

4

Descrição do Programa Experimental

4.1.

Considerações Gerais

O programa experimental tem como objetivo principal a visualização do comportamento estrutural em escala real, analisando-se os resultados e comparando-se os mesmos com os dados teóricos. É importante que os ensaios e a preparação dos mesmos sejam feitos de forma criteriosa, para assim obter-se o máximo de informações úteis e confiáveis a respeito das ligações.

Neste estudo, o programa experimental foi composto por dois ensaios em modelos viga-pilar, utilizando-se a configuração tipo cruciforme invertido e com carregamento monotônico. A carga vertical aplicada ao pilar, com o sistema invertido, proporcionou o estudo da ligação mista quando submetida a momento fletor negativo.

Neste capítulo, tem-se o objetivo de apresentar os detalhes das peças utilizadas, os procedimentos de execução dos testes com modelos experimentais, definições dos modelos ensaiados, instrumentação e caracterização dos materiais. Os resultados experimentais obtidos serão apresentados no Capítulo 5 e discutidos no Capítulo 7.

4.2.

Parâmetros de Projeto

Para efeito de cálculo, foi prevista uma planta baixa pertencente a um pavimento de edificação de múltiplos andares, como visto nos capítulos anteriores, composta de vigas mistas com 10 metros de comprimento e espaçadas de 3 metros. Com os resultados do estudo, através de um carregamento especificado de projeto, foram projetadas as vigas e a ligação intermediária que atendessem ao caso. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram, respectivamente, a localização da ligação estudada na planta baixa e na vista lateral do projeto estrutural.

O programa experimental proposto compreende a execução de dois ensaios de ligações semirrígidas mistas em escala real. Ambos os protótipos deveriam apresentar as mesmas características de material e geometria. A armação da laje foi cuidadosamente posicionada e o concreto utilizado para os dois ensaios foi produzido na mesma betonada. As fases dos testes foram definidas como:

1. teste do primeiro protótipo até o nível de carga que provoca o aparecimento de fissuras, seguido de descarregamento;
2. teste com aplicação de carregamento até a ruína do primeiro ensaio;
3. análise dos resultados e ajustes nos procedimentos de ensaio;
4. teste do protótipo 2 até o carregamento de ruína.

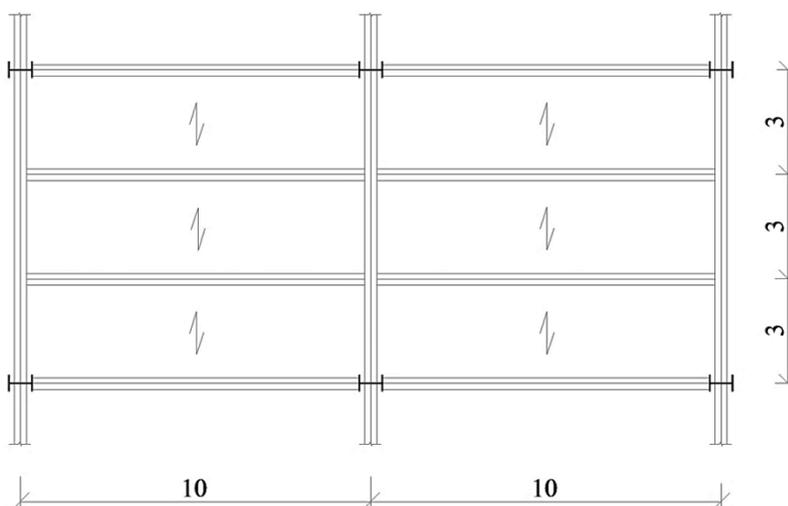


Figura 4.1 - Planta baixa do pavimento estrutural

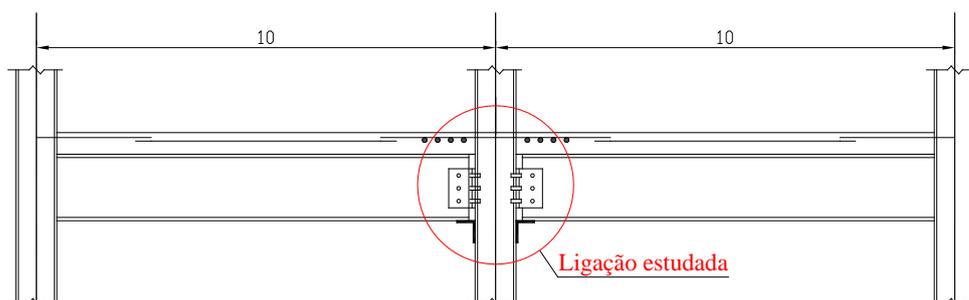


Figura 4.2 - Vista lateral da ligação

O ensaio foi realizado através da análise de um modelo cruciforme composto por vigas de dois metros de comprimento e um pilar central. Além disso, para se alcançar o momento fletor negativo previsto em projeto, o modelo

cruciforme foi ensaiado invertido a fim de que uma única carga fosse aplicada ao pilar (evitando-se diferenças entre as cargas aplicadas dos lados esquerdo e direito da ligação), conforme Figura 4.3.

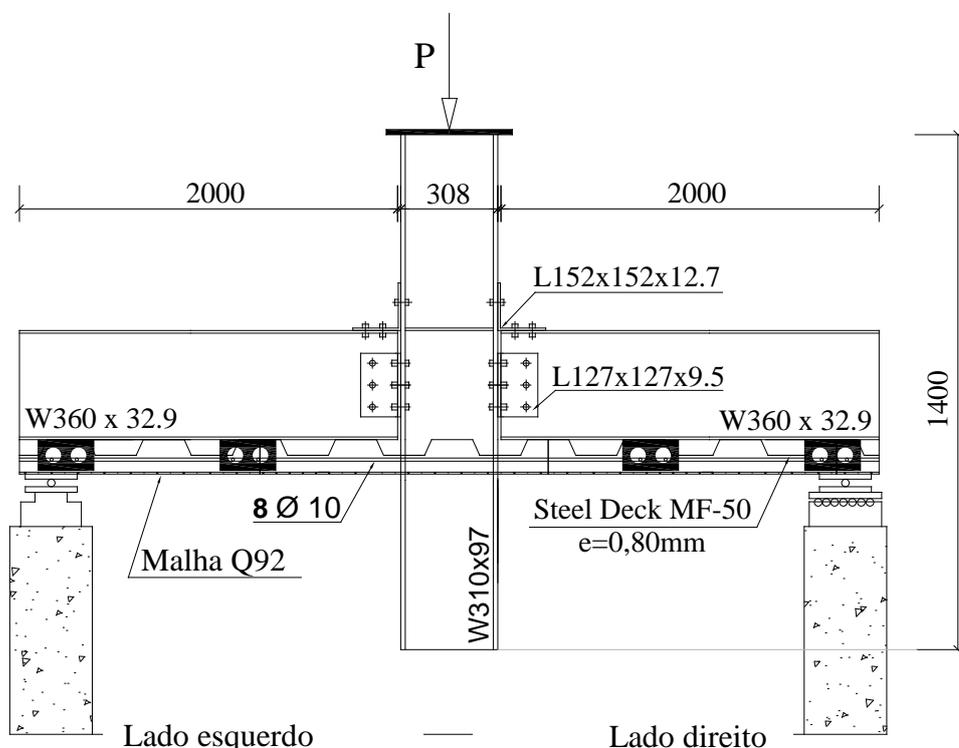


Figura 4.3 – Configuração de teste

4.3. Características Geométricas dos Modelos

As ligações ensaiadas são compostas por um pilar central de perfil W310x97 com 1,40 m de comprimento, duas vigas de aço de perfil W360x32.9 com 2,00 m de comprimento cada, quatro cantoneiras de alma de perfil L127x127x9.5 e duas cantoneiras de assento de perfil L152x152x12.7. Os perfis utilizados nos ensaios e os seus respectivos tipos de aço encontram-se resumidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Perfis e tipos de aço utilizados nos ensaios

Elemento	Perfil	Aço
Viga	W360x32.9	ASTM A572
Pilar	W310x97	ASTM A572
Cantoneira de assento	152x152x12.7	ASTM A36
Cantoneira de alma	127x127x9.5	ASTM A36

A laje mista é constituída de “Steel Deck” MF-50 com espessura de 0,80 mm e concreto com resistência característica prevista igual a 30 MPa. Para a ligação entre a laje e as vigas de aço, foram empregados quatro conectores de cisalhamento do tipo “perfobond” com dois furos.

No que se refere à armação, os vergalhões constituintes da armação negativa principal são de aço CA-50 com diâmetro de 10 mm. Para combate à fissuração, foi empregada uma malha quadrada de ferros de 4,2 mm de diâmetro, espaçados a cada 150 mm.

O parafuso utilizado tem diâmetro igual a 19 mm, aço de alta resistência ASTM A325 ($f_y = 635$ MPa e $f_u = 825$ MPa) e os detalhes deste são apresentados na Figura 4.4.

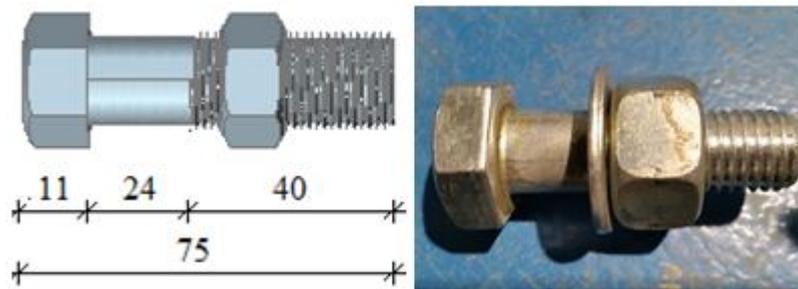


Figura 4.4- Detalhes do parafuso utilizado

Os detalhes dos elementos da ligação estão mostrados nas Figuras 4.5 e 4.6.

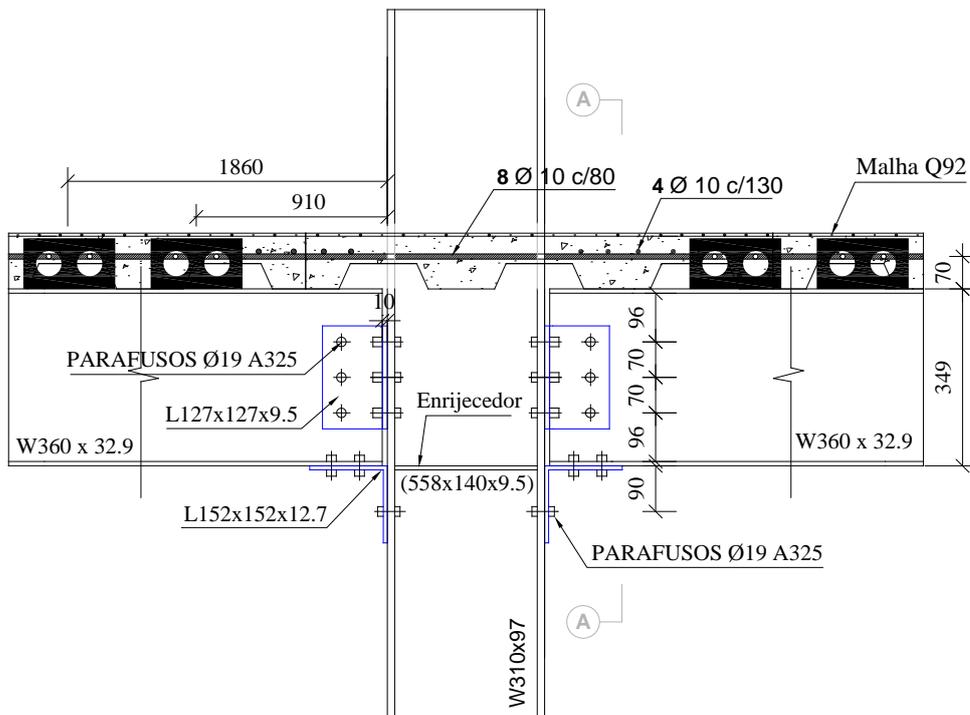


Figura 4.5 - Detalhes da vista lateral da ligação

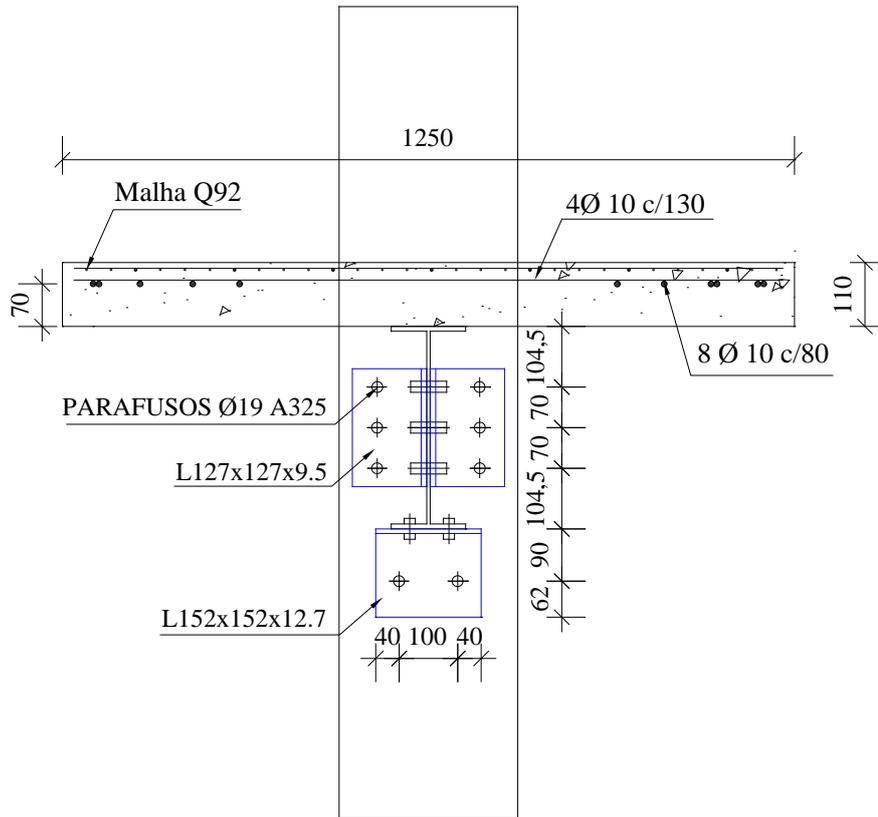


Figura 4.6 – CORTE A-A - Detalhes da vista frontal da ligação

O conector “*perfobond*” utilizado tem furos de 50 mm de diâmetro, espessura de 12,7 mm e suas dimensões e representação estão mostradas na Figura 4.7. Com o objetivo de identificar os quatro “*perfobonds*” utilizados em cada ensaio, estes foram nomeados da seguinte forma: os contidos na Viga 1 de Pe01 e Pe02 e na Viga 2 de Pe03 e Pe04, a numeração menor representa os conectores mais próximos ao pilar em cada viga, conforme Figura 4.8.

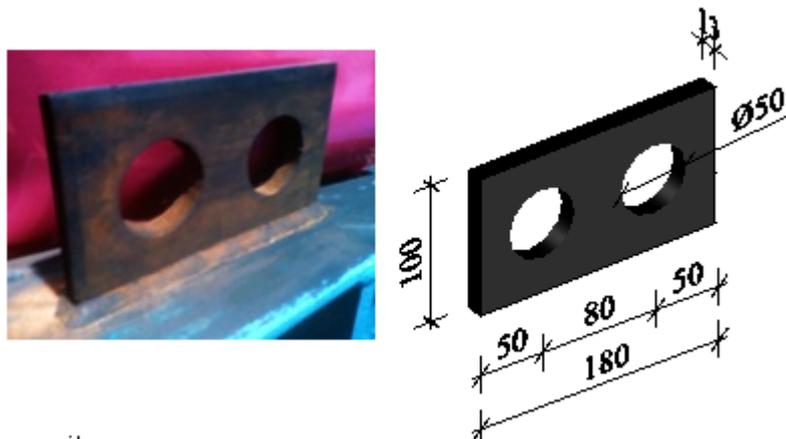


Figura 4.7 - Detalhes do “*perfobond*” utilizado

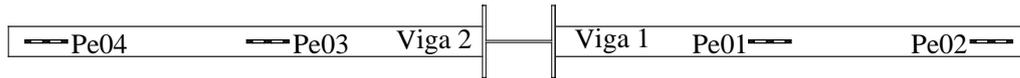
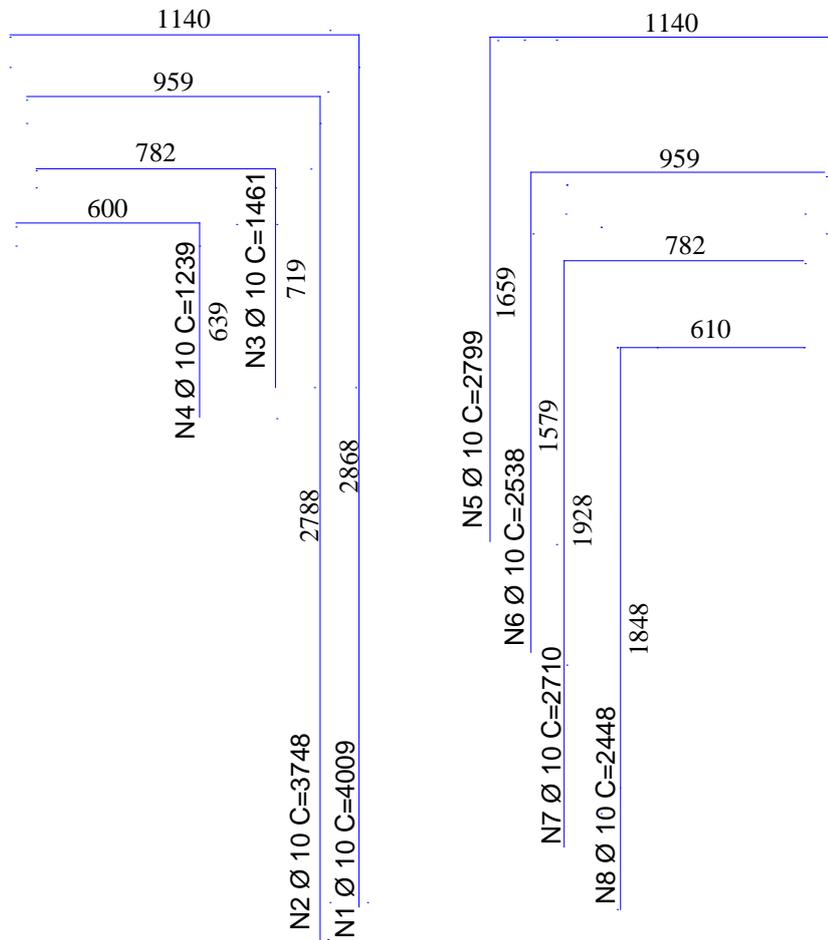


Figura 4.8 - Nomenclatura utilizada para os "perfobonds"

A armadura negativa principal tem 10 mm de diâmetro e está distribuída de forma que o "perfobond" auxilie na ancoragem das mesmas. O detalhamento foi feito com a utilização dos vergalhões em forma de "L" (pensando na forma que melhor se adequasse a execução em campo), ângulo de aproximadamente 90° e comprimento mínimo da barra no furo do conector igual a 600 mm.

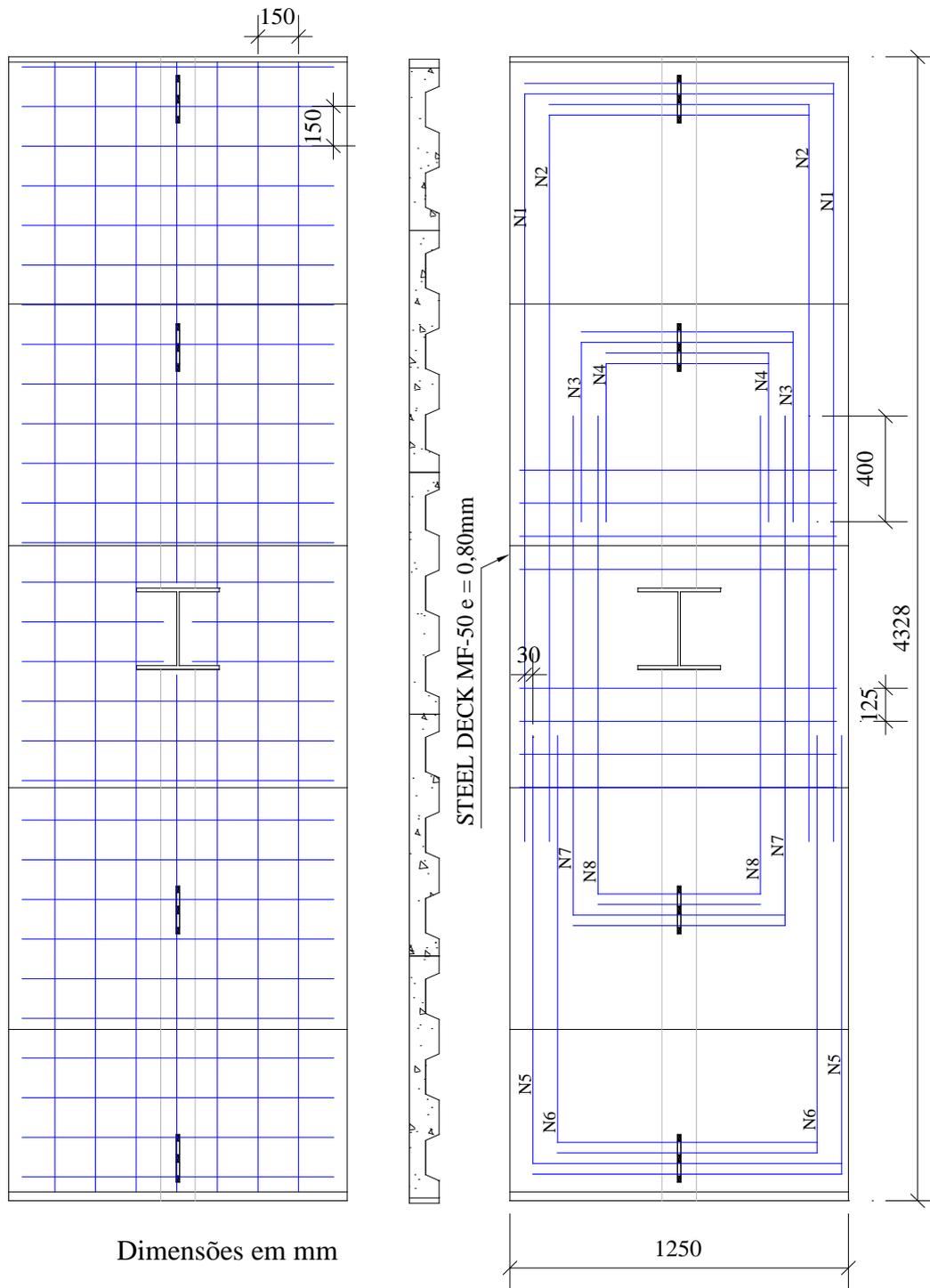
Os projetos de detalhamento da armação da laje são os mostrados nas Figuras 4.9 e 4.10.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312977/CA



Dimensões em mm

Figura 4.9 - Detalhes da armação principal



Dimensões em mm

Figura 4.10 - Projeto da armação principal e secundária

4.4. Fabricação das peças

As peças metálicas (pilares, vigas e cantoneiras) foram fornecidas e fabricadas pela empresa Metalfenas Indústria de Construção Ltda. As peças já chegaram ao laboratório com furações e tamanhos adequados.

Os detalhes dos projetos de fabricação seguem nas Figuras 4.11 a 4.14.

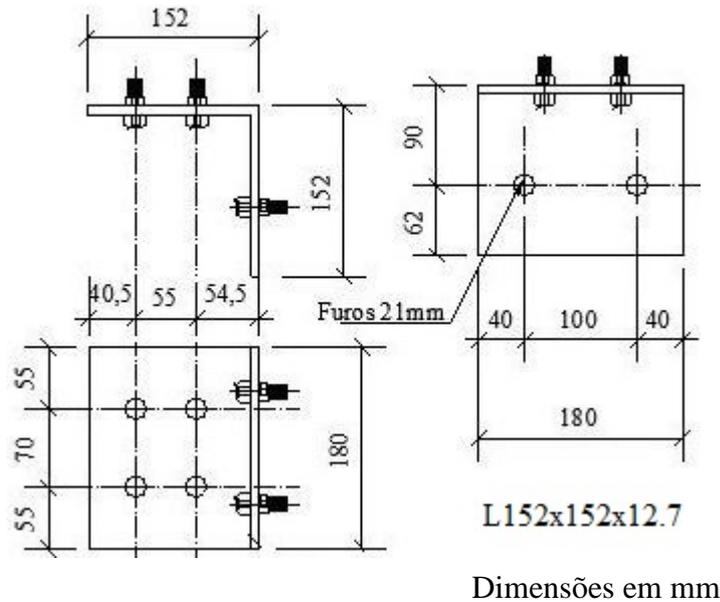


Figura 4.11 - Projeto de fabricação das cantoneiras de assento

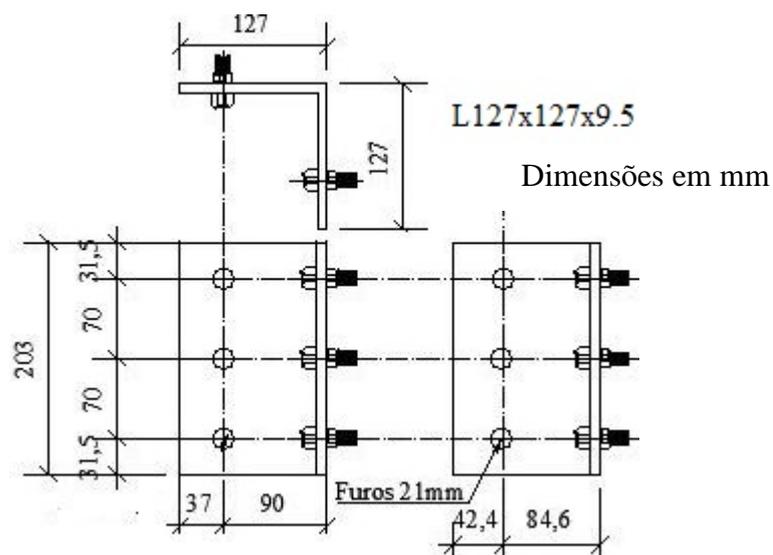
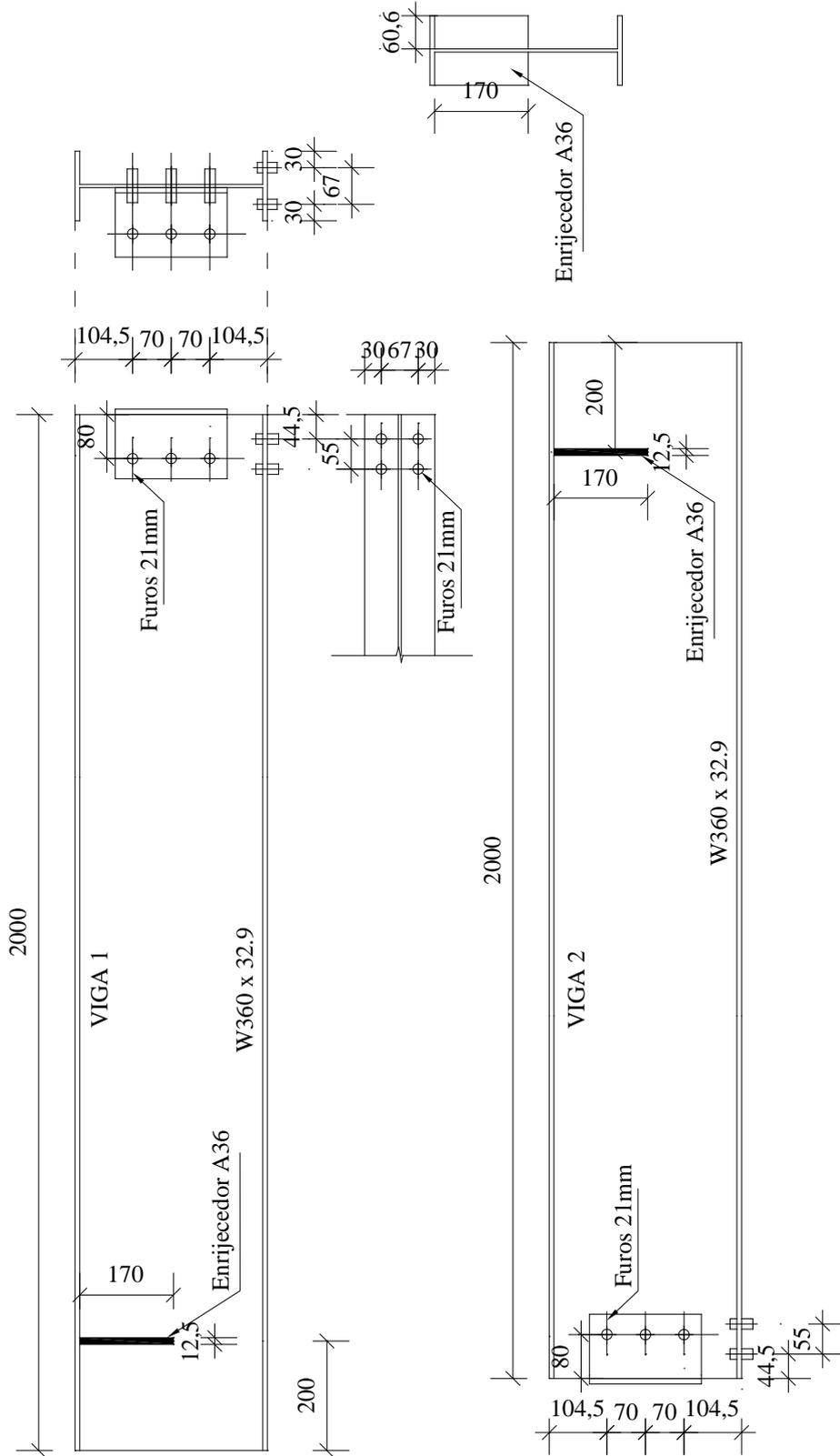
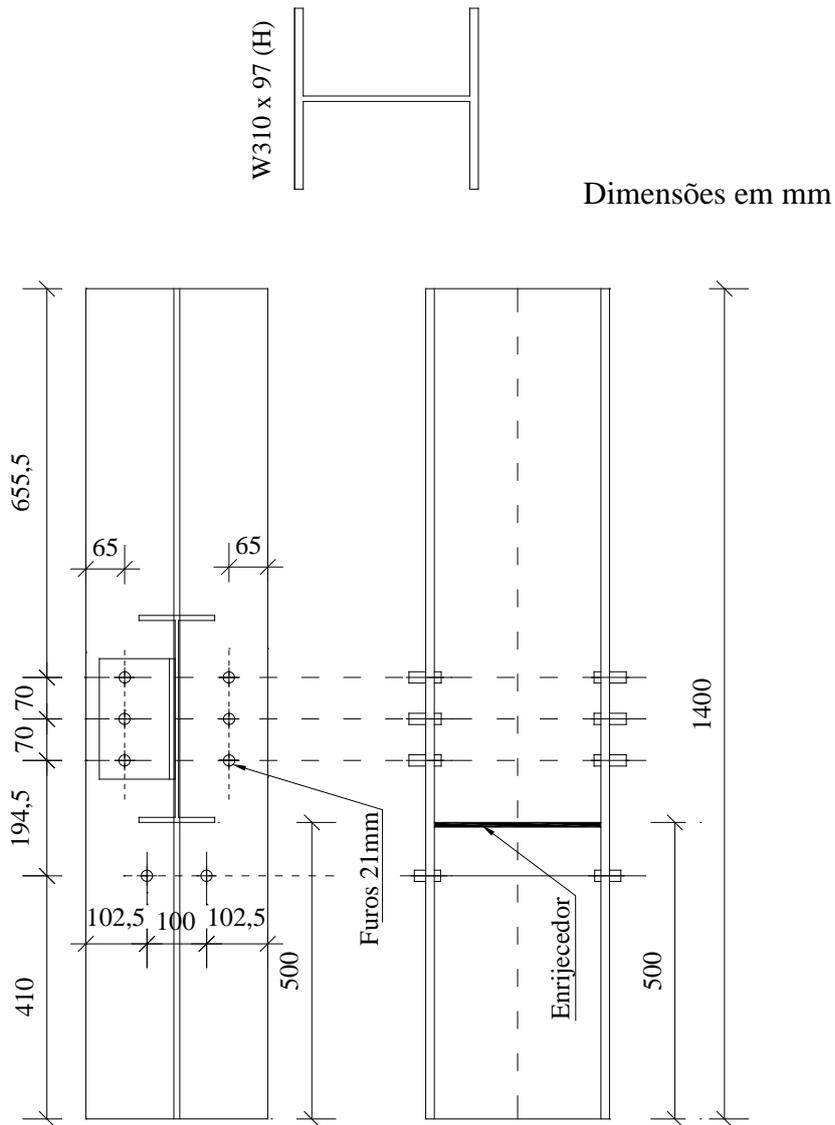


Figura 4.12- Projeto de fabricação das cantoneiras de alma



Dimensões em mm

Figura 4.13 - Projeto de fabricação das vigas



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312977/CA

Figura 4.14 - Projeto de fabricação dos pilares

4.5. Controle Dimensional das Peças

4.5.1. Especificação das Dimensões das Peças

O controle dimensional é importante para que se tenha as dimensões exatas dos elementos utilizados nos protótipos e assim, as previsões teóricas serem mais precisas.

A especificação adotada para as dimensões dos elementos é mostrada na Figura 4.15 e os valores medidos, para cada peça utilizada nos ensaios, são apresentados no item 4.5.2 para o protótipo 1 e no item 4.5.3 para o protótipo 2.

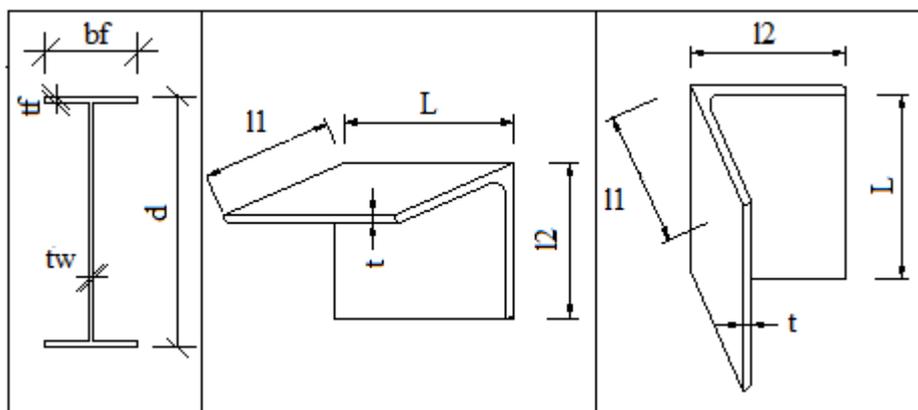


Figura 4.15 - Padronização das dimensões dos elementos da ligação: viga, cantoneira de assento e cantoneira de alma, respectivamente

4.5.2. Levantamento da geometria dos elementos utilizados no Ensaio 1

As tabelas seguintes apresentam as dimensões medidas dos elementos pertencentes ao primeiro ensaio.

Tabela 4.2 - Dimensões medidas das cantoneiras de assento do ensaio 1 - valores médios

Peça	l_1	l_2	L	t
-	mm	mm	mm	mm
C1	156	151	180	12,7
C2	155	152	183	13,2

Tabela 4.3 - Dimensões medidas das cantoneiras de alma do ensaio 1 - valores médios

Peça	l_1	l_2	L	t
-	mm	mm	mm	mm
A1	128	125	208	10
A2	127	124	208	9,6
A3	128	127	208	9,9
A4	126	127	208	9,7

Tabela 4.4 - Dimensões medidas do pilar do ensaio 1 - valores médios

Peça	b_f	t_f	d	t_w
-	mm	mm	mm	mm
P1	350	15,6	310,5	12

Tabela 4.5 - Dimensões medidas das vigas do ensaio 1 - valores médios

Peça	b_f	t_f	d	t_w
-	mm	mm	mm	mm
V1	129	9,0	349	6,5
V2	128	9,8	352	6,4

4.5.3. Levantamento da geometria dos elementos utilizados no Ensaio 2

As tabelas seguintes apresentam as dimensões medidas dos elementos pertencentes ao segundo ensaio.

Tabela 4.6 - Dimensões medidas das cantoneiras de assento do ensaio 2 - valores médios

Peça	l_1	l_2	L	t
-	mm	mm	mm	mm
C1	155	153	184	13,2
C2	155	153	185	13,2

Tabela 4.7 - Dimensões medidas das cantoneiras de alma do ensaio 2 - valores médios

Peça	l_1	l_2	L	t
-	mm	mm	mm	mm
A1	127	126	208	9,9
A2	128	124	209	9,4
A3	127	126	206	9,5
A4	128	125	206	9,8

Tabela 4.8 - Dimensões medidas do pilar do ensaio 2 - valores médios

Peça	b_f	t_f	d	t_w
-	mm	mm	mm	mm
P1	370	15,3	310	11,4

Tabela 4.9 - Dimensões medidas das vigas do ensaio 2 - valores médios

Peça	b_f mm	t_f mm	d mm	t_w mm
V1	130	9,8	353	6,6
V2	128	9	351	6,5

4.6. Propriedades dos materiais

Neste item, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados: concreto e barras de aço.

4.6.1. Concreto

O concreto utilizado foi usinado, com *slump* pedido de 16 +- 3 cm. A resistência característica esperada aos 28 dias era de 30 MPa e para um melhor desempenho à fissuração foi adicionada fibra de polipropileno ao concreto.

A concretagem dos dois ensaios foi feita simultaneamente e o concreto pertencia a uma mesma betonada. Para caracterização do material, foram colhidos 20 corpos de prova com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Os ensaios de compressão seguiram as especificações da ABNT NBR 5738 (Procedimento para moldagem e cura para corpos-de-prova) e ABNT NBR 5739 (Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto).

Segundo a ABNT NBR 12655 (Concreto – preparo, controle e recebimento), para lotes de até 50 m³ devem ser retirados um exemplar para ensaio, para cada idade de rompimento. Pela norma, cada exemplar deve ser constituído por no mínimo dois corpos de prova.

Para o presente trabalho, foram ensaiados exemplares, constituídos por quatro corpos de prova, para as idades de 7 dias, 14 dias, 28 dias e ainda no dia em que a ligação foi ensaiada (60 dias) com o intuito de obter-se a resistência característica à compressão mais próxima possível da realidade.

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão realizados estão apresentados na Tabela 4.10, assim como a resistência característica obtida aos 28 dias, utilizada para cálculo das previsões teóricas.

Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios à compressão dos corpos de prova de concreto

Corpo de Prova	Resistência à compressão 7 dias (MPa)	Resistência à compressão 14 dias (MPa)	Resistência à compressão 28 dias (MPa)	Resistência à compressão 60 dias (MPa)
CP – 01	20,3718	-	-	-
CP – 02	23,2578	-	-	-
CP – 03	22,6920	-	-	-
CP – 04	19,2401	-	-	-
CP – 05	-	29,9919	-	-
CP – 06	-	27,5020	-	-
CP – 07	-	29,4260	-	-
CP – 09	-	27,9547	-	-
CP – 10	-	-	36,4995	-
CP – 11	-	-	33,6701	-
CP – 12	-	-	35,2546	-
CP – 13	-	-	34,1228	-
CP – 14	-	-	-	35,3212
CP – 15	-	-	-	36,5213
CP – 16	-	-	-	34,3213
CP – 17	-	-	-	37,5368
Média	21,3904	28,7186	34,8868	35,9252
Desvio	1,9011	1,1811	1,2600	1,4012
Fc (MPa)	18,25	26,35	32,80*	33,61

* valor correspondente ao fck utilizado em projeto

Um detalhe da máquina utilizada para os ensaios de compressão é mostrado na Figura 4.16.



Figura 4.16 – Detalhe da máquina utilizada para o ensaio de compressão

4.6.2. Aço

Na Tabela 4.11 são apresentados os valores das tensões de escoamento e ruptura para as barras de aço utilizadas. Os valores mostrados na tabela são as médias de quatro corpos de prova ensaiados.

Tabela 4.11 - Propriedades mecânicas médias das barras de aço

	ϕ (mm)	Tensão de escoamento - f_y (MPa)	Tensão de ruptura - f_u (MPa)
Aço das armaduras principais da laje de concreto	10	636,62	810,90

4.7. Montagem dos ensaios

A montagem dos ensaios foi feita no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio.

Os protótipos foram montados e concretados simultaneamente e posteriormente cada modelo foi levado isoladamente ao local de ensaio.

A sequência de execução em laboratório, para os serviços feitos simultaneamente para os dois ensaios, foi:

1. montagem da ligação metálica;
2. aperto dos parafusos;
3. posicionamento da “*Steel Deck*”;
4. montagem da fôrma de madeira;
5. solda dos conectores “*Perfobond*”;
6. posicionamento da armação negativa principal;
7. instrumentação (apenas os “*strain gauges*” instalados nos vergalhões);
8. posicionamento da malha para fissuração;
9. concretagem;
10. desfôrma;

Após as etapas descritas acima, trabalhou-se com cada protótipo isoladamente, seguindo-se a sequência:

1. transporte e inversão do protótipo 1;
2. locação do protótipo 1 no local de ensaio;
3. instrumentação do Ensaio 1 (transdutores de deslocamento e extensômetros nas peças metálicas);
4. realização do Ensaio 1;
5. transporte e inversão do protótipo 2;
6. locação do protótipo 2 no local de ensaio;
7. instrumentação do Ensaio 2 (transdutores de deslocamento e extensômetros nas peças metálicas);
8. realização do Ensaio 2;
9. inspeção dos ensaios.

Algumas etapas da montagem dos ensaios em laboratório são apresentadas nas Figuras 4.17 a 4.22.



Figura 4.17 – Detalhe da ligação metálica



Figura 4.18 – Detalhe da fôrma de fechamento das lajes



Figura 4.19 - Solda dos “perfobonds”



Figura 4.20 – Detalhe da armadura principal



Figura 4.21 – Detalhe da armação completa



Figura 4.22 - Detalhe da armadura no “Perfobond”

O aperto dos parafusos foi feito de acordo com as especificações da NBR 8800:2008. Primeiramente realizou-se o pré-torque, que é o aperto dos parafusos através da força do operário utilizando uma chave normal. Logo após, foi feito o aperto por rotação da porca, para atingir-se a protensão indicada na norma. Este

aperto varia de acordo com a relação comprimento/diâmetro do parafuso, para o parafuso usado, a rotação da porca prevista é de 1/3 de volta.

A concretagem foi realizada através de caminhão betoneira de uma firma especializada. Foi medido o *slump* e 20 corpos de prova foram colhidos para avaliação da resistência à compressão. O concreto foi lançado através de bomba e vibrado com vibrador de agulha. Um detalhe da concretagem das lajes é mostrado na Figura 4.23.

A cura foi feita durante 7 dias, molhando-se a laje e cobrindo-a com lona plástica. A desforma foi realizada quando o concreto atingiu a idade de 14 dias.



Figura 4.23 – Concretagem

Como os protótipos foram montados fora do local de ensaio, foi necessário movimentá-los para o posicionamento correto após a desforma. O passo seguinte foi inverter a ligação, já que o método de ensaio utilizado foi o cruciforme invertido. Foram utilizados alguns ganchos como pontos de auxílio para inversão da ligação. A Figura 4.24 apresenta um detalhe destes dois procedimentos.



Figura 4.24 - Transporte e inversão do modelo experimental, respectivamente

4.8. Instrumentação

4.8.1. Primeiro ensaio

A instrumentação teve como finalidade obter os deslocamentos verticais, os quais seriam utilizados para cálculo da rotação da ligação e as deformações em alguns elementos do modelo. Para isto, foram utilizados extensômetros elétricos uniaxiais, extensômetros elétricos do tipo roseta e transdutores de deslocamento.

Para aplicação de carga no primeiro ensaio, foi usado um atuador hidráulico com capacidade de 600 kN fixado em uma viga de reação.

Para leitura das cargas, foram necessárias quatro células de carga, três para leitura das reações de apoio e uma para controle da carga aplicada ao pilar. A célula de carga posicionada no pilar tinha capacidade de 200 kN. Nos elementos de apoio, as duas células situadas no lado direito da ligação, tinham 50 kN de capacidade cada e a do apoio situado do lado esquerdo tinha capacidade de 100 kN.

4.8.1.1. Deformações

Primeiramente, foram posicionados os extensômetros uniaxiais nos vergalhões, já que estes deveriam ser colocados antes da concretagem. Todos os extensômetros utilizados foram da EXCEL SENSORES IND. COM. EXP. LTDA. Detalhes da instrumentação das barras de aço são mostrados na Figura 4.25. Para proteger os “*strain gauges*” no momento da concretagem, foi utilizado silicone e nesta região fez-se o lançamento e a vibração do concreto cuidadosamente.



Figura 4.25 - Instrumentação: “*strain gauges*” nos vergalhões

Nos vergalhões, um total de oito extensômetros foi utilizado por ensaio. A posição e a nomenclatura adotada para estes “*strain gauges*” estão mostrados na Figura 4.26.

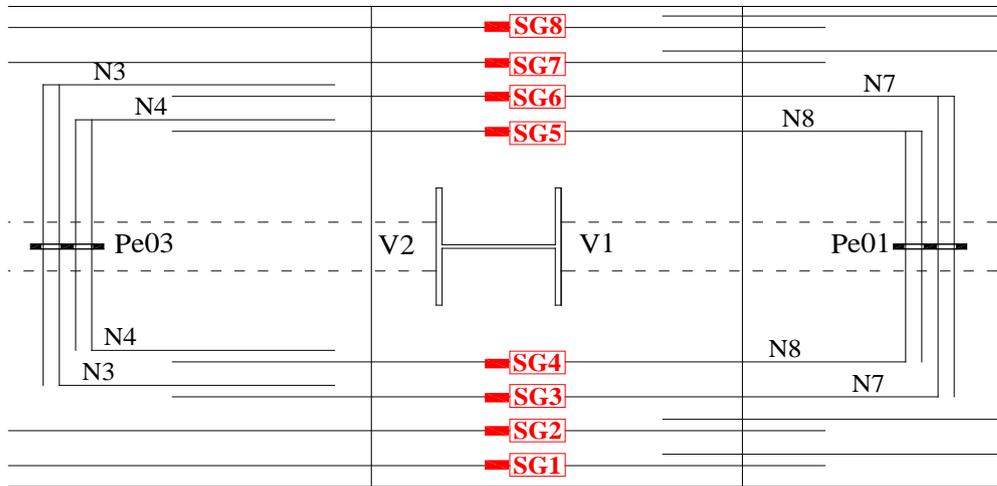


Figura 4.26 - Instrumentação: posição dos “*strain gauges*” nos vergalhões

Além dos vergalhões, extensômetros uniaxiais foram posicionados nas cantoneiras e em seções das vigas de aço. As rosetas foram utilizadas nas cantoneiras de alma.

Um total de 4 rosetas e 19 extensômetros uniaxiais foi usado por ensaio. A posição e numeração dos extensômetros e rosetas nas peças metálicas, além de alguns detalhes da instrumentação em laboratório, são mostrados nas Figuras 4.27 a 4.32.

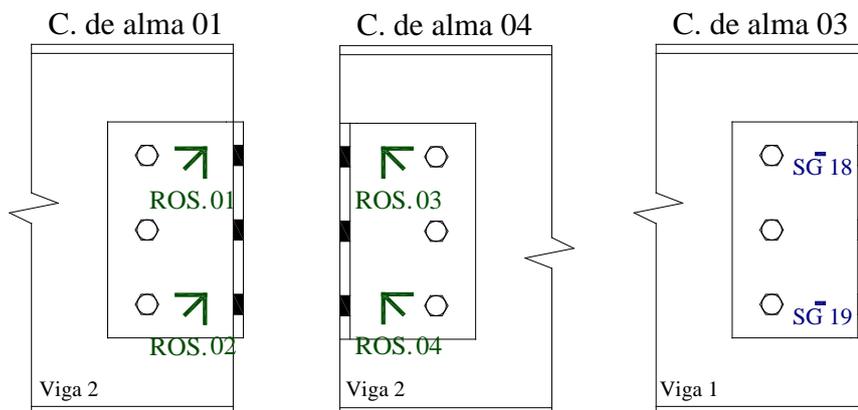


Figura 4.27 - Instrumentação: representação das rosetas e extensômetros nas cantoneiras de alma, Ensaio 1

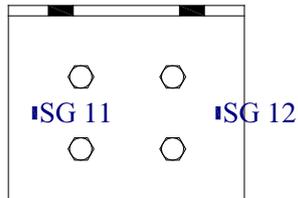


Figura 4.28 – Instrumentação: detalhe da sequência para colagem das rosetas na cantoneira de alma



Figura 4.29 - Instrumentação pronta das cantoneiras de alma

Cantoneira de assento 01



Cantoneira de assento 02

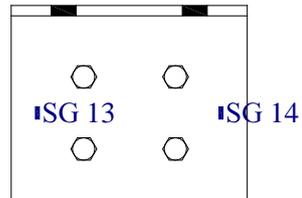


Figura 4.30 – Instrumentação: representação dos extensômetros nas cantoneiras de assento



Figura 4.31 - Instrumentação pronta das cantoneiras de assento

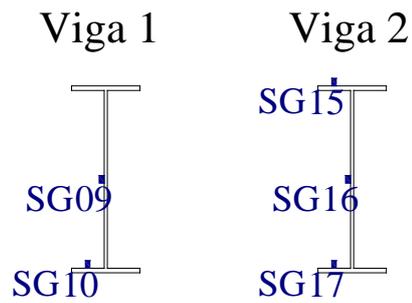


Figura 4.32 – Instrumentação: representação dos extensômetros nas vigas

4.8.1.2. Deslocamentos

Para medição dos deslocamentos verticais, foram utilizados 6 transdutores de deslocamento posicionados nas vigas e numerados de acordo com a Figura 4.33.

Os transdutores de deslocamento foram fixados em dispositivos não pertencentes ao ensaio, apoiados sobre a laje de reação.

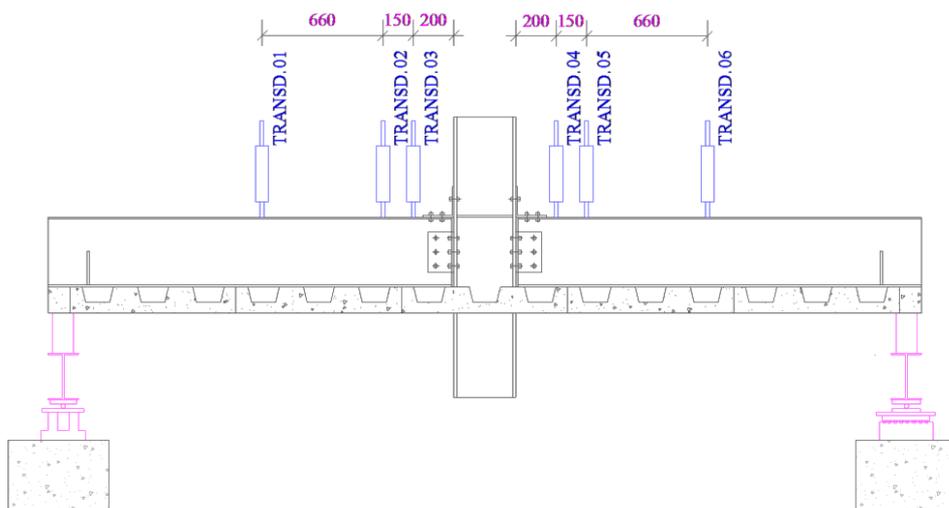


Figura 4.33 - Instrumentação: representação do posicionamento dos transdutores de deslocamento

4.8.2. Segundo ensaio

A instrumentação do segundo ensaio foi feita igual à mostrada no item 4.8.1 para o primeiro ensaio, com exceção do posicionamento das rosetas e

extensômetros das cantoneiras de alma. As rosetas 1 e 2 foram posicionadas na cantoneira de alma 04, as 3 e 4 na cantoneira de alma 03 e os “strain gauges” 18 e 19 na cantoneira de alma 01, conforme apresentado na Figura 4.34.

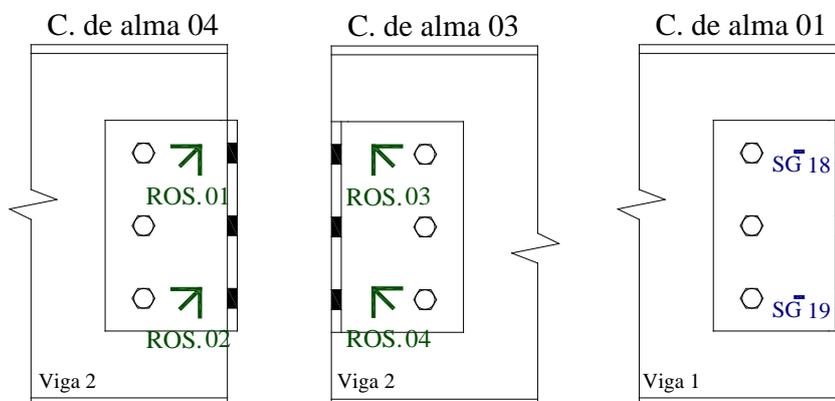


Figura 4.34 - Instrumentação: representação das rosetas e extensômetros nas cantoneiras de alma, Ensaio 2

4.9. Procedimento de Ensaio

4.9.1. Primeiro ensaio

Como já foi dito anteriormente, o ensaio foi realizado invertido, com a carga aplicada ao pilar através de um atuador hidráulico com capacidade de 600 kN. Para medir-se as reações nos apoios, foram utilizadas inicialmente quatro células de carga, porém, devido a uma variação entre a carga aplicada e aquelas lidas pelas células localizadas nos elementos de apoio, o sistema foi mudado para três células de carga (isto diminui a chance de erro entre as leituras, pois proporciona a formação de um plano entre as três células mesmo que haja alguma pequena diferença no nivelamento das mesmas). O detalhe dos três pontos de apoio utilizados após a mudança descrita anteriormente é mostrado na Figura 4.35.

Para o primeiro ensaio, a carga foi aplicada utilizando-se um pórtico de reação. O sistema de aplicação de carga foi o mostrado na Figura 4.36.

Com o objetivo de averiguar e ajustar o funcionamento do atuador e o desempenho da instrumentação utilizada, uma série de pré-cargas foi realizada. As

cargas máximas e as observações para cada pré-teste estão descritas na Tabela 4.12.

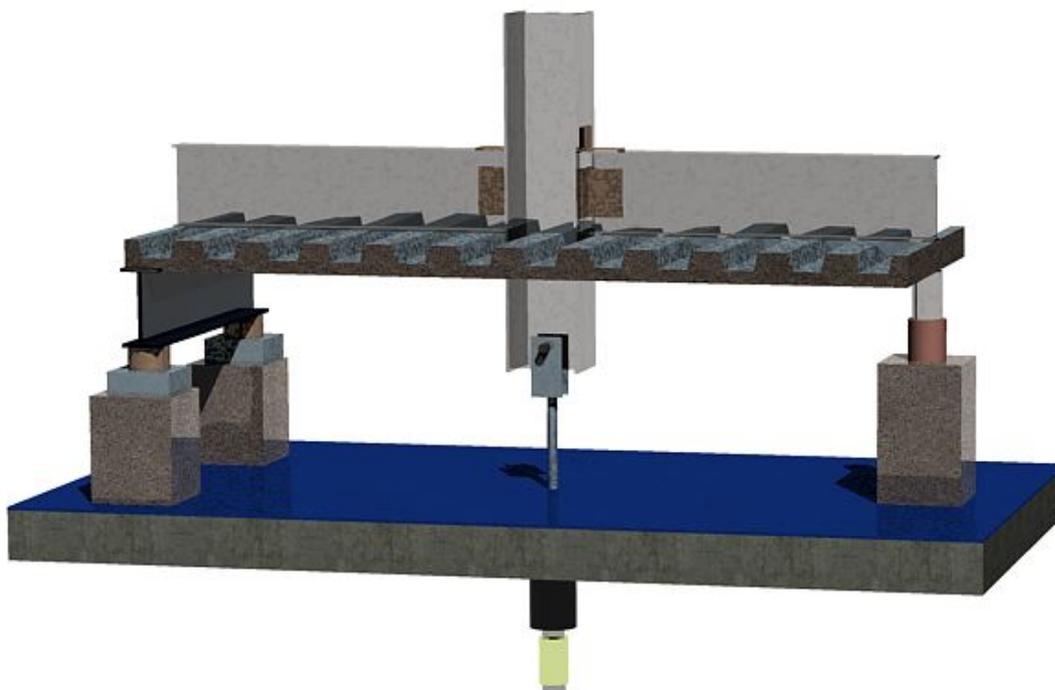


Figura 4.35 - Representação 3D do sistema de aplicação de carga utilizado

Tabela 4.12 - Estágios de carregamento do Ensaio 1 e principais observações

Pré-carga	$P_{\text{máx}}$ (kN)	Observações
1	10	Houve uma diferença considerável entre a carga aplicada e a resultante das reações nos apoios.
2	40	A diferença se manteve para um carregamento maior, decidiu-se então mudar o sistema de apoio (3 células nos apoios ao invés de 4).
3	60	Com a mudança do sistema, a diferença foi aceitável, o sistema então foi definido.
4	80	-

As leituras eram obtidas automaticamente através de um programa de aquisição de dados. Para avaliação das fissuras e do protótipo como um todo, a cada incremento de 10 kN era feita uma pausa na aplicação de carga.

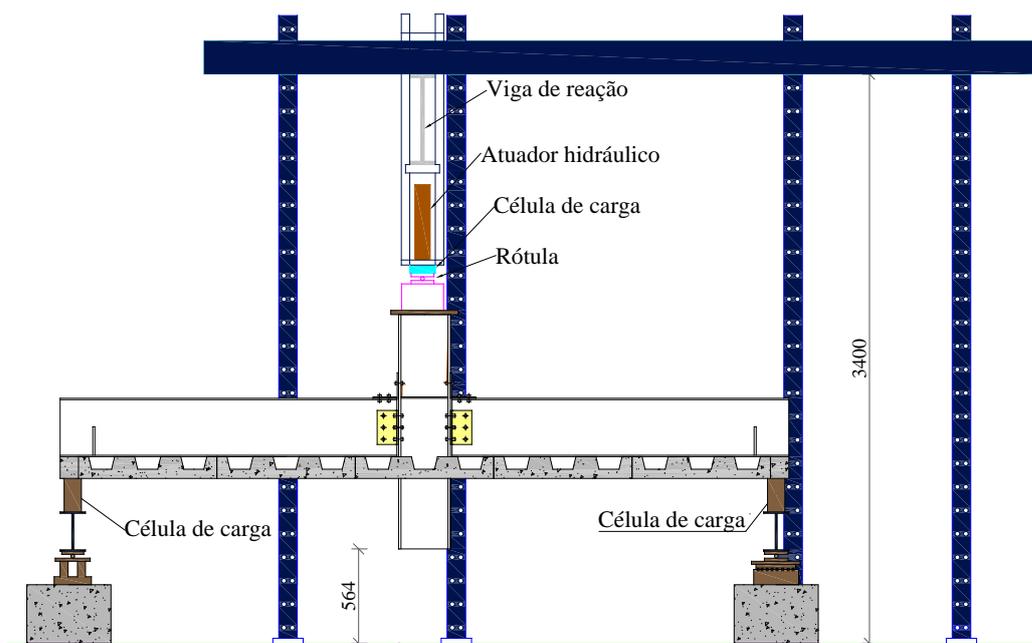


Figura 4.36 - Esquema de ensaio utilizado para o protótipo 1

4.9.2. Segundo ensaio

Para o segundo ensaio, realizou-se uma mudança no sistema de aplicação de carga. Percebeu-se que o sistema utilizado no primeiro ensaio apresentava-se instável quando cargas mais elevadas eram alcançadas.

O sistema de aplicação de carga para o protótipo 2 é mostrado nas Figuras 4.35 e 4.37. Para este segundo arranjo, foi utilizada a laje de reação ao invés do pórtico usado no primeiro ensaio.

O segundo sistema apresentou-se como uma opção mais eficaz, tanto no que se refere à leitura das cargas (a soma das cargas lidas nas células localizadas nos sistemas de apoio foi bem próxima da carga aplicada), quanto na estabilidade do ensaio.

Outra mudança, realizada para o Ensaio 2, foi a quantidade de cargas aplicadas. Fez-se apenas uma pré-carga com carregamento máximo igual a 40 kN, com objetivo de mais uma vez verificar todo o funcionamento do sistema. A segunda aplicação de carga no sistema foi levada até o carregamento de ruína.

Nas Figuras 4.38 e 4.39 são apresentados detalhes do ensaio: sistema de aquisição de dados e aplicação de cargas.

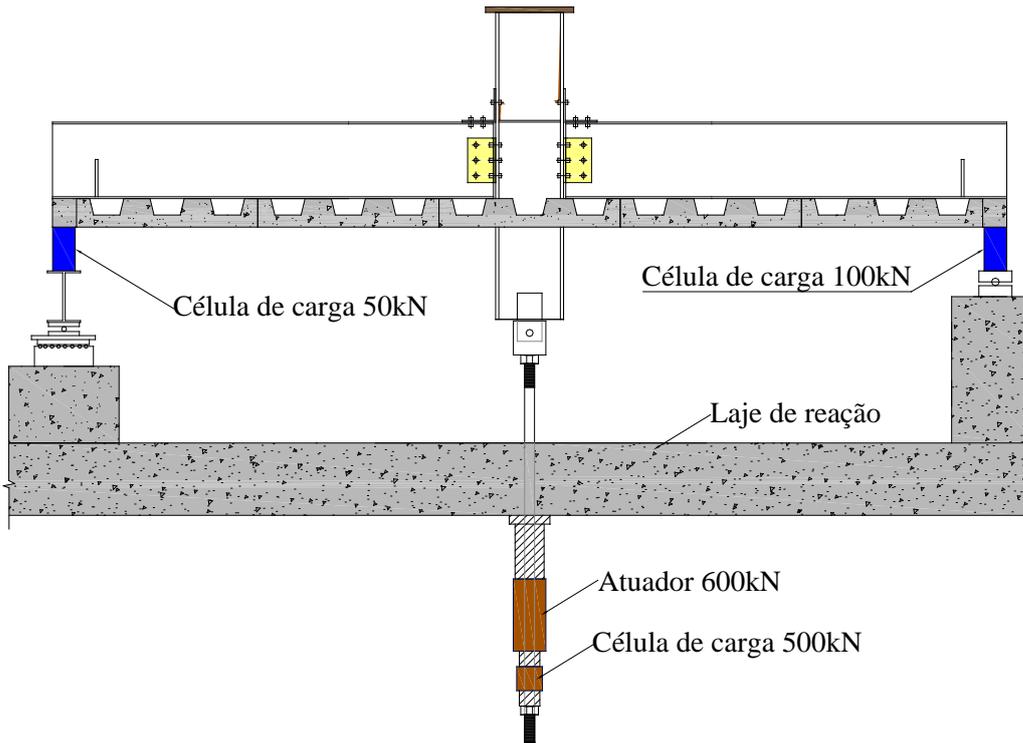


Figura 4.37 - Esquema do ensaio utilizado para o último carregamento do Ensaio 1 e todos os estágios do Ensaio 2

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312977/CA



Figura 4.38 - Detalhe do sistema de aplicação de carga e da aquisição de dados, Ensaio 2



Figura 4.39 - Detalhe do atuador fixado na laje de reação, Ensaio 2