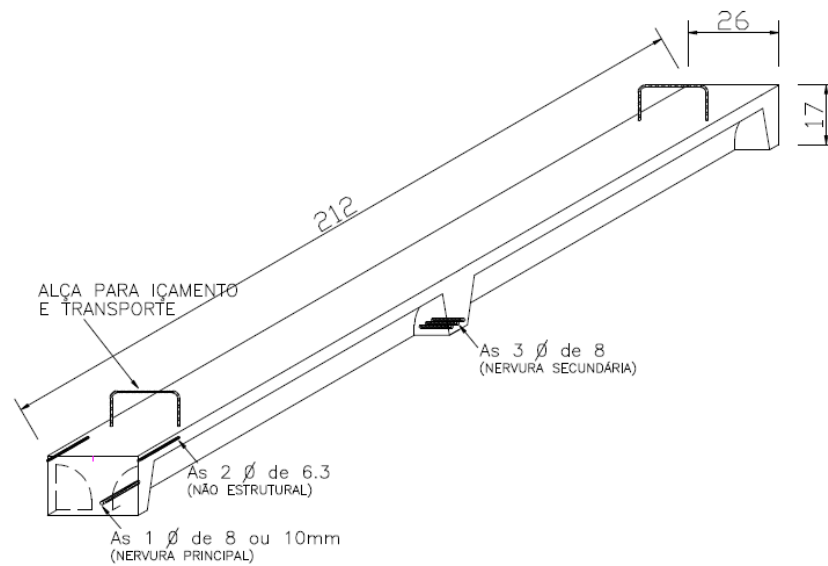


Figura 58 – Aspecto de modelo de viga sem tubulação inserida

Para facilitar o transporte e o içamento de cada peça até a prensa onde seriam realizados os ensaios, cada viga recebeu duas alças de barras no diâmetro 6.3 mm. As vigas receberam também uma armadura na mesa, sem finalidade estrutural, apenas para prevenir fissuração durante o transporte.

As vigas que receberam tubulações de PVC em sua mesa tiveram, também, a colocação de alças e armaduras para prevenir fissuras no transporte. O aspecto destes modelos com tubulação inserida aparece exposto na figura a seguir (figura 59)

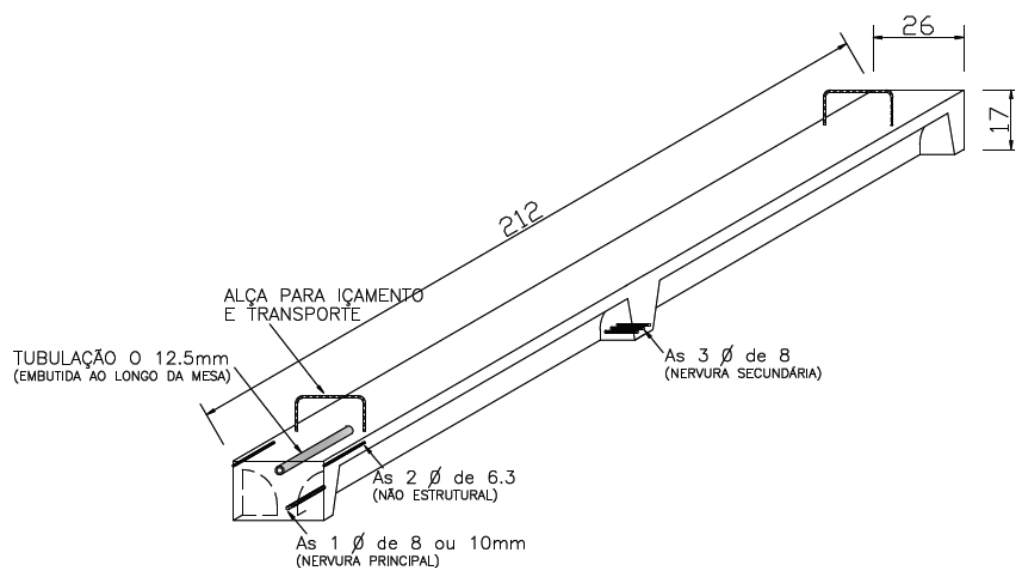


Figura 59 – Aspecto de modelo de viga com tubulação inserida

O painel para a confecção dos elementos foi montado de forma que pudessem ser utilizados os barrotes cedidos pela empresa que monta lajes semicilíndricas. Esses barrotes foram dispostos lado a lado como o usual, sendo montados de modo que a desforma fosse feita pela parte inferior do painel.

Com o objetivo de não atrapalhar a rotina e logística dos serviços do laboratório, optou-se por montar o painel em área externa do laboratório, conforme o apresentado na foto a seguir (figura 60). Esta montagem foi feita por funcionários da empresa fabricante de cubas semicilíndricas.



Figura 60 – Painel para concretagem das faixas dos modelos I e II

As faixas que compõe os modelos foram obtidas através da separação de cada elemento por montantes de madeira, dispostos conforme a figura a seguir (figura. 61).

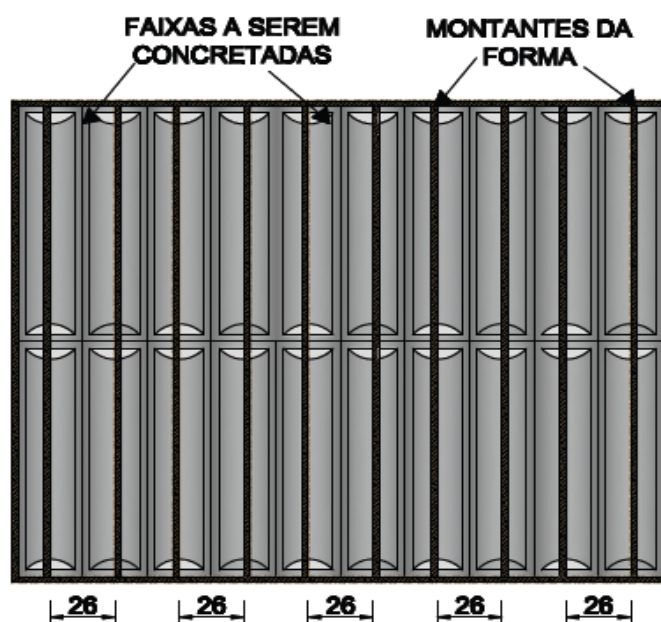


Figura 61 – Planta do painel de fôrma dos elementos dos modelos I e II

A foto a seguir (figura 62) apresenta a fôrma com o conjunto de faixas em fase de montagem e armadura. Podem ser observadas também, as armaduras já posicionadas e as tubulações de PVC (conduíte) dispostas ao longo da mesa.



Figura 62 – Painel para concretagem dos elementos dos modelos I e II

O concreto cujo f_{ck} definido foi de 25,0 MPa foi dosado e misturado no próprio laboratório, mas por limitações no volume da betoneira, foi necessária a utilização de um total de três misturas de concreto para concluir todo o preenchimento das faixas dos modelos I e II. A concretagem foi executada por funcionários cedidos pela empresa que fabrica e monta fôrmas com cubas semicilíndricas.

As proporções de cada material usado nas composições dos traços serão apresentadas nas tabelas a seguir (tabelas 8 e 9):

Tabelas 8 e 9 – Materiais utilizados na dosagem do 1º, 2º e 3º traços

	Materiais	Quantidade	Unidade	
1º Mistura e 2º Mistura	Brita 0	200,00	Kg	Slump = 16 cm
	Areia	220,00	Kg	
	Cimento	100,00	Kg	
	Água	55,00	l	
	Fator a/c	0,55		
3º Mistura	Materiais	Quantidade	Unidade	Slump = 19 cm
	Brita 0	60,00	Kg	
	Areia	60,00	Kg	
	Cimento	30,00	Kg	
	Água	18,00	l	
	Fator a/c	0,60		

Antes do início do lançamento do concreto nas fôrmas foi realizado o “slump test”, para verificar o abatimento do concreto. Foram moldados, também, um total de 14 corpos de prova cilíndricos, sendo 11 nas dimensões 10cm x 20cm e 03 nas dimensões 15cm x 30cm (figuras 63 e 64).



Figuras 63 e 64 – Ensaio de abatimento e corpos de prova moldados para elementos dos modelos I e II

O lançamento do concreto no painel de formas apresentado na foto 8, foi efetuado pela parte superior da mesma (figura 65). Procedeu-se a seguir, uma regularização da superfície, visando deixá-la o mais plano o possível para facilitar as instrumentações e os ensaios subseqüentes.



Figura 65 – Lançamento do concreto na forma dos modelos I e II

O aspecto final dos elementos concretados, após a desforma, será apresentado na foto a seguir (figura 66).



Figura 66 – Aspecto, após a desforma, das faixas dos modelos I e II

3.2.2 Painéis de laje PL-01 e PL-02

A primeira etapa para confecção dos modelos reduzidos de laje PL-01 e PL-02 foi a recriação em escala 1:2 de um meio-barrote do tipo BRC-130. Foram cogitados vários materiais, até que chegou-se a conclusão que o mais viável (técnica e economicamente) seria uma combinação entre compensado e meia seção de um tubo de PVC no diâmetro de 100 mm. Estas réplicas reduzidas de meio-barrote foram confeccionadas nas oficinas da empresa fabricante de cubas semicilíndricas, sendo posteriormente transportadas para o laboratório da UERJ.

O aspecto de um meio-barrote reduzido é mostrado na foto (figura 67). Cada modelo foi confeccionado de acordo com as medidas apresentadas na figura 68.



Figura 67 – Aspecto de um meio-barrote reduzido

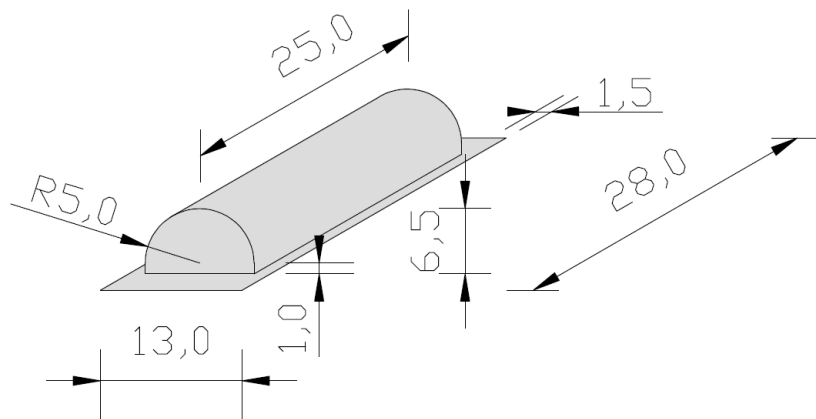


Figura 68 – Dimensões do meio-barrote reduzido em escala 1:2

Para tornar mais fácil a montagem das armaduras nas fôrmas dos painéis, cada um deles foi montado sobre estrutura suspensa de madeira. Estas estruturas possuíam um fundo sobre o qual apoiavam-se os barrotes reduzidos. Na foto (figura 69) 14 pode-se visualizar a fôrma confeccionada para PL-01, em seguida, na foto (figura 70) apresenta-se a fôrma confeccionada para PL-02.



Figura 69 – Aspecto da fôrma PL-01



Figura 70 – Aspecto da fôrma PL-02

Cada uma das lajes recebeu sua respectiva armadura que foi calculada de acordo com os itens 3.1.4 e 3.1.5, para um cobrimento de 1,0 cm. Além disso, em cada painel de laje foi adicionada armadura não estrutural composta por malha de aço de Φ 3.8mm (figura 70), com a finalidade de evitar-se a fissuração das peças durante o transporte no laboratório. Foram adicionadas alças compostas por fios Φ 5.0 mm, para o içamento das peças.

A fixação das armaduras na posição desejada foi feita com arame de aço recozido, comumente utilizado neste tipo de tarefa em obras (figura 71).



Figura 71 – Detalhe da fixação das armaduras

A configuração das armaduras de flexão de PL-01 e PL-02, já concluídas, serão apresentadas nas fotos (figuras 72 e 73).



Figura 72 – Armadura de flexão de PL-01



Figura 73 – Armadura de flexão de PL-02

O concreto com f_{ck} definido de 25,0 MPa foi dosado e misturado no próprio laboratório, mas por limitações no volume da betoneira, foi necessária a utilização de um total de duas misturas de concreto para concluir todo o preenchimento das formas dos painéis de laje PL-01 e PL-02. As proporções de cada material usado nas composições dos traços serão apresentadas nas tabelas a seguir (tabelas 10 e 11):

Tabela10 – Resumo dos materiais usados na dosagem do concreto de PL-01

Dosagem do traço de concreto				
Laje PL-01	Materiais	Quantidade	Unidade	Slump = 10 cm
	Brita 0	40,70	Kg	
	¹ Areia	37,00	Kg	
	² Cimento	18,00	Kg	
	Água	9,00	l	
	Fator a/c	0,50		
1- Umidade considerada 4 %				
2-Cimento CII-F32- Marca TUPI				

Tabela 11 – Resumo dos materiais usados na dosagem do concreto de PL-02

Dosagem do traço de concreto				
Laje PL-02	Materiais	Quantidade	Unidade	Slump = 11 cm
	Brita 0	40,70	Kg	
	¹ Areia	37,00	Kg	
	² Cimento	18,00	Kg	
	Água	8,50	l	
	Fator a/c	0,47		
1- Umidade considerada 5 %				
2-Cimento CII-F32- Marca NASSAU				

Para a concretagem de ambos os painéis de laje foi utilizado cimento Portland CP-II. A quantidade de cimento de um mesmo fabricante não estava disponível no laboratório, sendo necessária a utilização de cimento de fabricantes diferentes, sendo estes: Tupi e Nassau. Esta particularidade dos traços é apresentada nas tabelas 10 e 11.

A dosagem dos traços foi feita em peso, ou seja, os sacos contendo os materiais eram depositados sobre a balança do laboratório até atingirem o peso determinado conforme o apresentado na tabelas 10 e 11 (figura 74).



Figura 74 – Dosagem da brita usada no concreto de PL-01 e PL-02

Antes de proceder-se o lançamento do concreto nas fôrmas, foi realizado ensaio de abatimento (figuras 75 e 76).



Figuras 75 e 76 – Realização de “slump test” no concreto de PL-01 e PL-02

Considerando a diferença de fabricantes dos cimentos Portland utilizados, foram moldados corpos de prova para ambos os painéis de laje concretados. Os corpos de prova foram etiquetados de acordo com o painel de laje a que pertenciam. Foram moldados corpos de prova de 10cm x 20cm para ensaio de compressão e, também, elementos de 15cm x 30cm para realização de ensaio de compressão diametral (figura 77)



Figura 77 – Corpos de prova de PL-01 e PL-02

Objetivando uma maior facilidade na desforma das peças, e para evitar que houvesse danos nos painéis de laje durante a retirada dos barrotes reduzidos, utilizou-se desmoldante da marca “Desmol” fabricado pela Vedacit. O desmoldante foi aplicado sem diluição sobre os elementos internos da fôrma com o auxílio de trincha (figura 78).



Figura 78 – Aplicação de desmoldante

Durante a concretagem da parte das nervuras das lajes, tomou-se cuidado para que não fossem partidos nenhum dos fios da instrumentação que já se encontrava fixada na armadura de flexão. Além disso, foi feita a concretagem deixando-se uma camada suficiente para a colocação da armadura contra fissuração da mesa (armadura não estrutural), conforme figura 79.



Figura 79 – Concretagem e posicionamento da armadura não estrutural

O concreto foi lançado e vibrado pela parte superior da fôrma, sendo posteriormente regularizado com o auxílio de régua de madeira. Posteriormente, foi feita uma melhor regularização da superfície com o auxílio de desempenadeira, aplicando-se acabamento liso com a colher de pedreiro. Esse acabamento visava obter superfície regular que possibilitasse uma facilitação da instrumentação (colagem de strain gages), como o apresentado na foto (figura 80).



Figura 80 – Regularização da superfície do painel de laje PL-02

O aspecto final, após a conclusão da concretagem de PL-01 e PL-02 serão apresentados nas fotos (figuras 81 e 82).



Figura 81 – PI-01 após a concretagem



Figura 82 – PI-02 após a concretagem

A desforma foi efetuada através da retirada consecutiva de cada um dos moldes de meio-barrotes reduzidos. Cada uma das peças foi retirada com o auxílio de formão, sendo necessária a desmontagem total de alguns moldes que apesar da aplicação do desmoldante ainda permaneciam aderidos ao concreto, devido a imperfeições em sua confecção. A aparência de PL-01 durante a operação de desforma é apresentada na foto (figura 83).



Figura 83 – PL-01 após a retirada de parte das fôrmas de barrotes reduzidos

Depois da retirada total das fôrmas, o aspecto final da parte inferior dos painéis (nervuras) apresentou-se conforme o exposto nas fotos (figuras 84 e 85).



Figuras 84 e 85 – Aspecto final de PL-01 e PL-02

3.3 Ensaios dos materiais utilizados

3.3.1 Materiais utilizados nos modelos I e II – elementos de faixa

Parte do concreto que foi utilizado nas peças dos modelos I e II (faixas) foi, também, empregada na moldagem de corpos-de-prova (CP's) cilíndricos de acordo com as recomendações da NBR– 5738 (2003). Na ocasião foram moldados para os modelos I e II um total de nove corpos-de-prova, estando estes divididos em espécies de 10cm x 20cm e 15cm x 30cm.

O objetivo desta série de ensaios foi a caracterização da resistência a compressão, segundo o proposto pela NBR–5739 (2007). A fim de apresentar a evolução das diversas resistências à compressão axial, de acordo com a idade de “j” dias foi elaborada a tabela a seguir (tabela 12):

Tabela 12 – Resumo da resistência à compressão na idade de “j” dias

Modelos I e II	Idade (j dias)	Nº. Do CP	Carga de ruptura (kN)	f_{cj} (MPa)
	j = 7 dias	1	121,80	15,508
		2	132,60	16,883
	j =14 dias	3	193,60	24,650
		4	149,60	19,048
	j = 28 dias	5	186,80	23,784
		6	225,10	28,661
		7	174,40	22,205

A série de ensaios de compressão diametral foi realizada de acordo com o preconizado pela NBR – 7222 (2011), objetivando a obtenção da resistência à tração indireta do concreto. Os resultados desta série de ensaios foram resumidos na tabela abaixo (tabela 13):

Tabela 13 – Resumo da resistência à compressão diametral para de “j” dias

Resultados dos ensaios de compressão diametral				
Modelos I e II	Idade (j dias)	Nº. Do CP	Carga de ruptura (kN)	$\sigma_{\text{Tração}}$ (MPa)
	j = 28 dias	8	100,00	1,41
		9	150,00	2,12
Obs : Dimensões dos CPs - 15 x 30cm				

O aspecto de um dos corpos de prova durante o ensaio e ao término deste, já rompido por compressão diametral, é apresentado na foto a seguir (figuras 86 e 87).



Figuras 86 e 87 – Corpos de prova durante e após o ensaio de compressão diametral

3.3.2 Materiais do modelo reduzido PL-01

Para a construção do modelo reduzido PL-01 foi utilizado fio CA-60, no diâmetro de 4,2mm. Este fio de aço foi ensaiado e apresentou comportamento característico dos aços CA-60, ou seja, não teve patamar de escoamento bem definido, conforme ilustrado no gráfico tensão x deformação a seguir (figura 88):

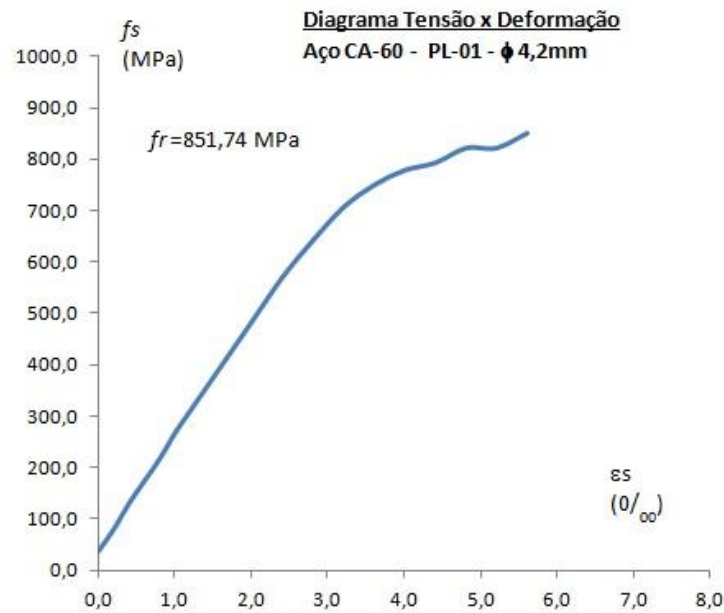


Figura 88 – Diagrama tensão x deformação para aço CA-60 de PL-01

Parte do concreto que foi utilizado em PL-01 foi, também, empregada na moldagem de corpos-de-prova (CP's) cilíndricos de acordo com as recomendações da NBR – 5738 (2003). Na ocasião foram moldados para este modelo um total de seis corpos-de-prova de 10cm x 20cm. Os resultados dos ensaios de compressão axial foram resumidos na tabela 14 apresentada a seguir:

Tabela 14 – Resumo da resistência à compressão na idade de “j” dias

Resultados dos ensaios de compressão axial			
	Idade (j dias)	Carga de ruptura (kN)	f_{cj} (MPa)
Laje PL-01	j = 3 dias	175,00	22,282
		166,00	21,136
	j = 13 dias	215,60	27,451
		213,60	27,196
	j = 28 dias	243,70	31,029
		250,90	31,946
Obs :1-Dimensões dos CPs - 10 x 20cm			
2-Cimento CII-F32- Marca TUPI			

Para garantir um melhor ajuste entre os pratos da prensa e a superfície dos corpos de prova, estes receberam um capeamento de enxofre (figura 89).



Figura 89 – Corpo de prova revestido com enxofre

A realização de um dos ensaios aparece mostrada na foto a seguir (figura 90)



Figura 90 – Corpo de prova durante o ensaio de compressão axial

3.3.3 Materiais do modelo reduzido PL-02

De forma análoga ao modelo anterior, na construção do modelo reduzido PL-02 foi utilizado fio CA-60, mas o diâmetro utilizado foi de 5.0mm. Este fio de aço foi ensaiado e igualmente apresentou comportamento característico dos aços CA-60, conforme ilustrado no gráfico tensão x deformação a seguir (figura 91):

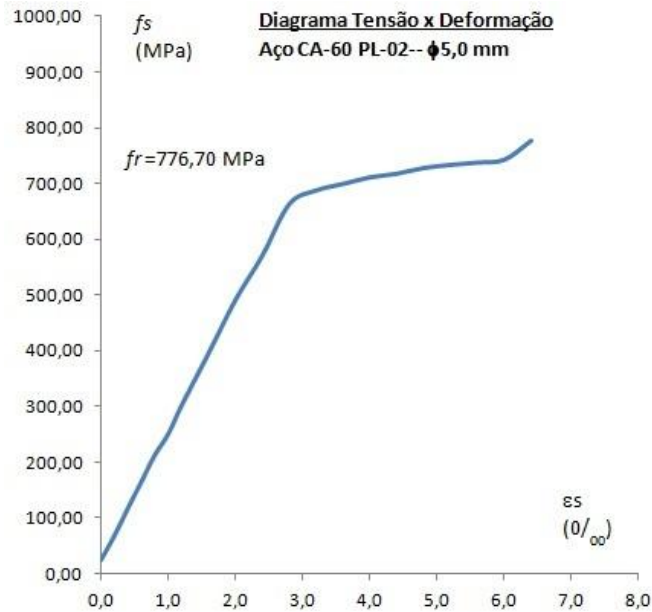


Figura 91 – Diagrama tensão x deformação para aço CA-60 de PL-02

O ensaio de tração do fio de aço CA-60 utilizado em PL-02 aparece demonstrado na foto a seguir (figuras 92 e 93):



Figuras 92 e 93 – Ensaio de tração do aço

Em PL-02 foi, também, empregada na moldagem de corpos-de-prova (CP's) cilíndricos de acordo com as recomendações da NBR – 5738 (2003). Foram moldados para este modelo um total de 04 corpos-de-prova de 10cm x 20cm. Os resultados dos ensaios de compressão axial foram resumidos na tabela 15 apresentada a seguir:

Tabela 15 – Resumo da resistência à compressão na idade de “j” dias

Resultados dos ensaios de compressão axial			
	Idade (j dias)	Carga de ruptura (kN)	f_{cj} (MPa)
Laje PL-02	j = 3 dias	Não moldados	
	j = 13 dias	155,20	19,76
		--	--
	j = 28 dias	184,30	23,47
		184,10	23,44
Obs :1-Dimensões dos CPs - 10 x 20cm			
2-Cimento CII-F32- Marca NASSAU			

Devido ao volume reduzido de concreto que a betoneira que estava em operação no laboratório era capaz de produzir, não foi possível moldar os corpos de prova para j = 3 dias. A apresentação de um dos corpos-de-prova de PL-02 sendo ensaiado será mostrada na foto (figura 94) a seguir:



Figura 94 – Corpo de prova durante o ensaio de compressão axial

O ensaio de compressão diametral foi realizado de acordo com o proposto pela NBR – 7222 (2011), com o objetivo de obter a resistência à tração indireta do concreto. Os resultados deste ensaio foi resumido na tabela abaixo (tabela 16):

Tabela 16 – Resumo da resistência à compressão diametral para de “j” dias

Resultados dos ensaios de compressão diametral			
Laje PL-02	Idade (j dias)	Carga de ruptura (kN)	σ Tração (MPa)
	j = 28 dias	139,60	1,97
Obs : Dimensões dos CPs - 15 x 30cm			

Para ilustrar a realização do ensaio de compressão diametral realizado no CP de PL-02, serão apresentadas as fotos a seguir (figuras 95 e 96).



Figuras 95 e 96 – Corpo de prova durante e após o ensaio de compressão diametral

3.4 Instrumentação dos modelos

3.4.1 Procedimentos gerais

A metodologia empregada na instrumentação dos modelos seguiu o proposto por Lima (s.d.), e as práticas aplicadas por Schwetz (2011) em seu estudo experimental de lajes nervuradas. De acordo com Andolfato *et al* (2004), em geral, a instrumentação pode ser dividida nas seguintes tarefas:

- Marcação da posição pré-definida para instrumentação;
- Preparo da superfície;
- Limpeza da superfície;
- Colagem dos extensômetros (strain gages);
- Teste preliminar dos strain gages;
- Soldagem dos fios nos terminais;
- Proteção com resinas a base de silicone;

Nos elementos utilizados nos ensaios deste trabalho, foram instrumentados ao todo quatro peças, sendo: uma do modelo I; uma do modelo II; o painel de laje PL-01; painel de laje PL-02. Cada uma das peças recebeu instrumentação tanto no concreto (zona comprimida e zona tracionada) como no aço (barras ou fios). Alguns detalhes da metodologia utilizada na instrumentação serão melhor analisados a seguir.

3.4.1.1 Marcação da posição da instrumentação

A marcação do posicionamento da instrumentação seguiu um planejamento que visava a obtenção das tensões, a partir das deformações no concreto e no aço. No caso específico dos elementos pertencentes aos modelos I e II a instrumentação foi posicionada em pontos onde, durante a execução das peças, foram deixados pequenos prismas de EPS (isopor) com dimensões aproximadas de 3,5cm x 3,5cm x 2,0cm.

A numeração dos extensômetros (ou strain gages) é composta da letra “E”, seguida do respectivo índice indicando o material que foi instrumentado e o número

do extensômetro. Assim, por exemplo, o extensômetro de nomenclatura E_c-1 é o primeiro extensômetro instalado no concreto.

As posições de cada extensômetro das vigas V-2A e V-2B são apresentadas nas figuras a seguir (figuras 97 e 98), sendo estas medidas tomadas em relação ao eixo dos strain gages.

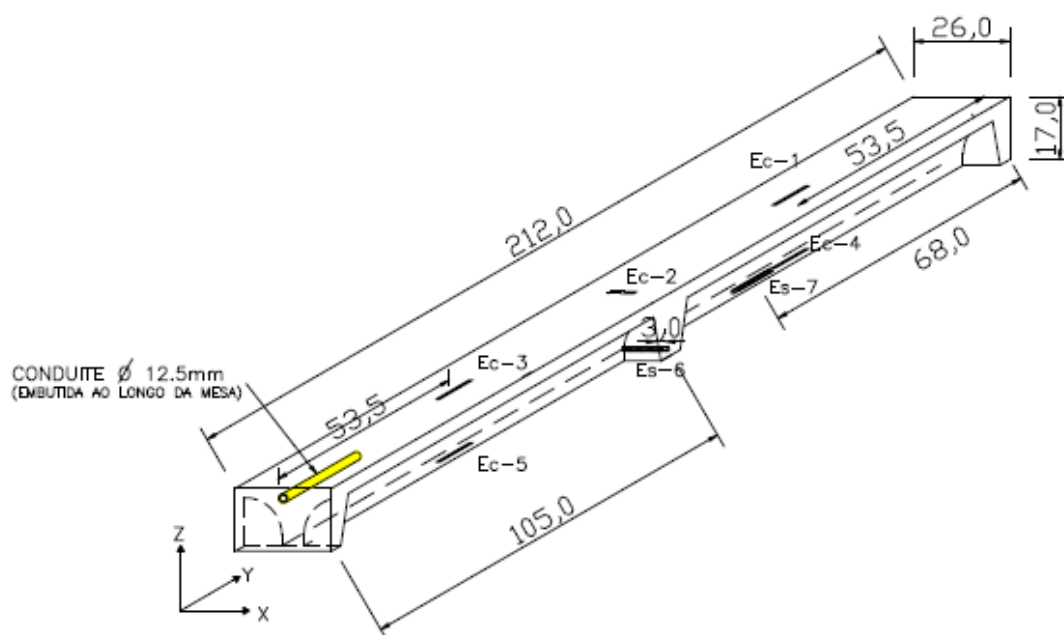


Figura 97 - Viga V-2A

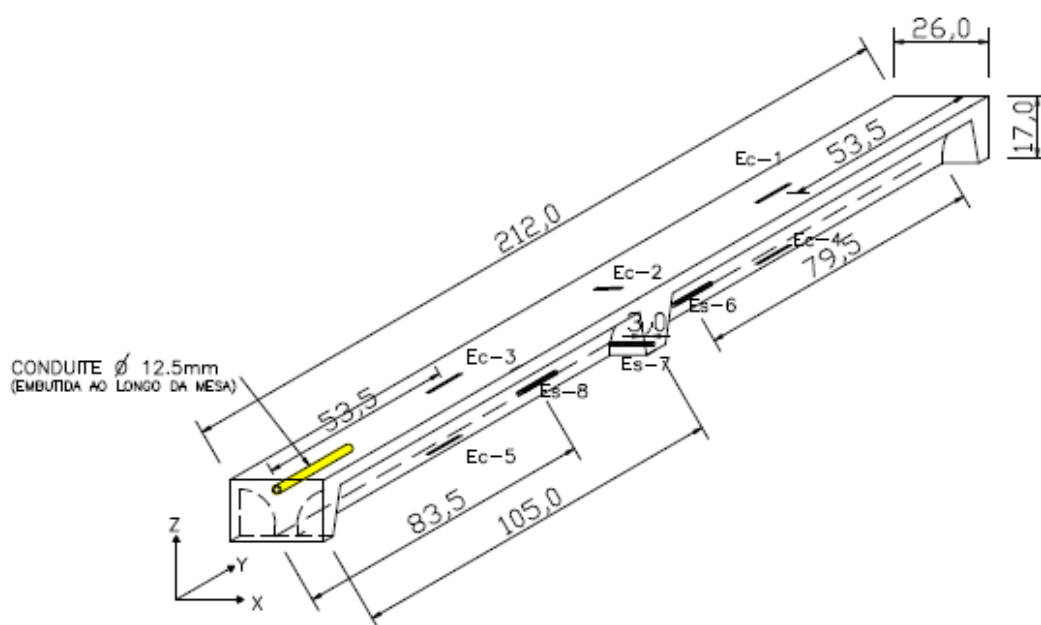


Figura 98 - Viga V-2B

Para os painéis de laje PL-01 e PL-02, os critérios usados na denominação, numeração e posicionamento dos extensômetros foi semelhante aos adotados e descritos nos modelos anteriores. O posicionamento dos strain gages em PL-01 e PL-02 será apresentado nas figuras a seguir (figuras 99 e 100).

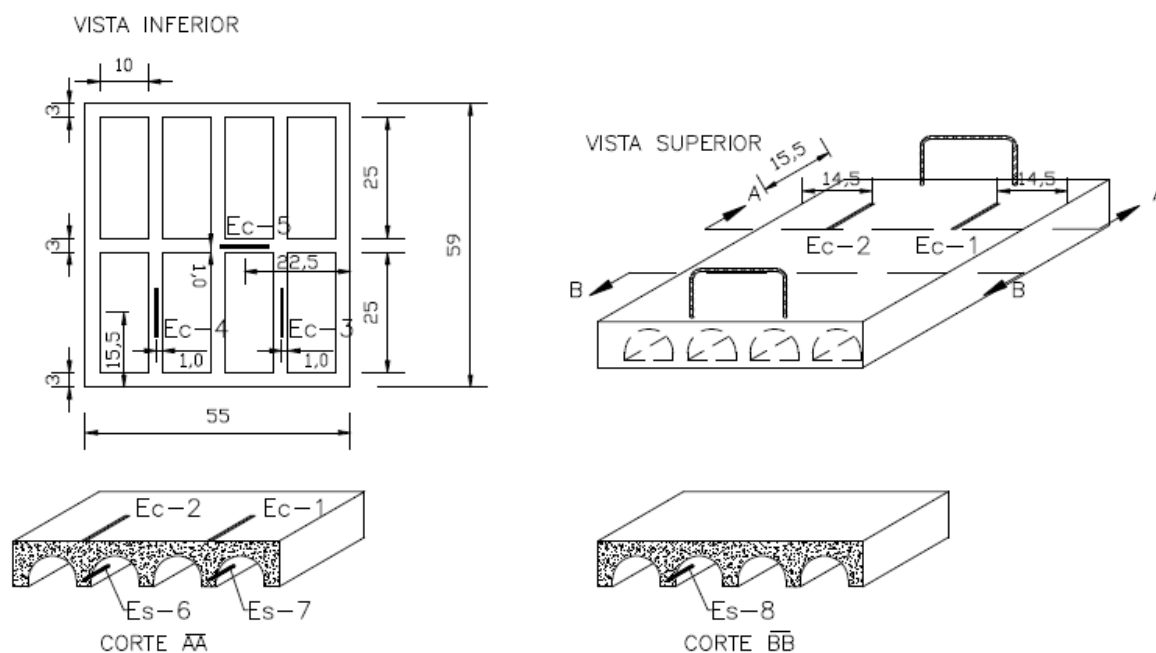


Figura 99 – Posicionamento dos strain gages em PL-01

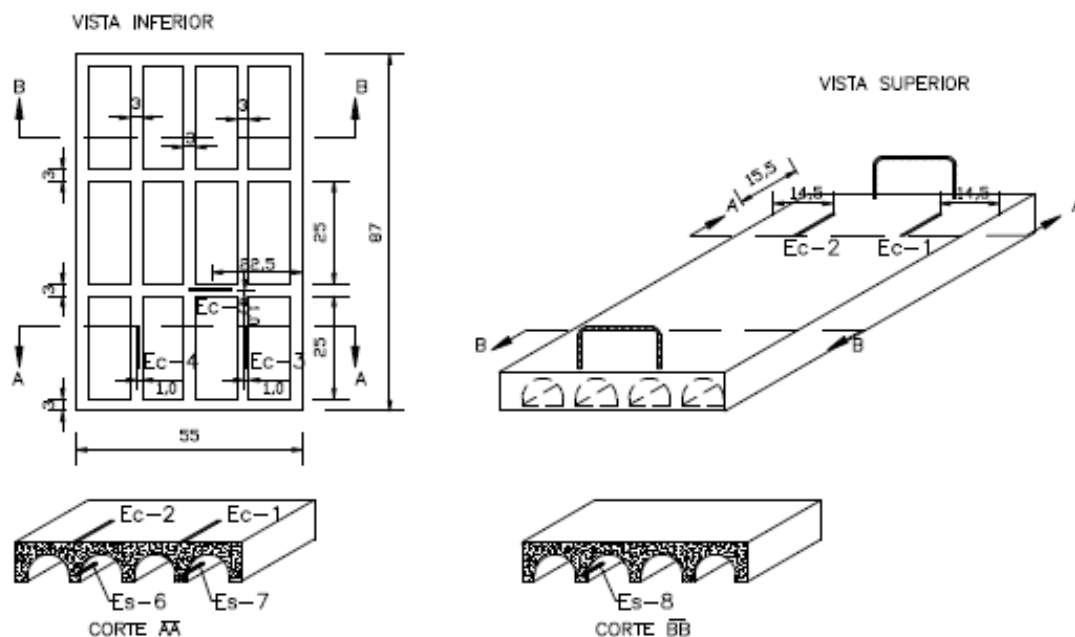


Figura 100 – Posicionamento dos strain gages em PL-02

3.4.1.2 Preparo das superfícies

Antes de proceder-se a colagem dos extensômetros é necessária uma regularização e um preparo da superfície. No caso do concreto, esse preparo consiste em regularizar a superfície com lixa até obter-se superfície o mais plana possível. A foto a seguir (figura 101) apresenta o preparo da peça do modelo I.



Figura 101 – Preparo de superfície de concreto para colagem de extensômetro

Para as armaduras o procedimento de preparo consiste em criar uma superfície regular na barra ou fio de aço. Para tal, utilizou-se uma lima fina (figura 102) para metal, em procedimento semelhante ao adotado por Schwetz (2011) com o intuito de retirar-se as nervuras do aço para possibilitar a colagem dos strain gages. No entanto, deve tomar-se certo cuidado para não diminuir demasiadamente a seção da barra ou fio.

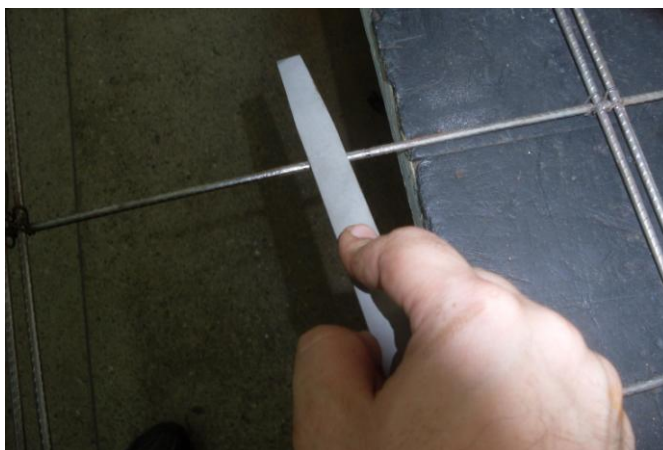


Figura 102 – Preparo de superfície do aço para colagem de extensômetro

Em seguida, retira-se o restante das imperfeições e regulariza-se a superfície com lixa conforme o apresentado na foto a seguir (figura 103).



Figura 103 – Preparo de superfície do aço para colagem de extensômetro

3.4.1.3 Limpeza das superfícies

A fase de limpeza consiste na retirada de quaisquer resíduos que possam dificultar a colagem dos extensômetros. De acordo com o proposto por Lima (s.d.), utilizou-se o álcool isopropílico. No caso das armaduras foi também necessária uma limpeza preliminar com flanela embebida em redutor de 1^a, para retirada de resíduos de oleosidade que pudessem estar presentes (figura 104).

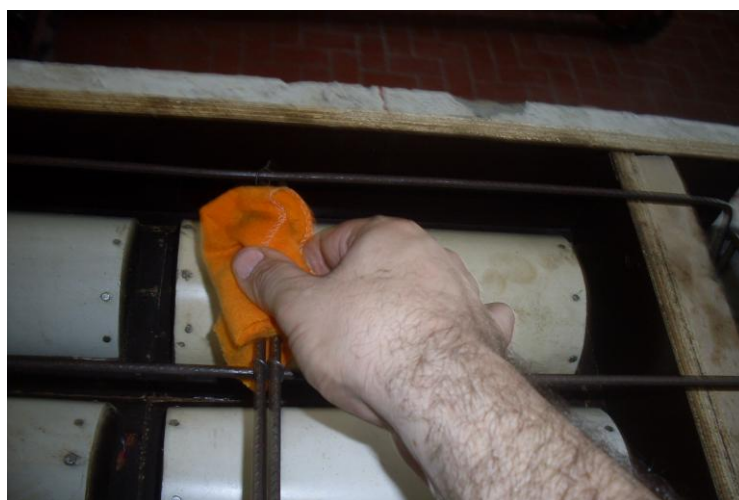


Figura 104 – Limpeza preliminar de superfície do aço

3.4.1.4 Colagem dos extensômetros (strain gages)

A fixação dos extensômetros no concreto e nas armaduras foi feita com a utilização do tipo de adesivo sugerido por. Trata-se do adesivo de uso geral LOCTITE 401, que serve para vasta gama de materiais, sendo composto por Schwetz (2005) “éster de cianocrilato”. É um adesivo instantâneo, o que exige certa atenção no posicionamento durante a colagem dos extensômetros.

No ato da colagem é fundamental que a superfície que compõe o extensômetro esteja totalmente aderida ao material-base e o mais plana possível. Quaisquer irregularidades podem gerar problemas na interface entre o material que se deseja instrumentar e o strain gage, resultando em valores de deformação que não condizem com a realidade do material a ser ensaiado.

As fotos a seguir mostram o aspecto de dois strain gages já colados sobre a superfície do concreto de V-2A (figura 105) e PL-01 (figura 106). Nestas fotos podem ser observadas, também, a marcação para centralização dos extensômetros.



Figuras 105 e 106 – Strain gage colado sobre a superfície do concreto de V- 2A e PL-01

No caso dos strain gages utilizados na instrumentação de barras e fios de aço, torna-se necessário o uso de pinças para facilitar o seu manuseio. Nas armaduras de PL-01, por exemplo, foram utilizados strain gages como o da foto a seguir. Na foto (figura 107) podem ser visualizadas também as pinças utilizadas no manuseio deste tipo de extensômetro.

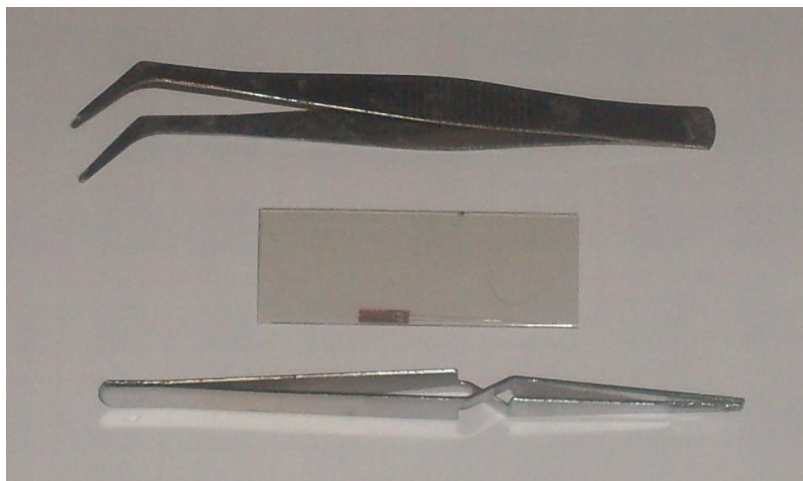


Figura 107 – Strain gage e pinças para manuseio

Na foto a seguir (figura 108 e 109) podem ser visualizados os extensômetros já fixados no fio de aço da armadura.



Figura 108 e 109 – Strain gage fixado sobre armadura

3.4.1.5 Teste preliminar dos extensômetros- verificação do valor da resistência

Após a colagem dos extensômetros é aconselhável a execução de um teste preliminar a fim de avaliar a integridade dos mesmos após sua fixação no elemento a ser estudado (concreto ou aço). Este teste preliminar é realizado com aparelho do tipo multímetro digital, verificando-se se a leitura observada no aparelho está coerente com a resistência do strain gage que é informada pelo fabricante. A fim de especificar mais detalhadamente os tipos de extensômetros aqui utilizados foi elaborada a tabela a seguir (tabela 17):

Tabela 17 – Resumo dos dados dos strain gages

Elemento a ser instrument.	Materiais instrument.	Compr. (mm)	Fator Gage	Resist (Ω)	Especificação	Fabricante
V-2a e V-2b	armadura	10,00	2,11	120,00	KFG-10-120-C1-11	EXCEL
	concreto	100,00	2,12	120,00	PA-10-401BA-120L	EXCEL
PL-01	armadura	2,00	2,11	120,00	KFG-2-120-C1-11	KYOWA
	concreto	60,00	2,12	120,00	PA-06-401BA-120L	EXCEL
PL-02	armadura	5,00	2,11	120,00	KFG-5-120-C1-11	KYOWA
	concreto	60,00	2,12	120,00	PA-06-401BA-120L	EXCEL

3.4.1.6 Soldagem dos fios nos extensômetros

Para ligação dos extensômetros aos fios que possibilitariam a conexão ao equipamento de aquisição de dados, foram utilizados fios AWG nº.26, comumente empregados em circuitos eletrônicos. Cada fio foi conectado ao terminal do extensômetro por meio de solda a base de estanho, com o auxílio de estação de solda analógica com temperatura regulável. A extremidade de cada fio era antecipadamente preparada (estanhada) para facilitar o processo de solda (figuras 110 e 111).



Figuras 110 e 111 – Detalhe do preparo da extremidade de fio e soldagem

Com o intuito de proteger as armaduras da aderência dos resíduos de solda que se desprendem, naturalmente durante o processo de solda, utilizou-se proteção de fita isolante preta que era posteriormente retirada. O aspecto das armaduras de PL-01 e PL-02, com todos os fios conectados é apresentado na foto a seguir (figura 112)

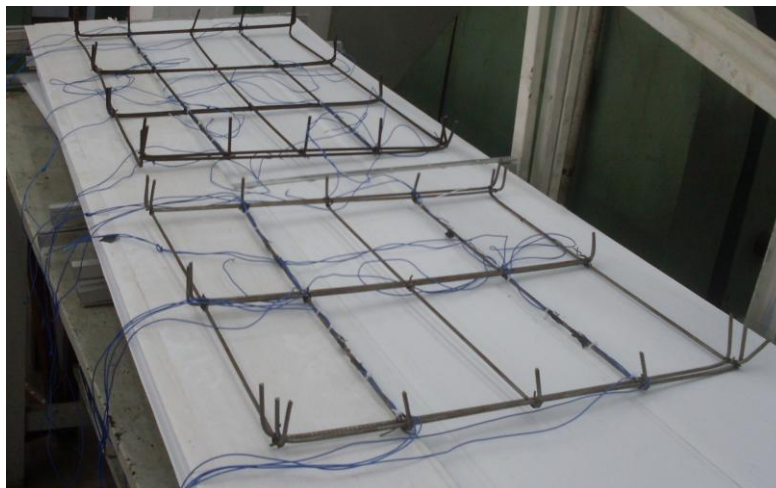
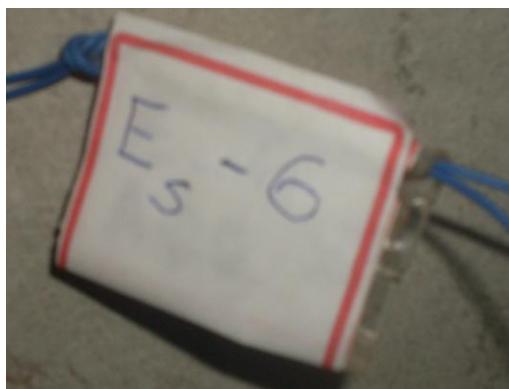


Figura 112 – Armaduras com os fios conectados

Para que cada extensômetro tivesse seu posicionamento referenciado, mesmo após a concretagem, foram fixadas etiquetas contendo a numeração de cada strain gage, conforme pode ser visualizado na foto a seguir (figura 113). Além disso, foram utilizadas presilhas plásticas para fixação dos fios nas armaduras, a fim de manter no seu posicionamento correto durante o lançamento do concreto (figura 114)



Figuras 113 e 114 – Detalhe da identificação do fio e presilha de fixação

Para não ocasionar danos aos extensômetros durante o lançamento do concreto foram utilizadas resinas protetoras, cuja forma de aplicação e as características serão analisadas no item a seguir.

3.4.1.7 Aplicação de resinas de proteção nos extensômetros

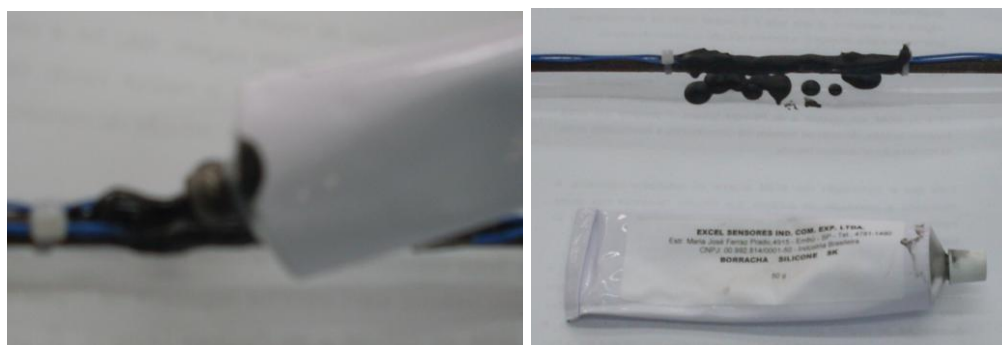
Para manter o correto funcionamento de cada extensômetro fixado a armadura, impedindo que fosse danificado pela ação mecânica (atrimento e choques) dos agregados e da pasta de cimento durante a concretagem, foram utilizadas resinas a base de silicone do fabricante EXCEL Sensores. Estas resinas eram de dois tipos:

- Resina incolor - possuía textura mais fina e bastante fluida, servindo como primeira proteção e base para a camada protetora mais espessa (2ª camada). Já possuía pincel aplicador na embalagem (figuras 115 e 116);



Figuras 115 e 116 – Detalhe da aplicação e embalagem da resina incolor

- Resina preta- possuía textura mais pastosa, sendo uma proteção mais efetiva de cada extensômetro, seu aspecto após a secagem era de borracha de silicone. Não possuía qualquer tipo de aplicador, e seu método de utilização era bastante grosseiro (figuras 117 e 118).



Figuras 117 e 118 – Detalhe da aplicação e embalagem da resina preta de proteção

3.5 Equipamentos utilizados nos ensaios

3.5.1 Equipamento de aquisição de dados

Para transformação da variação de corrente elétrica em deformações ou em deslocamentos foi empregado equipamento de aquisição de dados da marca NATIONAL STRUMENTS, cujas características serão resumidas na tabela a seguir (tabela 18).

Tabela 18 – Resumo dos dados do equipamento de aquisição de dados.

Características do Equipamento de Aquisição de dados	
Fabricante	National Struments
Modelo	NI Compac DAQ
Serial	NI c DAQ 9178
N.º de Slots Disponíveis	8
N.º de Canais para Strain Gages	8
N.º de Canais para transdutores	4
Tipo de Saída	Porta USB

O equipamento de aquisição era conectado aos strain gages e aos transdutores por intermédio de cabos coaxiais, sendo estes dotados de conectores em ambas as extremidades. O aspecto do equipamento de aquisição de dados será apresentado na foto a seguir (figura 119). As informações coletadas pelo equipamento eram transferidas a um notebook, com o auxílio do software LABVIEW, sendo o conjunto de equipamentos apresentados na figura 120.



Figuras 119 e 120 – Detalhes dos equipamentos de aquisição de dados.

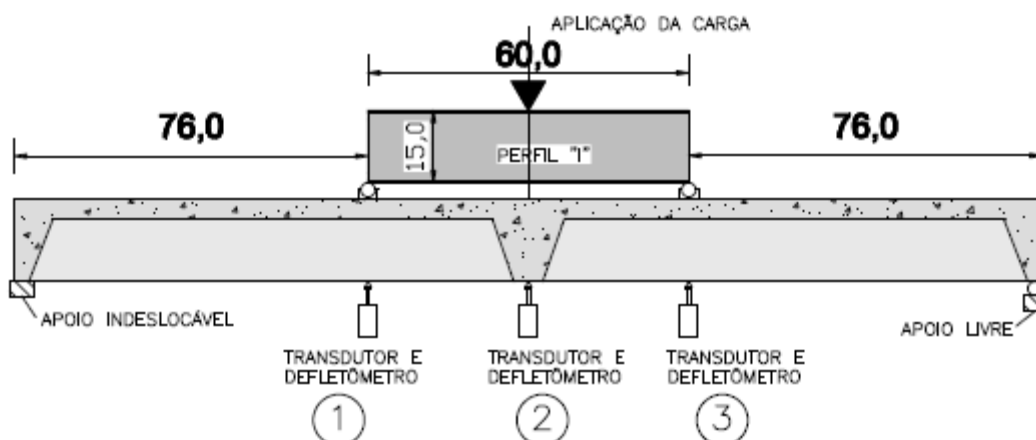
3.5.2 Transdutores diferenciais

Para a leitura dos deslocamentos, além dos defletômetros analógicos foram utilizados três transdutores indutivos transformadores diferenciais do fabricante GEFTRAN. Este tipo de transdutor funciona com um conjunto de bobinas, nas quais circula uma corrente alternada (AC). A variação desta corrente é convertida em um valor de deslocamento pelo equipamento de aquisição de dados. Na foto a seguir são apresentados os transdutores utilizados nos empregados nos ensaios (figura 121).



Figuras 121 – Detalhe dos transdutores utilizados nos ensaios

Os transdutores estavam posicionados nos modelos de viga da seguinte forma: transdutores (1) e (3) alinhados com os pontos de aplicação de carga, e transdutor (2) com o meio do vão. O posicionamento dos transdutores nos modelos de vigas é apresentado na figura a seguir (figura 122)



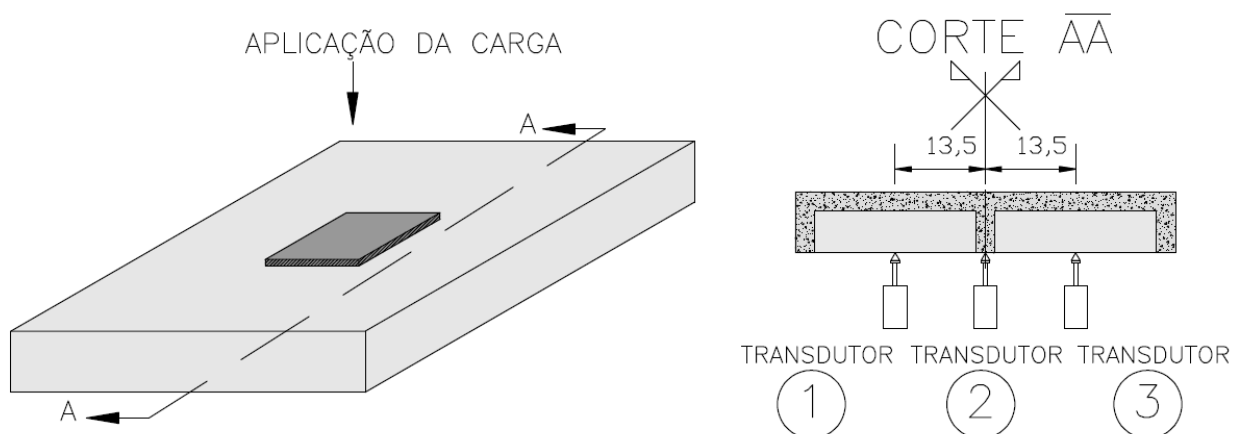
Figuras 122 – Detalhe do posicionamento dos transdutores utilizados nos ensaios das vigas

Nas fotos (figuras 123 e 124) a seguir são apresentados os posicionamentos dos defletômetros analógicos (em primeiro plano), bem como os transdutores (em segundo plano) que foram utilizados nos modelos de viga. A precisão dos defletômetros era de 10^{-2} mm, ou seja, centésimo de milímetro.



Figuras 123 e 124 – Detalhe dos defletômetros e dos transdutores utilizados nos ensaios das vigas

Os transdutores do modelo de laje PL-01 estavam posicionados da seguinte forma: transdutores (1) e (3) locados a 13,5 cm do centro da laje, e o transdutor (2) no meio do vão. O posicionamento dos transdutores neste modelo é apresentado na figura a seguir (figura 125). Em razão da exiguidade de espaço sob a laje, optou-se pela instalação de apenas um defletômetro analógico (figura 126) que possuía uma precisão de 10^{-2} mm.

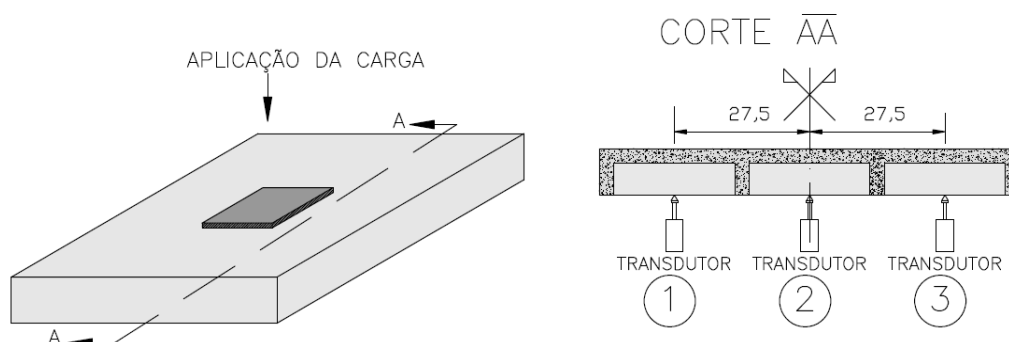


Figuras 125 – Posicionamento dos transdutores nos ensaios de PL-01



Figuras 126– Detalhe dos defletômetros e dos transdutores posicionados

Os transdutores do modelo de laje PL-02 estavam posicionados da seguinte forma: transdutores (1) e (3) locados a 27,5 cm do centro da laje, e o transdutor (2) no meio do vão. O posicionamento dos transdutores neste modelo é apresentado na figura a seguir (figura 127). Ao lado de cada transdutor foi colocado um defletômetro analógico (figura 128), para possibilitar um comparativo entre os valores lidos diretamente e os obtidos pelos equipamentos eletrônicos.



Figuras 127 – Detalhe do posicionamento dos transdutores de PI-02



Figuras 128 – Detalhe de transdutor ao lado de defletômetro utilizado no ensaio de PL-02

3.5.3 Calibração dos transdutores

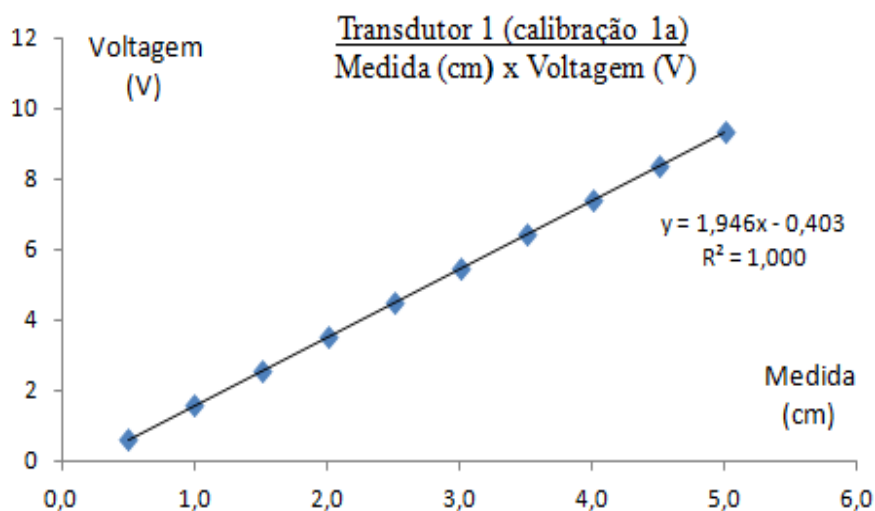
Antes da utilização dos transdutores nos ensaios foi efetuada calibração dos mesmos. A calibração consiste na determinação de uma constante $K_{Transd.}$ a ser utilizada pelo equipamento de aquisição de dados, para transformar o valor da variação de corrente obtida em deslocamento.

O procedimento de calibração consistiu em realizar-se uma série de medidas conhecidas, obtendo-se os valores de corrente elétrica correspondente a cada medida. O processo foi repetido duas vezes para cada transdutor, sendo os dados resumidos nas tabelas que serão apresentadas a seguir. A tabela abaixo (tabela 19) apresenta os dados referentes à calibração do transdutor número um.

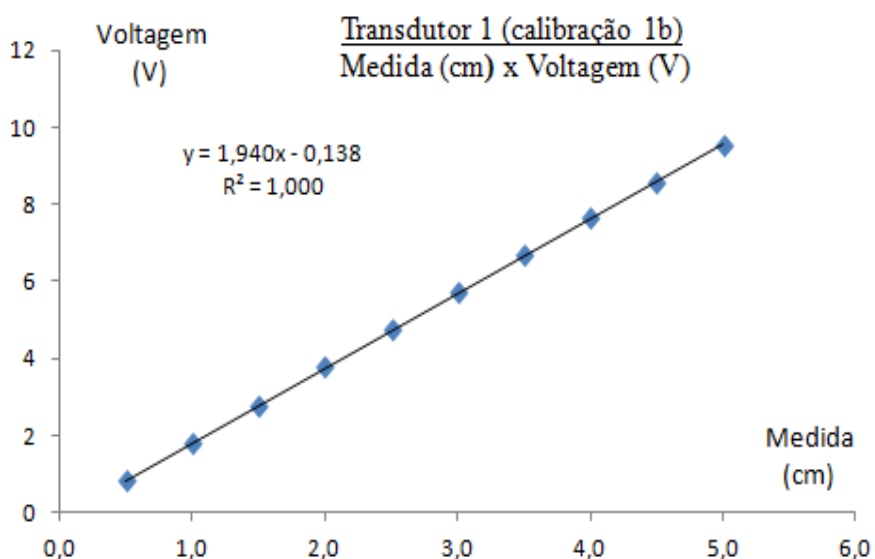
Tabela 19 – Resumo dos dados da calibração do transdutor 1

Transdutor 1			
Serial 111 103 097			
calibração 1a		calibração 1b	
Medida (cm)	Voltagem(V)	Medida (cm)	Voltagem(V)
0,5	0,581315	0,5	0,806128
1,0	1,542298	1,0	1,786061
1,5	2,508652	1,5	2,764365
2,0	3,483964	2,0	3,753763
2,5	4,460554	2,5	4,732457
3,0	5,429191	3,0	5,711438
3,5	6,405877	3,5	6,681996
4,0	7,377677	4,0	7,654213
4,5	8,350722	4,5	8,565
5,0	9,335509	5,0	9,515602

Os dados das duas calibrações feitas para o transdutor n.º1 foram resumidos nos gráficos apresentados a seguir (figuras 129 e 130). Cabe ressaltar que os coeficientes das duas retas são valores próximos.



Figuras 129 – Curva de calibração 1a do transdutor 1



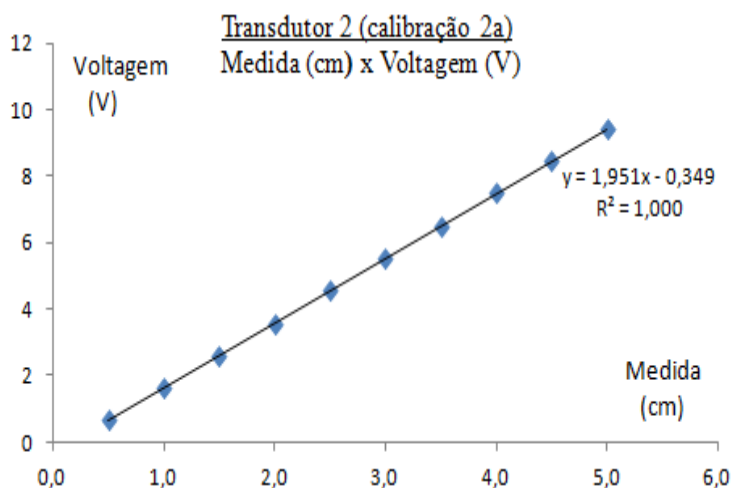
Figuras 130 – Curva de calibração 1b do transdutor 1

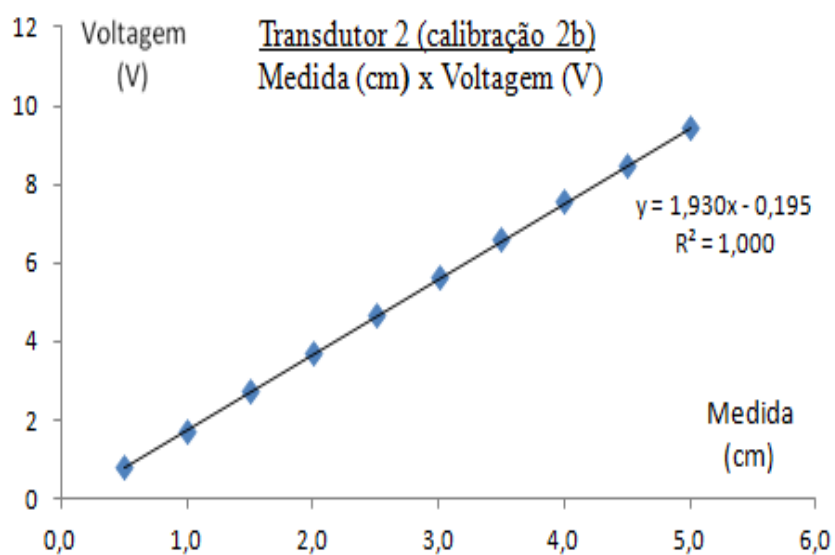
A tabela a seguir (tabela 20) apresenta os dados referentes à calibração do transdutor número dois.

Tabela 20 – Resumo dos dados da calibração do transdutor 2

Transdutor 2			
Serial 111 103 101			
calibração2a		calibração 2b	
Medida (cm)	Voltagem(V)	Medida (cm)	Voltagem(V)
0,5	0,633243	0,5	0,753033
1,0	1,601489	1,0	1,713545
1,5	2,577298	1,5	2,694897
2,0	3,550619	2,0	3,667211
2,5	4,525622	2,5	4,64648
3,0	5,50347	3,0	5,619134
3,5	6,479804	3,5	6,591741
4,0	7,457091	4,0	7,555347
4,5	8,434792	4,5	8,452862
5,0	9,409018	5,0	9,415373

Os dados das duas calibrações feitas para o transdutor nº 2 foram resumidos nos gráficos apresentados a seguir (figuras 131 e 132).

**Figuras 131 – Curva de calibração 2a do transdutor 2**



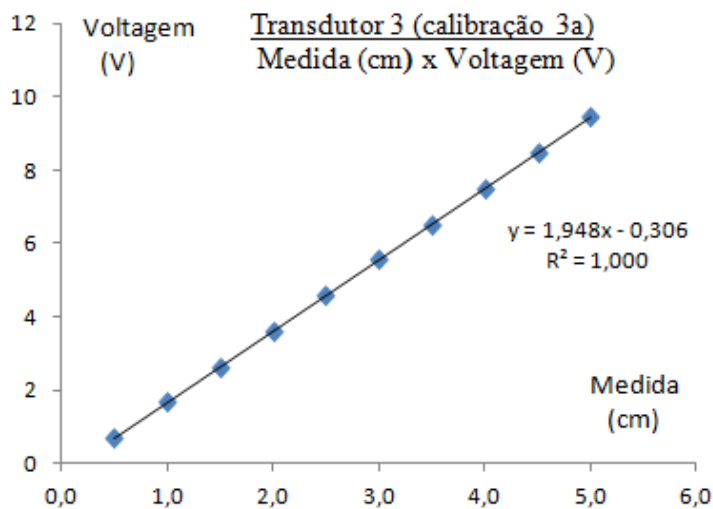
Figuras 132 – Curva de calibração 2b do transdutor 2

A tabela abaixo (tabela 21) apresenta os dados referentes à calibração do transdutor número três.

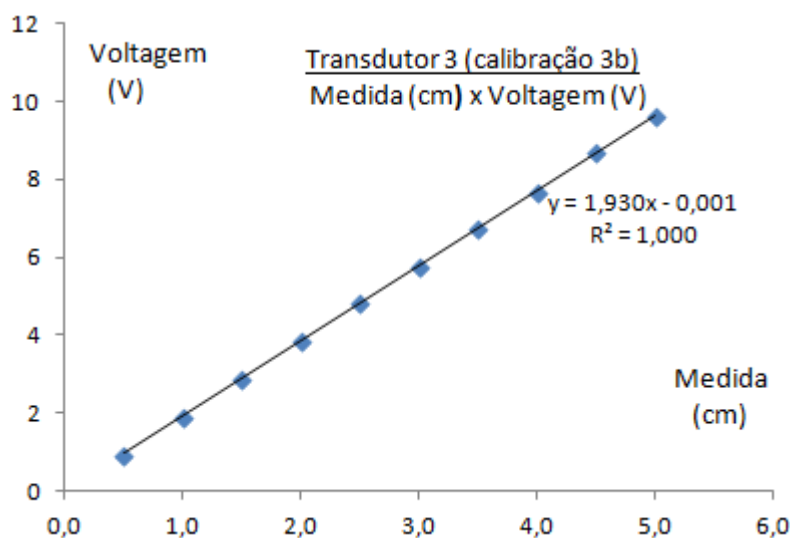
Tabela 21 – Resumo dos dados da calibração do transdutor 3

Transdutor 3			
Serial 110 802 795			
calibração 3a		calibração 3b	
Medida (cm)	Voltagem(V)	Medida (cm)	Voltagem(V)
0,5	0,674978	0,5	0,959435
1,0	1,640603	1,0	1,920794
1,5	2,611872	1,5	2,903157
2,0	3,586511	2,0	3,871679
2,5	4,560476	2,5	4,84209
3,0	5,533956	3,0	5,770423
3,5	6,510695	3,5	6,735602
4,0	7,484786	4,0	7,702407
4,5	8,457421	4,5	8,696833
5,0	9,435653	5,0	9,653175

Os dados das duas calibrações feitas para o transdutor n.º 3 foram resumidos nos gráficos apresentados a seguir (figuras 133 e 134).



Figuras 133 – Curva de calibração 3a do transdutor 3



Figuras 134 – Curva de calibração 3b do transdutor 3

O valor da constante K_{Transd} de calibração para os três transdutores foi obtido através da seguinte expressão (equação 19).

$$k_{Transd} = \frac{1}{a_{reta}} \quad (19)$$

Onde: a_{reta} é a média dos coeficientes angulares das retas dos gráficos de calibração.

A partir da equação nº.19, baseando-se nos valores das tabelas 19 a 21, foram determinadas as constantes de calibração para os três transdutores, sendo estes valores apresentados na tabela a seguir (tabela 22).

Tabela 22 – Resumo das calibrações dos três transdutores

Resumo da calibração dos Transdutores		
Número de Referencia	Serial nº	Constante de calibração
Transdutor 1	111 103 097	0.515464
Transdutor 2	112 103 101	0.515374
Transdutor 3	110 802 795	0.513452

Utilizando as constantes de calibração, efetuou-se uma nova medida com o objetivo de aferir a calibração de cada transdutor, comparando os resultados obtidos com a medida real, e verificando se os erros presentes em cada medida poderiam ser ou não aceitos.

Os erros relativos (δx) da calibração de cada um dos transdutores foram calculados de acordo com a expressão apresentada por Brito e Fragnito (1997), que será transcrita a a seguir (equação 20).

$$(\delta \bar{x})_r = \frac{\Delta \bar{x}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (20)$$

Onde: $\Delta \bar{x}$ é o valor absoluto da variação entre o valor real e o valor medido;

\bar{x} é o valor real do deslocamento medido;

O valor dos erros relativos calculados para os três transdutores será apresentado na planilha a seguir (tabela 23).

Tabela 23 – Resumo das calibrações dos três transdutores e erros

Refer. (cm)	Transdutor 1			Transdutor 2			Transdutor 3		
	Verific.	δ Absol.	δ Rel. %	Verific.	δ Absol.	δ Rel. %	Verific.	δ Absol.	δ Rel. %
0	0,000	0	0,015	0,000	0,0002	0,023	0,001	0,001	0,053
0,5	0,496	0,004	0,886	0,499	0,0014	0,283	0,496	0,004	0,721
1	0,994	0,006	0,640	0,996	0,0041	0,406	0,994	0,006	0,613
1,5	1,496	0,004	0,263	1,498	0,0020	0,133	1,499	0,001	0,094
2	2,004	0,004	0,177	2,000	0,0000	0,000	1,998	0,002	0,121
2,5	2,508	0,008	0,340	2,503	0,0030	0,121	2,499	0,001	0,024
3	3,009	0,009	0,302	3,006	0,0061	0,205	3,003	0,003	0,106
3,5	3,508	0,008	0,238	3,511	0,0109	0,311	3,506	0,006	0,184
4	4,010	0,01	0,242	4,016	0,0156	0,390	4,007	0,007	0,176
4,5	4,522	0,022	0,488	4,518	0,0178	0,395	4,508	0,008	0,183
5	5,023	0,023	0,468	5,024	0,0237	0,473	5,006	0,006	0,124

4 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

4.1 Considerações iniciais sobre a realização dos ensaios

Embora os resultados de todas os elementos de faixa (vigas) sejam apresentados e detalhados nos itens a seguir, apenas as vigas V-2A e V-2B foram ensaiadas diretamente pelo autor. As demais vigas foram utilizadas anteriormente em trabalhos de iniciação científica, por alunos da graduação da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. As lajes PL-01 e PL-02 foram confeccionadas e ensaiadas pelo autor, tendo como objetivo o presente estudo.

4.2 Aplicação das cargas e condições de apoio

Para a realização dos ensaios das vigas foram aplicadas cargas concentradas, que eram transferidas para as vigas através de perfil metálico com seção "I". O ponto de aplicação das cargas estava a 76,5cm dos bordos das vigas. O perfil apoiava-se em dois pontos ao longo da mesa da viga, em berços compostos por suportes e roletes, conforme figura e detalhes a seguir (figura 135).

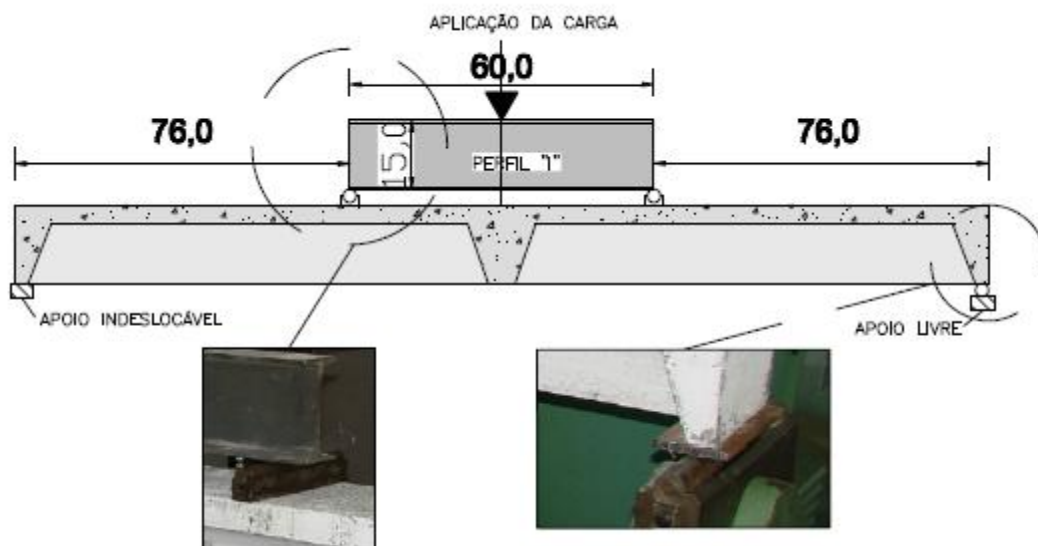


Figura 135 – Detalhes da aplicação de carga e apoios das Vigas.

Em algumas vigas foram necessários ajustes entre os pontos de aplicação das cargas e a superfície da peça. Estes ajustes foram executados com resina

epóxi, sob os apoios que eram protegidos por fita adesiva, para impedir a aderência entre as superfícies (figura 136).



Figura 136 – Aspecto do ajuste no ponto de aplicação das cargas

4.3 Ensaio da viga V-1

4.3.1 Verificação das flechas

A metodologia do ensaio da viga V-1 consistiu em carregá-la na prensa hidráulica de forma lenta, medindo-se as flechas indicadas pelos defletômetros analógicos instalados, em alguns patamares de carga aplicada. Quando percebido o surgimento da primeira fissura o ensaio foi paralisado mantendo-se o carregamento permanente, sem acréscimo ou decréscimo, para a medição da abertura das fissuras com a utilização de fissurômetro.

Os deslocamentos (flechas) foram medidos até um patamar de carga em que as deformações excessivas tornaram insegura a permanência dos defletômetros, motivando sua retirada.

Neste primeiro ensaio não houve a utilização de extensômetros e transdutores, optando-se apenas pelos defletômetros analógicos, conforme foto a seguir (figura 137).

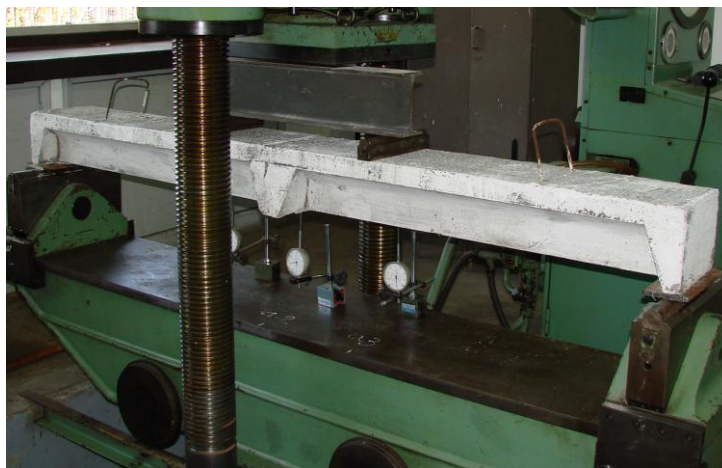


Figura 137 – Aspecto da Viga V-1 posicionada para o ensaio

As cargas aplicadas pela prensa e as deformações medidas pelos defletômetros são apresentadas na tabela a seguir (tabela 24)

Tabela 24 – Resumo das cargas e flechas de V-1.

Viga V-1 (Valores Experimentais)							
Carga	Flechas			Carga	Flechas		
P_{tot} (kN)	a_1 (mm)	a_2 (mm)	a_3 (mm)	P_{tot} (kN)	a_1 (mm)	a_2 (mm)	a_3 (mm)
0	0	0	0	8	3,33	3,65	3,3
0,8	0,08	0,1	0,07	8,3	3,94	4,34	3,94
1,6	0,19	0,21	0,18	8,5	4,01	4,43	4,03
2,4	0,28	0,31	0,28	9	4,28	4,73	4,29
2,8	0,31	0,34	0,31	9,5	4,66	5,16	4,69
3,2	0,35	0,39	0,35	10	5,08	5,63	5,1
3,6	0,39	0,44	0,39	10,5	5,49	6,06	5,48
4	0,445	0,5	0,45	11	5,83	6,48	5,85
4,5	0,51	0,58	0,53	11,5	6,23	6,9	6,25
5	0,6	0,67	0,61	12	6,78	7,49	6,76
5,5	0,77	0,88	0,82	OBS:			
6	1,31	1,5	1,3	1-Carga de Fissuração- 7,5 kN			
6,5	2,06	2,23	1,96				
7	2,54	2,72	2,49	2-Carga de Ruptura- 17 kN			
7,5	2,87	3,15	2,85				

O gráfico Carga x Flecha para a viga V-1, baseado nos valores da tabela 25 será apresentado a seguir (figura 138).

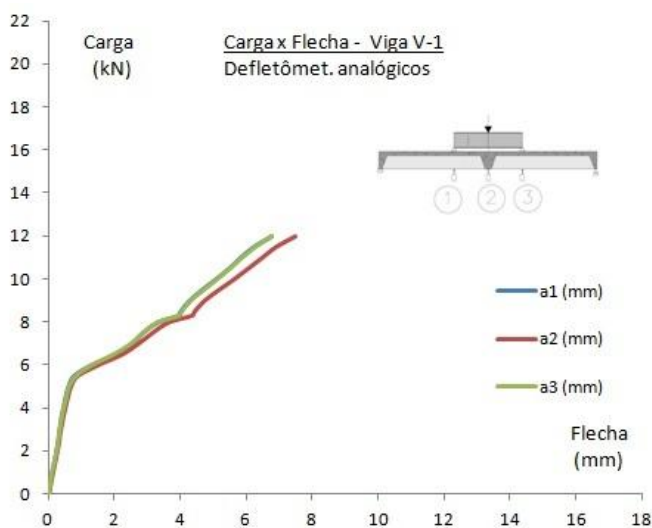


Figura 138 – Gráficos Carga x Flecha da viga V-1

4.3.2 Observação das fissuras

O aparecimento das primeiras fissuras foi observado para uma carga de 7,5kN, embora possa ser observado um ponto de inflexão no gráfico para carga de 5,5 kN (figura 138). Este ponto representa a mudança de rigidez da peça, com conseqüente mudança do estadio I para o estadio II.

A posição das fissuras de V-1, e as suas posições em relação ao eixo de simetria da viga são apresentados na figura a seguir (figura 139) e na tabela 26.

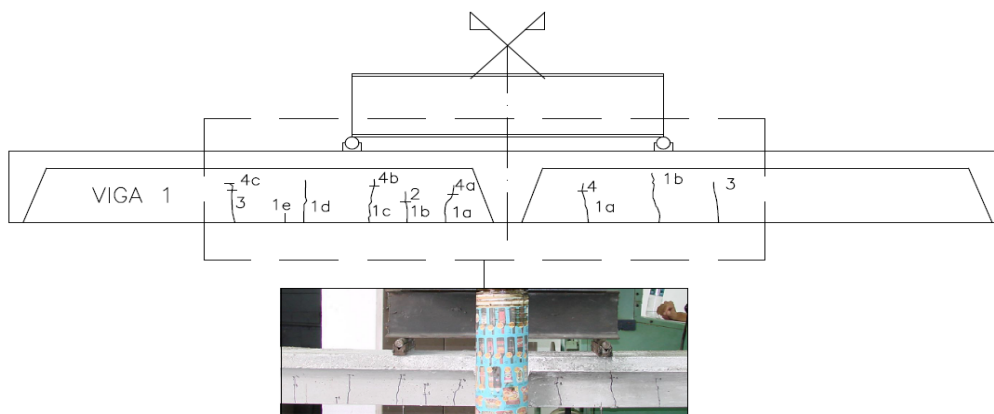


Figura 139 – Detalhe das fissuras de V-1

Tabela 25– Resumo das fissuras de V-1

Fissuras da viga V1					
Esquerda		Esquerda		Direita	
Nº	Posição (cm)	Nº	Posição (cm)	Nº	Posição (cm)
1a	13	2	21	1a	17
1b	21	3	58	1b	32
1c	30	4a	13	3	45
1d	44	4b	30	OBS: Medidas em relação ao centro da viga	
1e	48	4c	58		

4.4 Ensaio da viga V-2A

4.4.1 Verificação das flechas

A metodologia do ensaio da viga V-2A consistiu em carregá-la na prensa hidráulica, de forma lenta, medindo-se as flechas indicadas simultaneamente pelos defletômetros analógicos e pelos transdutores indutivos, em alguns patamares de carga aplicada. Simultaneamente eram medidas as deformações através dos extensômetros (strain gages) colados em algumas partes da peça. A figura a seguir apresenta o aspecto da viga V-2A antes do início do ensaio (figura140).



Figuras 140 – Viga V-2A antes do ensaio

Os deslocamentos (flechas) foram medidos até um patamar de carga em que as deformações excessivas tornaram insegura a permanência dos defletômetros e dos transdutores, motivando sua retirada. No entanto, as deformações continuaram sendo monitoradas até a ruptura da peça, pelos extensômetros que foram mantidos conectados à viga.