

4 Programa Experimental

4.1. Parâmetros de Projeto

O comportamento de dois modelos de vigas mistas, submetidas a um carregamento estático monotônico, foi analisado experimentalmente no Laboratório de Estruturas da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As vigas mistas parcialmente revestidas foram submetidas a um ensaio de flexão simples, buscando-se avaliar a resistência, a rigidez e foram identificados os modos de ruptura e comportamento estrutural. Foram estudados dois modelos que se diferenciam pelo posicionamento e quantidade de aberturas na viga metálica e área de aço. Eles foram denominados de viga mista 01 (VM-01) e de viga mista 02 (VM-02). Os perfis correspondentes a cada viga mista foram nomeados como V-01 e V-02.

A ideia inicial era realizar um ensaio com as duas vigas mistas solidarizadas por uma capa de concreto de 30 mm, de acordo com o modelo apresentado no Capítulo 3. Entretanto, com o objetivo de avaliar cada viga separadamente, optou-se pela realização de dois ensaios.

A escolha dos protótipos foi realizada baseando-se no estudo paramétrico desenvolvido no Capítulo 3. Por meio da Tabela 3.3, foi escolhido o perfil W360 x 32,9 para um vão de 6 m. A largura da laje de concreto foi definida de acordo com a disponibilidade de espaço no laboratório para confecção e movimentação dos modelos.

Neste capítulo, são apresentados os modelos físicos estudados, incluindo: os materiais utilizados para a sua confecção, a geometria, os ensaios de caracterização dos materiais e resultados, processo de confecção dos modelos, instrumentação adotada e sistema de ensaio.

4.2. Fabricação das Vigas Metálicas

As vigas metálicas, as vigas de apoio e as chapas das ligações foram fabricadas por um parceiro industrial, Metalfenas. Os perfis celulares foram criados a partir de um perfil W 360 x 32,9 de aço ASTM-A572, cortado no formato de uma viga castelada com aberturas retangulares, ver Figura 4.1. Cada metade formou um novo perfil, soldando-se uma chapa metálica em cima da alma de ambas as vigas, e uma chapa nas extremidades da V-01, como mostrado na Figura 4.2. O aço das chapas foi o ASTM-A36.

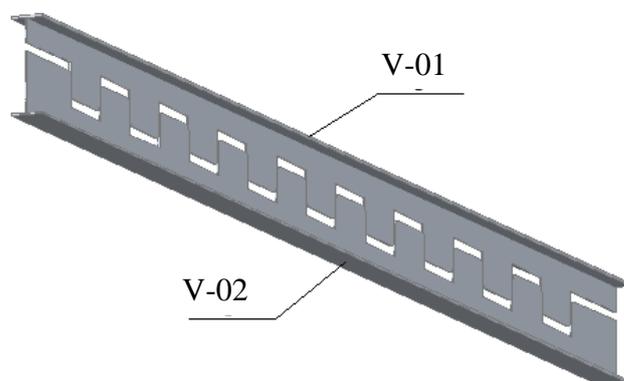


Figura 4.1 - Modelo do corte no perfil metálico.

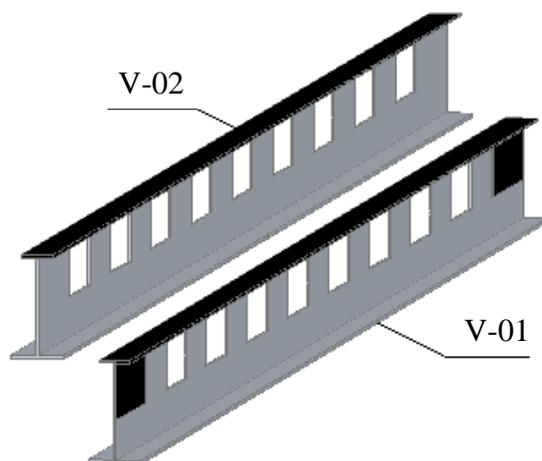


Figura 4.2 - Vigas formadas a partir de um perfil W com chapa metálica soldada no topo da alma.

Cada perfil possui comprimento total de 6000 mm e altura de 252,5 mm. Devido à configuração de corte, a V-01 ficou com oito aberturas de alma visto que as aberturas próximas às extremidades foram fechadas. E a V-02 com nove aberturas.

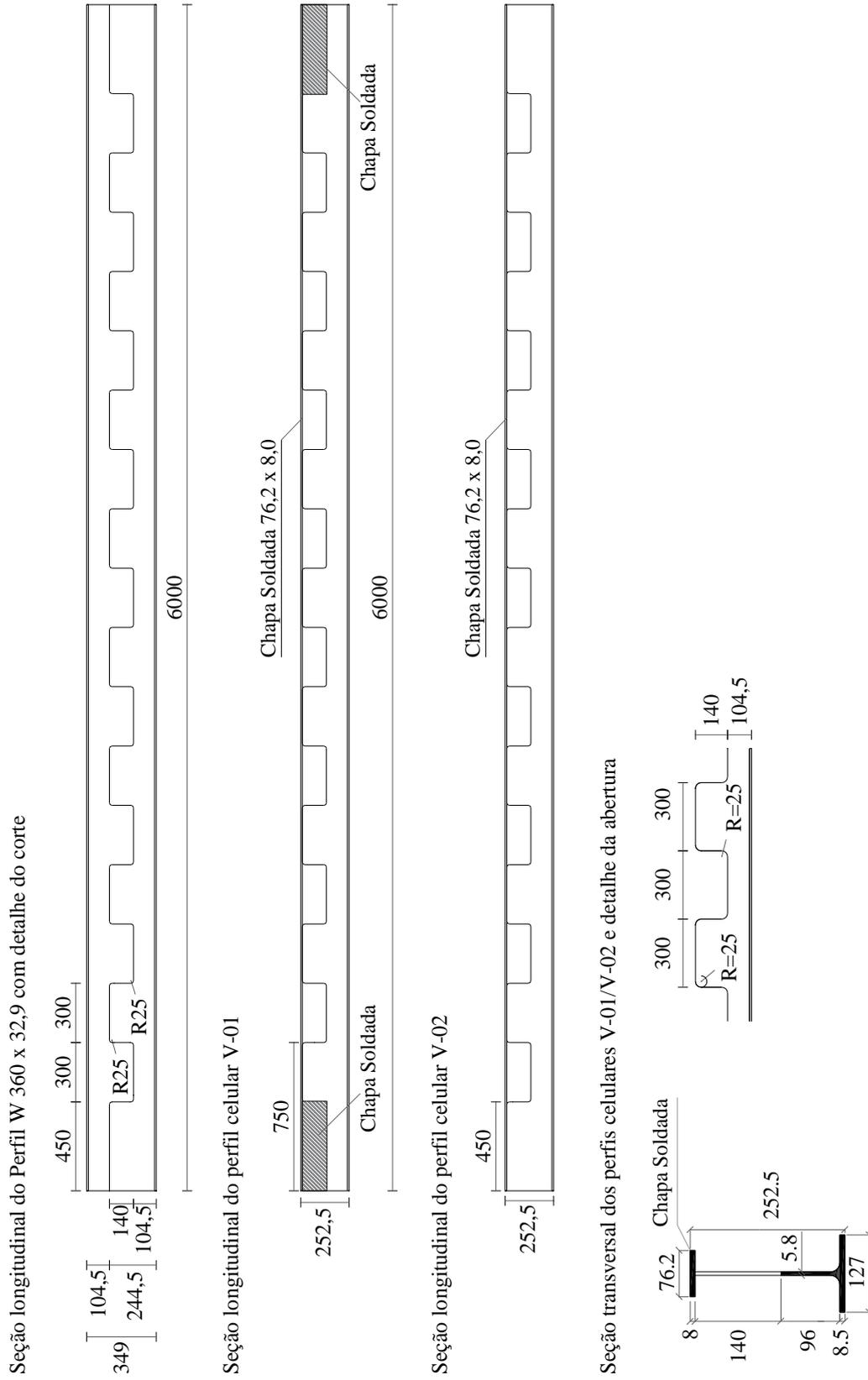
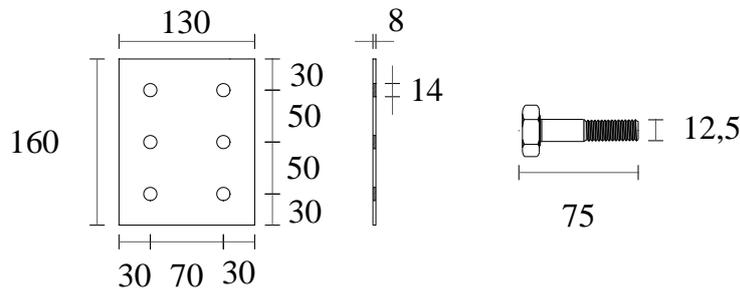


Figura 4.3 - Projeto de fabricação dos perfis celulares (dimensões em mm).

Na viga 01, o meio do vão coincide com a seção de alma cheia enquanto que na V-02 a seção da alma possui abertura. Na Figura 4.3 é apresentado o projeto de corte do perfil W360 x 32,9 e a configuração das vigas celulares.

A ligação dos perfis celulares com as vigas de apoio foi definida baseando-se na configuração inicial de somente um ensaio, como descrito anteriormente. As extremidades dos perfis são conectadas aos enrijecedores de alma das vigas de apoio. As ligações são feitas por meio de chapas metálicas e parafusos. A Figura 4.4 mostra detalhes do projeto de fabricação dos componentes da ligação.

- 8 chapas metálicas e 24 parafusos Ø1/2"



- 2 Vigas W 410 x 38,8

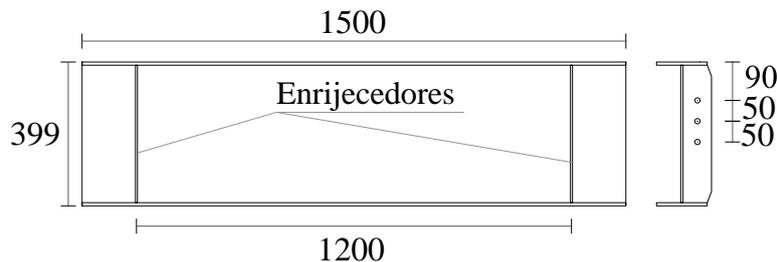


Figura 4.4 - Projeto de fabricação das vigas de apoio e elementos de ligação (dimensões em mm).

4.3.

Descrição dos Modelos de Ensaio

4.3.1.

Viga Mista 01

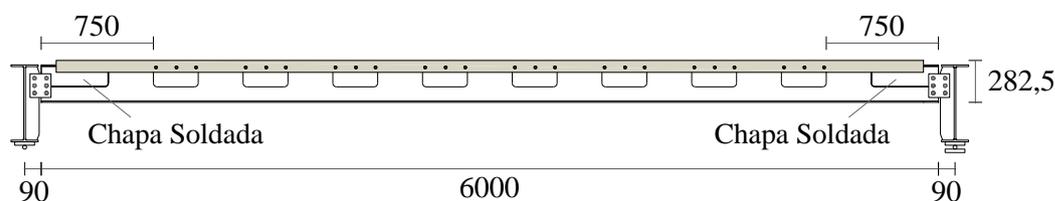
A viga mista 01 é composta pelo perfil celular V-01 embutido na laje de concreto. A laje de concreto possui 1200 mm de largura por 80 mm de espessura, sendo 50 mm do embutimento da viga metálica e 30 mm considerando a capa de concreto. A laje possui comprimento total de 5800 mm, menor que o perfil

celular. Esta dimensão foi tomada em razão da instrumentação adotada. O concreto utilizado foi usinado com resistência característica prevista de 30 MPa.

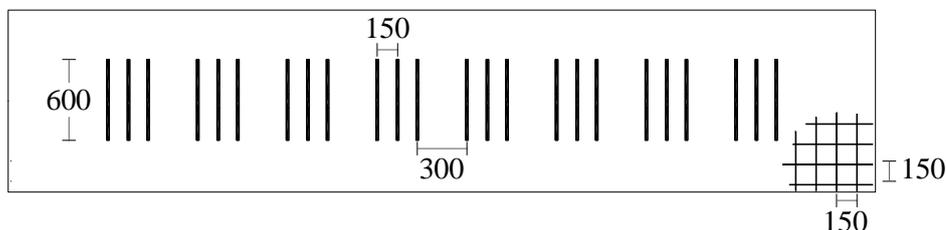
A laje foi reforçada, na face superior e inferior, com malha de aço CA-60 com diâmetro de 4,2 mm, e espaçamento de 150 mm em ambas as direções. Para a armadura transversal, foram utilizados vergalhões de aço tipo CA-50 com diâmetro de 10 mm e 600 mm de comprimento. Em cada abertura de alma, utilizaram-se três barras espaçadas a cada 150 mm.

O vão total da viga mista 01, considerando a distância de eixo a eixo da viga de apoio, foi de 6180 mm, 6000 mm do perfil celular mais 90 mm em cada extremidade da viga devido à ligação aparafusada. A Figura 4.5 mostra as seções longitudinal e transversal da viga VM-01.

Seção longitudinal da viga mista 1



Vista superior - Armadura transversal \varnothing 10 mm e detalhe da malha de aço \varnothing 4,2 mm



Seção transversal da viga mista 1

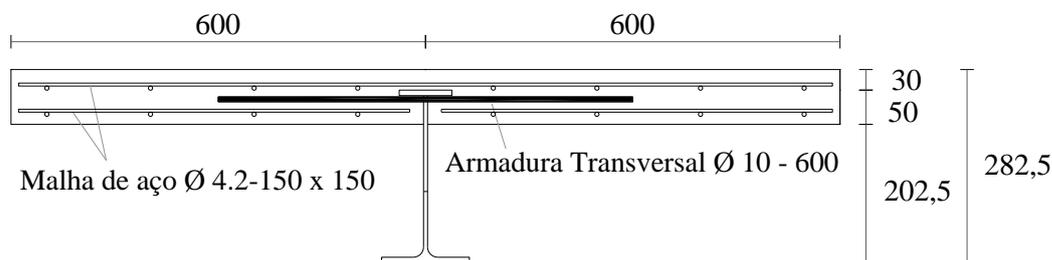


Figura 4.5 - Detalhamento das dimensões e posicionamento das armaduras no modelo VM-01 (dimensões em mm).

Na Figura 4.6, são mostrados os detalhes da ligação do modelo VM-01 com o perfil de apoio.

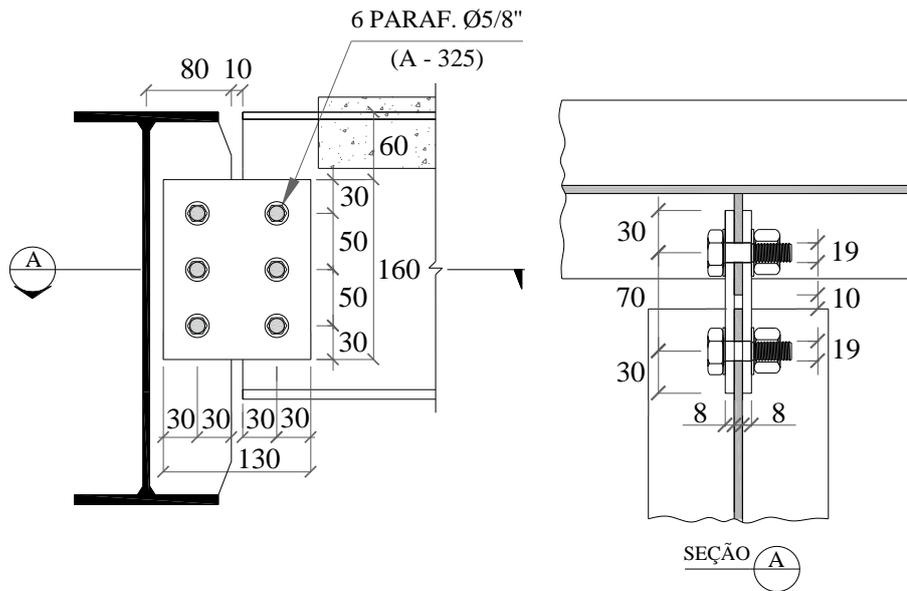


Figura 4.6 - Detalhe da ligação da VM-01 com a viga de apoio (dimensões em mm).

4.3.2. Viga Mista 02

A viga mista 02 foi feita utilizando o perfil celular V-02 embutido na laje de concreto. A laje possui as mesmas características do modelo VM-01, diferenciando-se no número de armaduras transversais, devido o perfil possuir uma quantidade maior de aberturas de alma. A Figura 4.7 mostra a seção longitudinal da viga VM-02.

Seção longitudinal da viga mista 2

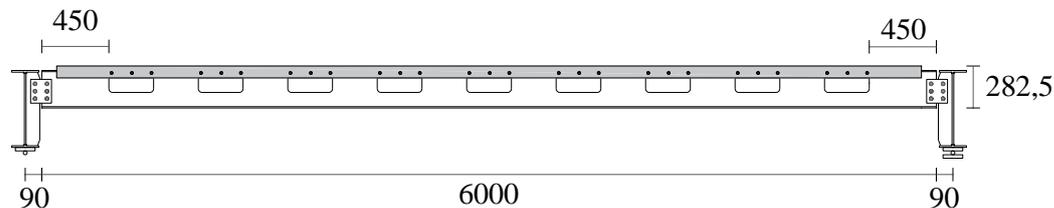


Figura 4.7 - Seção longitudinal do modelo VM-02 (dimensões em mm).

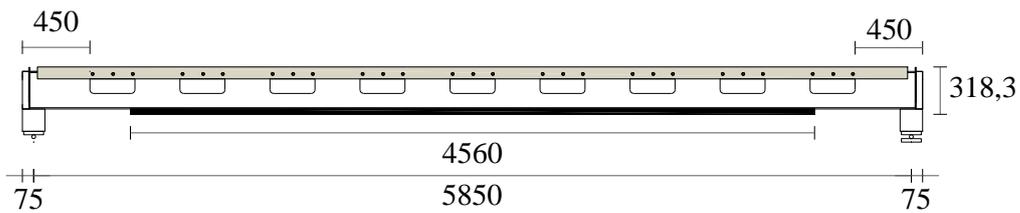
Após a realização do ensaio da viga VM-01, foram feitas algumas modificações no segundo ensaio, com o objetivo de melhorar suas propriedades.

Optou-se pelo aumento da área de aço do perfil celular, para isso, foi adicionado um perfil U de reforço, soldado na mesa inferior da V-02. Também foram modificados os apoios, retirando a viga de apoio e a ligação aparafusada, e

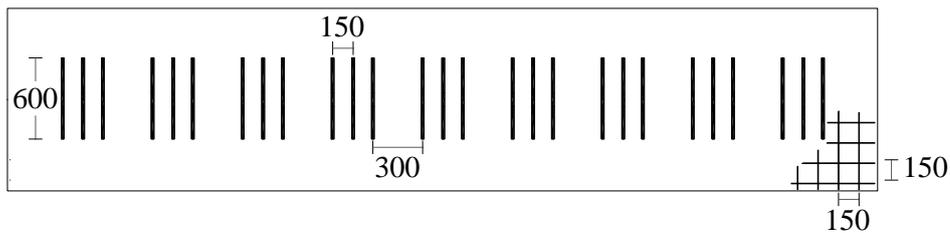
substituindo-os por uma viga de apoio H 150 mm x 150 mm e cantoneiras de travamento.

A nova configuração desta ligação é mostrada na Figura 4.9. A VM-02 foi apoiada sobre a viga H e travada lateralmente utilizando duas cantoneiras soldadas a mesa superior da V-02 e ao novo perfil de apoio. A Figura 4.8 mostra a configuração final da seção longitudinal e transversal da VM-02 e do perfil U de reforço.

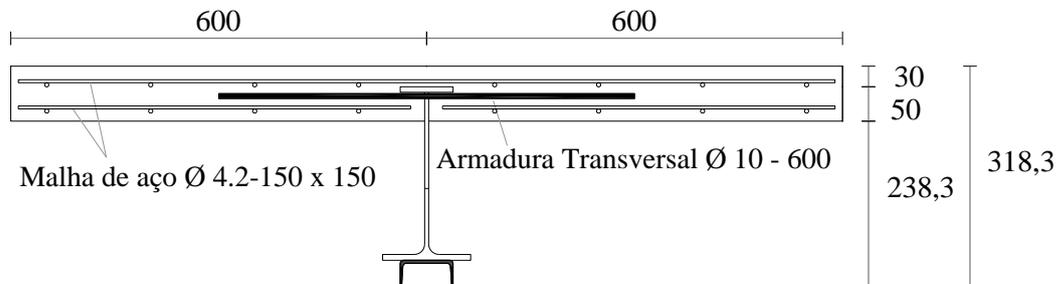
Seção longitudinal da viga mista 2



Vista superior - Armadura transversal \varnothing 10 mm e detalhe da malha de aço \varnothing 4,2 mm



Seção transversal da viga mista 2



Seção transversal do perfil U 3" x 6,11

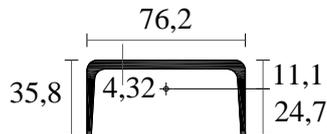


Figura 4.8 - Detalhamento das dimensões e posicionamento das armaduras no modelo VM-02, após as modificações (dimensões em mm).

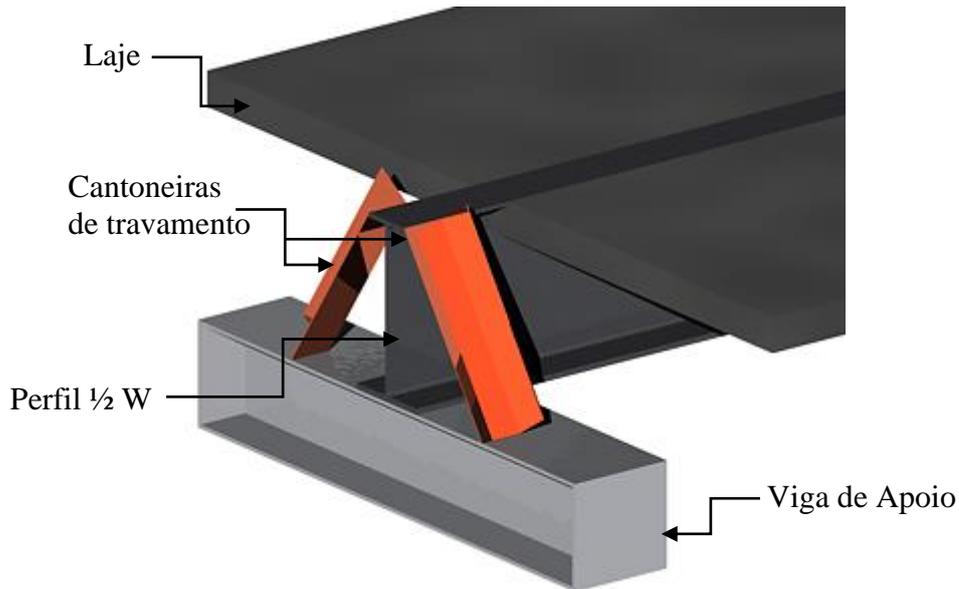


Figura 4.9 - Modelo do apoio da viga VM-02 com a viga H e cantoneiras.

4.4.

Levantamento da Geometria dos Elementos Empregados nos Testes

Para confirmação das dimensões de projeto, foi realizada a medição de todos os elementos. Os valores médios estão descritos na Tabela 4.1.

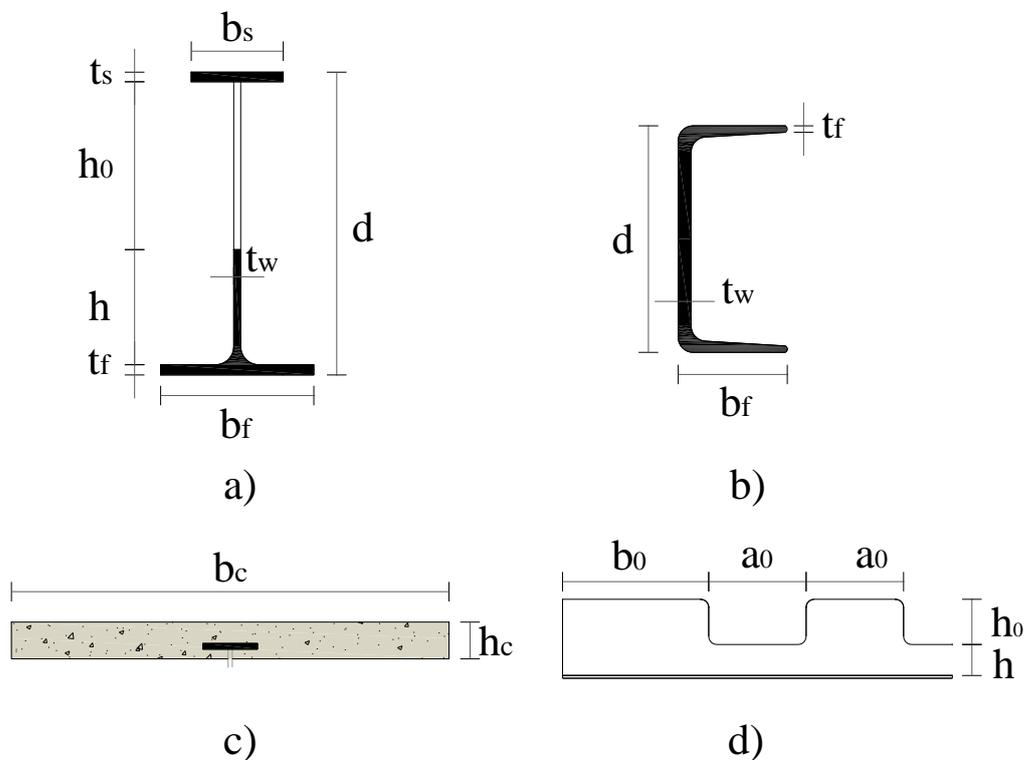


Figura 4.10 - Dimensão dos elementos: a) perfil celular; b) perfil U; c) laje de concreto; d) detalhe da abertura de alma.

Tabela 4.1 - Dimensões medidas dos Perfis metálicos e da abertura na alma. (valores médios)

Elemento	b_s	t_s	d	b_f	t_f	t_w	h	h_o	a_o	b_o
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
V-01	76,0	8	252	126	8,7	5,9	96	138	295	742
V-02	76,2	8	252	129	8,6	5,9	96	138	305	458
Perfil U	-	-	75,9	34,8	5,59	4,87	-	-	-	-

Tabela 4.2 - Dimensões medidas da laje de concreto. (valores médios)

Laje	b_c	h_c
	mm	mm
VM-01	1197,3	85,81
VM-02	1200	87,30

Os componentes da ligação foram medidos e foi encontrada diferença nos furos, que passaram de 14 mm (valor de projeto) para 19 mm. Conseqüentemente, os parafusos também foram modificados, utilizando-se parafusos com diâmetro de 16 mm.

4.5. Preparação dos Modelos em Escala Real

As vigas metálicas e os sistemas de apoios são mostrados na Figura 4.11. A confecção e ensaio dos modelos foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

A preparação dos protótipos para a concretagem da laje foi feita baseando-se na ideia inicial da realização de somente um ensaio. A concretagem iria ser realizada em duas etapas: uma pré-laje de 50 mm para cada viga, e em seguida uma capa de concreto de 30 mm solidarizando o conjunto. Entretanto, com a modificação para dois ensaios, foram feitas duas vigas mistas independentes. A confecção e concretagem das duas vigas foram feitas simultaneamente.



Figura 4.11 - Vigas metálicas posicionadas no Laboratório de Estruturas da PUC-Rio.

4.5.1. Montagem dos Perfis Celulares

No laboratório, foi feita a montagem da estrutura no local de ensaio. Para isso, quatro blocos de concreto foram posicionados para apoiar as vigas transversais.



a)



b)



c)



d)

Figura 4.12 – a) e b) Vigas montadas em baixo do pórtico de reação c) e d) detalhe dos aparelhos de apoio fixo e móvel, respectivamente.

Essas vigas foram colocadas sobre quatro aparelhos de apoio, dois móveis de um lado e outros dois fixos, de forma a ficarem biapoiadas, resultando em um vão de 6,18 m entre eixos.

As vigas metálicas foram aparafusadas por meio de chapas às vigas de apoio, e deixando-se um espaçamento de 1200 mm entre eixos, como mostrado na Figura 4.13.



Figura 4.13 - Ligação da Viga metálica com a viga de apoio.

4.5.2. Forma e Armadura

Após a montagem das vigas, foi feita a forma de madeira garantindo-se que o perfil ficasse 50 mm embutido na laje. O comprimento das formas ficou menor que o perfil metálico com o intuito de deixar espaço nas extremidades para o posicionamento dos transdutores de deslocamentos, obtendo-se a medição do deslizamento aço-concreto. O sistema de formas foi o mesmo para ambas as vigas. Para separá-las, foi utilizada uma folha de compensado de 10 mm de espessura cortada na altura da laje, 80 mm, ver Figura 4.14.

Em seguida, foi feito o corte e montagem das armaduras transversais e malha superior e inferior. O posicionamento das barras de aço e da tela foi feito utilizando-se espaçadores plásticos, como mostrado na Figura 4.15. Também foram colocados ganchos para realizar-se a movimentação das vigas após a concretagem.

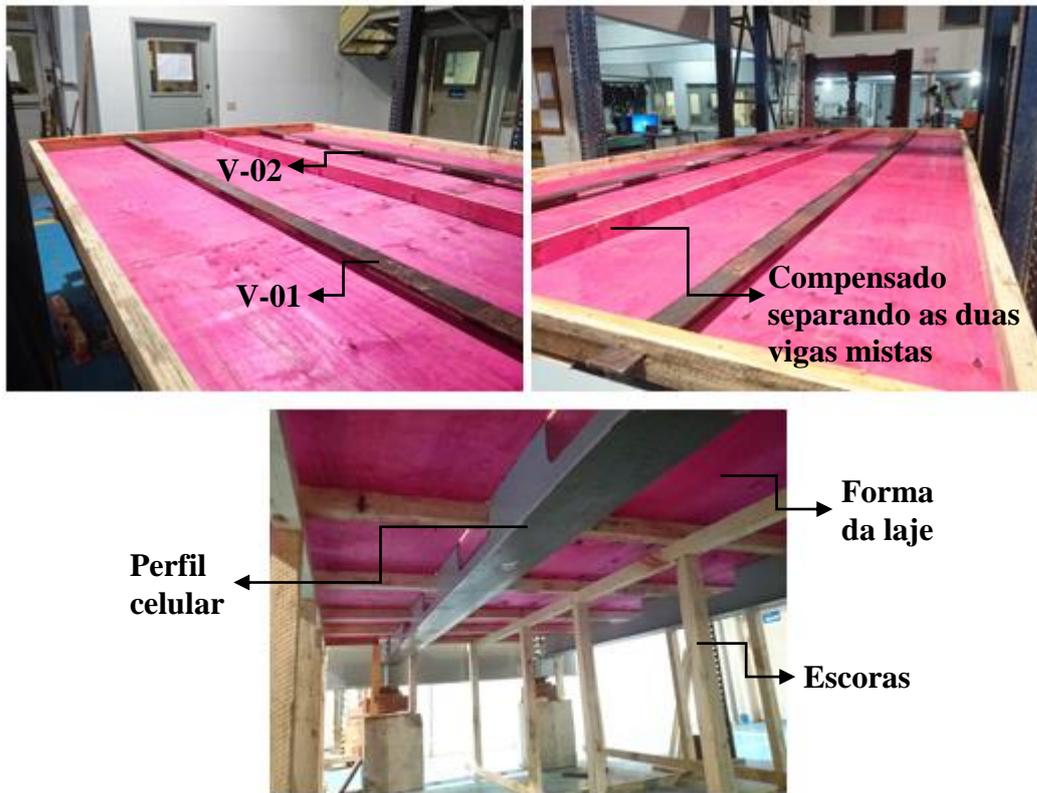


Figura 4.14 – Detalhe da forma de madeira para a laje de concreto.

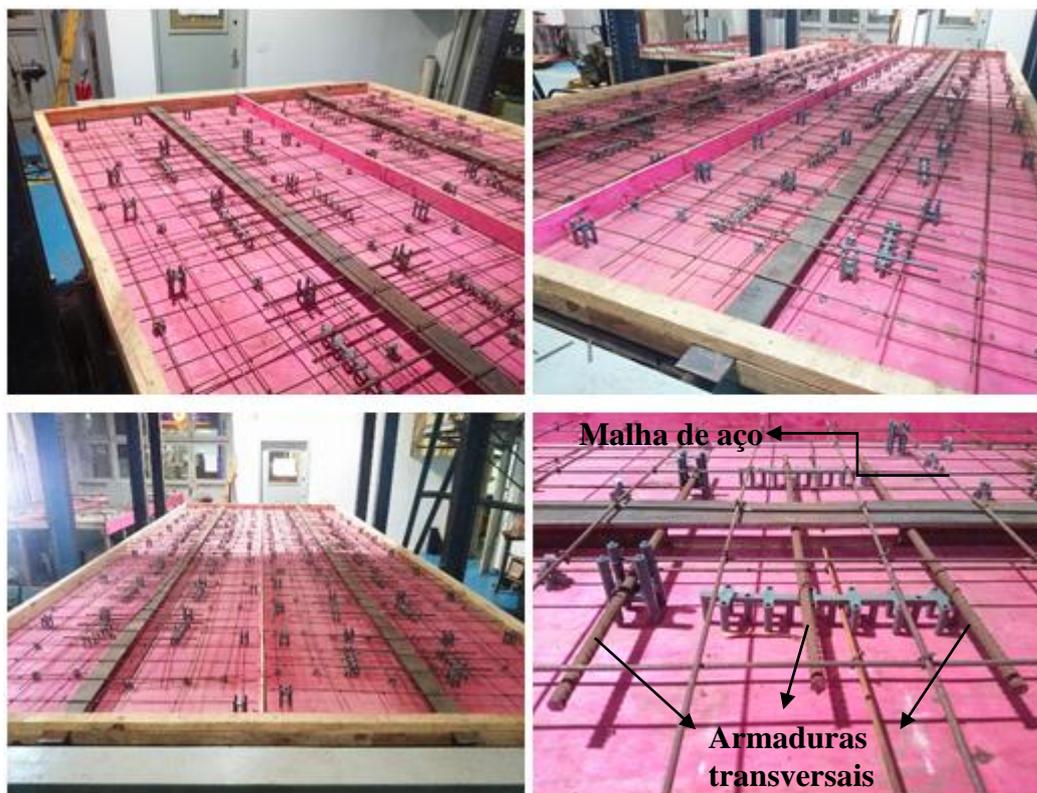


Figura 4.15 – Detalhes das armaduras transversais e da malha de aço posicionadas na forma.

4.5.3. Concreto

Para a concretagem, foi utilizado concreto usinado de resistência característica esperada de 30 MPa. Devido às aberturas na alma do perfil, foi escolhido brita 0 e também foi adicionado fibra de polipropileno auxiliando no combate às fissuras. O lançamento foi feito por meio de bomba hidráulica e tubulações. O abatimento do cone de concreto pedido foi de 160 mm +/- 30 e o valor medido no slump test foi de 140 mm, ver Figura 4.16.



Figura 4.16 - Realização do slump test.



Figura 4.17 - Concretagem das vigas mistas.

A cura do concreto foi feita durante sete dias molhando-se a laje e cobrindo-a com lona plástica. A desforma foi realizada no 14º dia após a concretagem.

4.5.4. Alterações Realizadas para o Ensaio 2

Após a realização do ensaio da VM-01, foram feitas as seguintes alterações para o segundo ensaio:

- foram adicionados à mesa inferior da viga VM-02 três segmentos de perfil U, com comprimento aproximado de 1,5 m cada, soldados de topo entre si e posicionados no meio do vão. Eles foram ligados à mesa inferior da viga mista por meio de solda de filete, com o objetivo de aumentar a área de aço e mobilizar a estrutura e assim, verificar-se a extensão dos efeitos de plastificação da seção de aço ou ruptura do concreto em compressão.



Figura 4.18 - Perfil U soldado na mesa inferior da viga mista VM-02.

- também foi alterado o sistema de apoio criando-se condições de mais estabilidade do ensaio nas extremidades (Figura 4.19).



Figura 4.19 - Detalhe do apoio do modelo 2.

4.6. Caracterização dos Materiais

4.6.1. Concreto

O objetivo desse ensaio foi determinar-se a resistência à compressão do concreto empregado na laje.

Para o ensaio a compressão do concreto, foram moldados 12 corpos de prova (CP's) cilíndricos de dimensões 15 x 30 cm, para uma expedição de caminhão betoneira de concreto. Sendo, 4 corpos de prova para serem ensaiados com 7 dias, 4 CP's com 14 dias e 4 para serem ensaiados aos 28 dias.



Figura 4.20 - Corpos de prova a serem ensaiados aos 28 dias e corpo de prova após ensaio.

Para o ensaio foi utilizada a máquina universal de ensaios. A Tabela 4.3 mostra os valores da resistência à compressão do concreto, medidos a cada idade.

Tabela 4.3 - Resistência à compressão do concreto.

Amostragem	Nº CP's	Idade dias	f_{cm} MPa	Desvio Padrão Sd	f_{ckest} MPa
01	4	7	21,39	1,90	18,25
02	4	14	28,29	1,00	26,63
03	4	28	35,14	1,41	32,80

f_{cm} – é a resistência média dos exemplares em cada idade.

f_{ckest} – valor estimado da resistência característica à compressão na idade especificada.

Os CP's foram moldados e ensaiados segundo as normas NBR 5738 e NBR 5739, respectivamente. O preparo, controle e recebimento do concreto seguiram as recomendações da norma NBR 12655.

4.6.2. Aço

Os perfis celulares empregados foram fabricados com aço estrutural ASTM A572 grau 50. As propriedades mecânicas de resistência ao escoamento (f_y) e resistência a ruptura (f_u) foram determinadas por meio de ensaios de tração direta, seguindo as prescrições da norma ASTM A370-14. As deformações foram medidas utilizando extensômetros elétricos, um em cada lado do corpo-de-prova.

No total, foram retirados quatro corpos-de-prova próximos das extremidades das vigas metálicas. Em cada perfil foram removidos dois elementos, um de cada lado da mesa inferior. A Figura 4.21 apresenta o corpo-de-prova e suas dimensões.

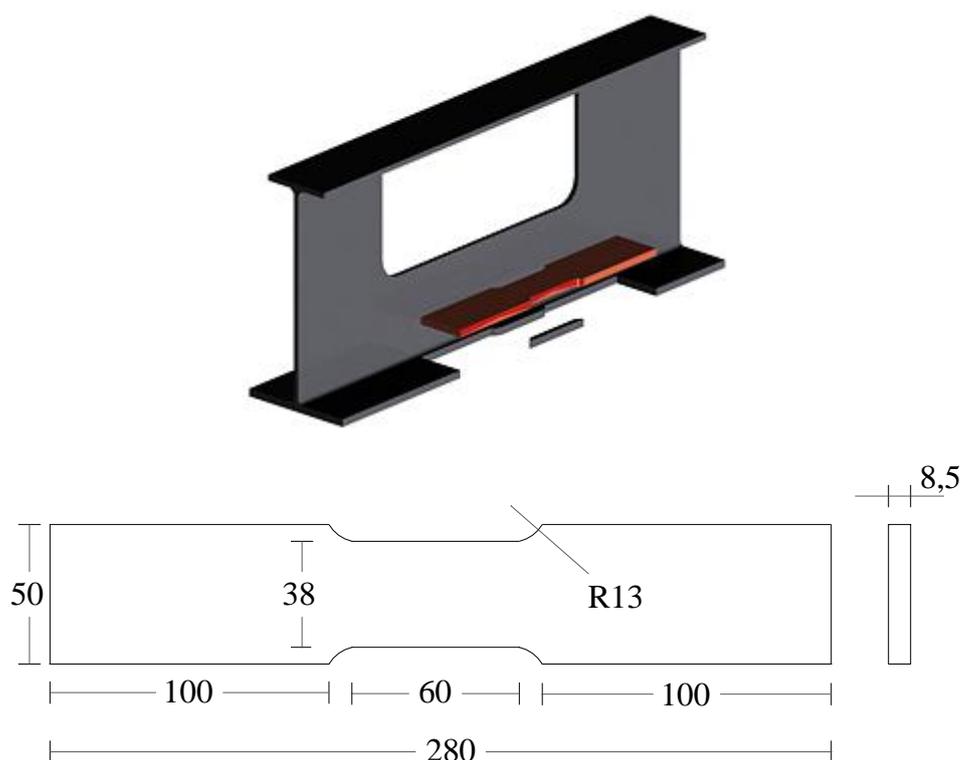


Figura 4.21 - Dimensões dos corpos-de-prova de aço ASTM A 572 (dimensões em mm).

Os resultados dos ensaios a tração direta apresentaram resistência ao escoamento (f_y) de 337,5 MPa e a resistência à ruptura (f_u) de 462,07 MPa, que

correspondem à média dos valores obtidos experimentalmente. A Figura 4.22 apresenta os corpos-de-prova antes e após o ensaio.

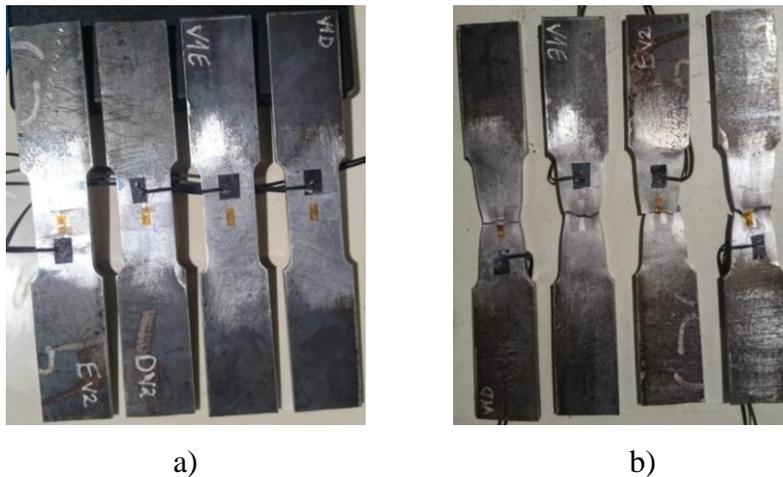


Figura 4.22 - Corpos-de-prova do aço a) antes do ensaio e b) após o ensaio.

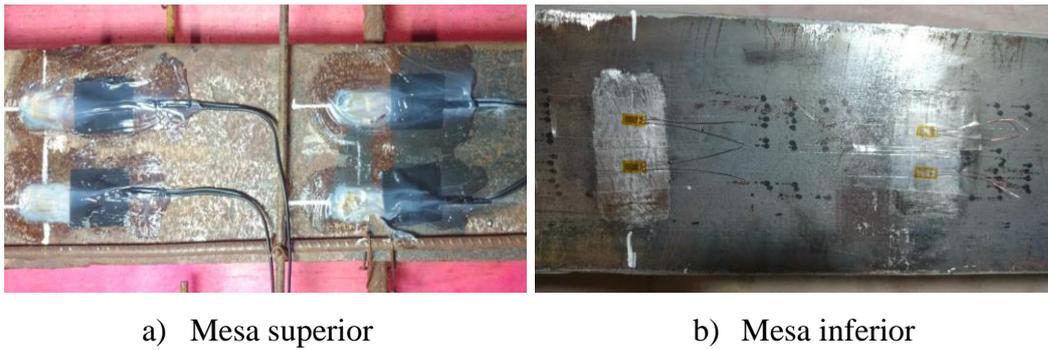
O aço adotado para a confecção da mesa superior do perfil celular, do fechamento das aberturas nas extremidades da V-01, e do perfil U de reforço para a VM-02, foi o ASTM – A36. Não foram realizados ensaios de caracterização visando determinar as propriedades do aço à tração. Portanto, os valores nominais das características mecânicas fornecidos pelo catálogo do fabricante serão utilizados nas análises posteriores.

4.7. Instrumentação

Na instrumentação foram utilizados extensômetros elétricos uniaxiais para a medição de deformações no aço e transdutores de deslocamento para registro dos escorregamentos e deslocamentos dos elementos.

4.7.1. Instrumentação do Modelo VM-01

Na viga VM-01 foram utilizados 8 extensômetros no perfil metálico, sendo 4 posicionados na mesa superior e 4 posicionados na mesa inferior, ver Figura 4.23.

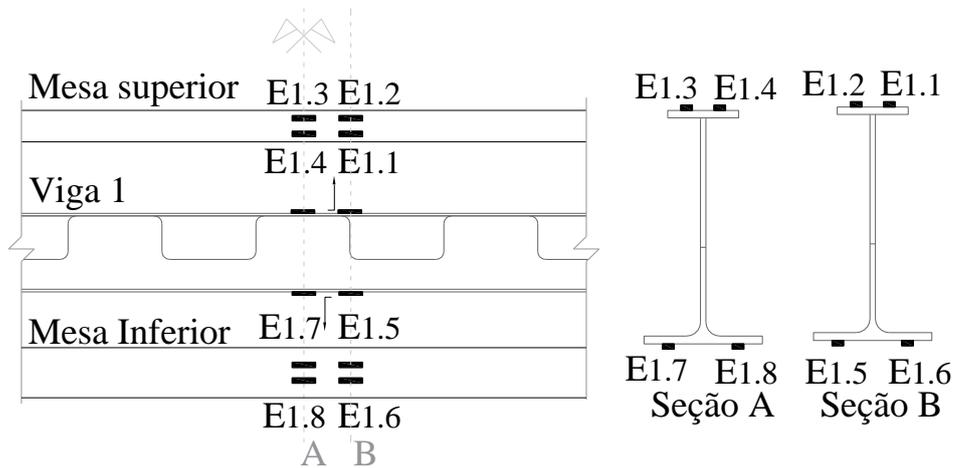


a) Mesa superior

b) Mesa inferior

Figura 4.23 - Extensômetros nas mesas superior e inferior da VM-01.

Duas seções do perfil foram instrumentadas, uma no limite entre a abertura e a alma e outra no meio da região de alma cheia (correspondendo o meio do vão). Na Figura 4.24 pode-se ver o posicionamento dos extensômetros para a viga VM-01.

**Figura 4.24 - Posicionamento dos extensômetros na V-01.**

Para a medição dos deslocamentos verticais, transdutores de deslocamentos foram posicionados sobre os apoios e um no vão central. O deslizamento na interface aço-concreto foi medido utilizando-se transdutores de deslocamentos posicionados horizontalmente nas extremidades das vigas.

Chegando-se próximo à carga de ruptura, o transdutor central foi mudado para a parte superior na laje de concreto por medida de segurança do equipamento, no total foram utilizados cinco transdutores de deslocamentos como mostrado na Figura 4.25.



Figura 4.25 - Transdutores de deslocamento posicionados: um vertical sobre cada apoio, um vertical no vão central e um horizontal em cada extremidade da viga.

Viga mista 1

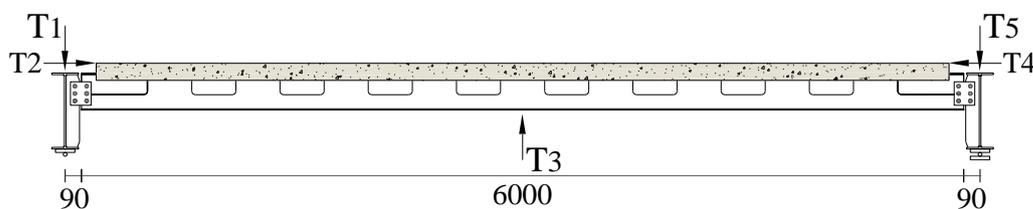
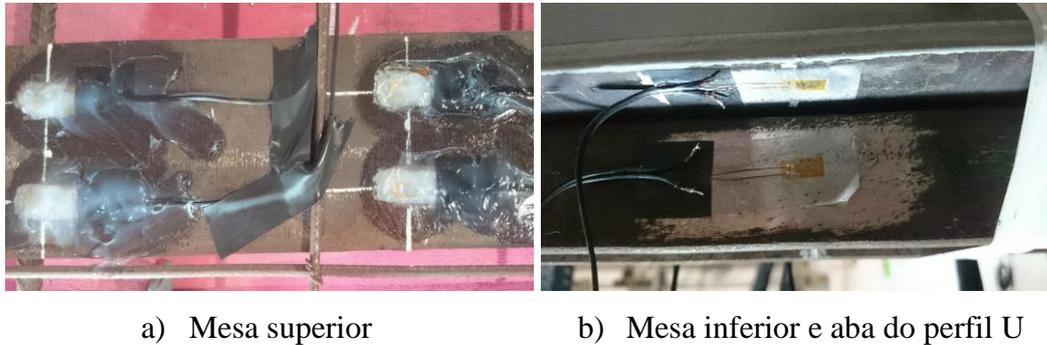


Figura 4.26 - Posicionamento dos transdutores de deslocamento na viga VM-01 (dimensões em mm).

A Figura 4.26 mostra o posicionamento de cada transdutor na viga VM-01. As setas indicam cada transdutor e a direção em que foram medidos os deslocamentos. A base dos transdutores de deslocamentos verticais (T1, T3 e T5) ficou apoiada em suportes sobre a laje de reação. Já os transdutores horizontais (T2 e T4) foram ligados diretamente à alma do perfil por meio da base magnética.

4.7.2. Instrumentação do Modelo VM-02

De modo similar ao executado na viga VM-01, também foram utilizados 8 extensômetros no perfil celular do modelo VM-02. Os extensômetros inferiores ficaram posicionados dois na mesa da viga metálica e dois nas abas do perfil U.



a) Mesa superior

b) Mesa inferior e aba do perfil U

Figura 4.27 - Extensômetros na mesa superior e em um dos lados da mesa inferior e do perfil U da VM-02.

Os extensômetros superiores da VM-02 foram deslocados 150 mm na direção do meio do vão, devido ao centro coincidir com a abertura de alma. Duas seções da mesa superior foram instrumentadas, uma no limite entre a abertura e a alma e outra no meio da região de alma cheia. Na VM-02, a mesa inferior e o perfil U foram instrumentados somente na seção do meio do vão. Na Figura 4.28 é mostrado o posicionamento dos extensômetros no modelo VM-02.

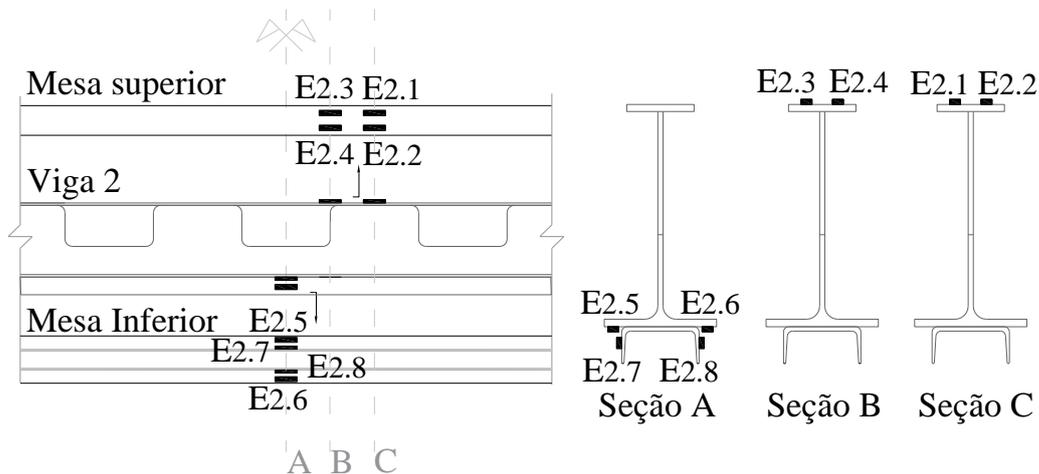


Figura 4.28 - Posicionamento dos extensômetros no perfil 2 e no perfil U.

A instrumentação, utilizando-se transdutores de deslocamentos para medir os deslocamentos verticais e deslizamento na interface aço-concreto, foi a mesma

utilizada no modelo VM-01. O posicionamento de cada transdutor é mostrado na Figura 4.29.

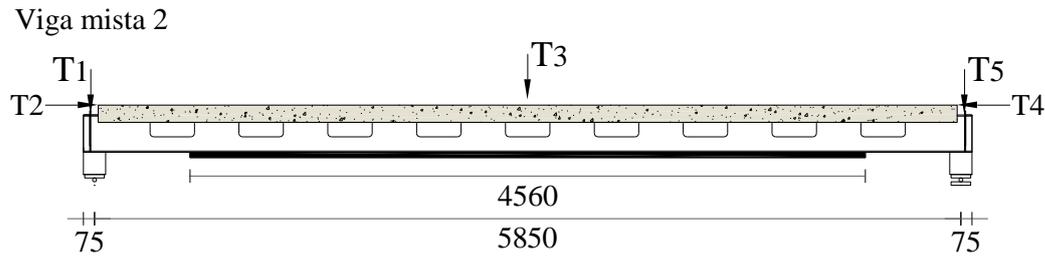


Figura 4.29 - Posicionamento dos transdutores de deslocamento na viga VM-02 (dimensões em mm).

4.8. Sistema de Ensaio

4.8.1. Ensaio do Protótipo VM-01

Para a realização do ensaio, foi utilizado um pórtico com oito pilares e quatro vigas ligados à laje de reação do laboratório de estruturas, como mostrado na Figura 4.30.

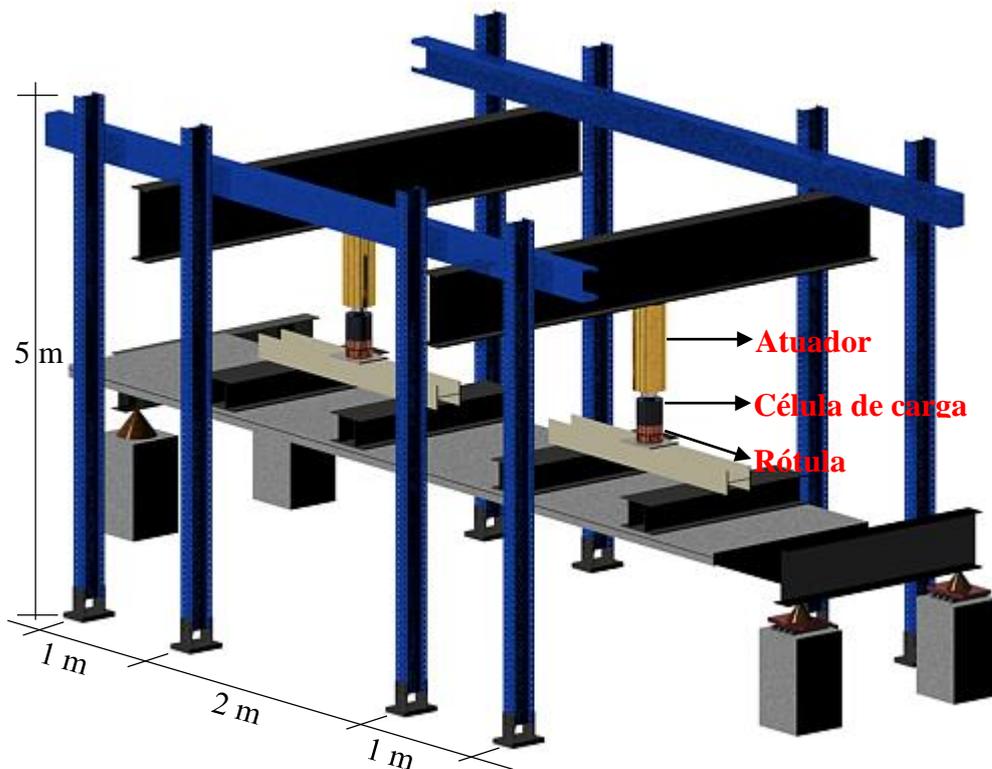


Figura 4.30 - Pórtico de reação e sistema de ensaio para o modelo VM-01.

As vigas foram posicionadas para os testes através de cintas apoiadas nas extremidades, ver Figura 4.31

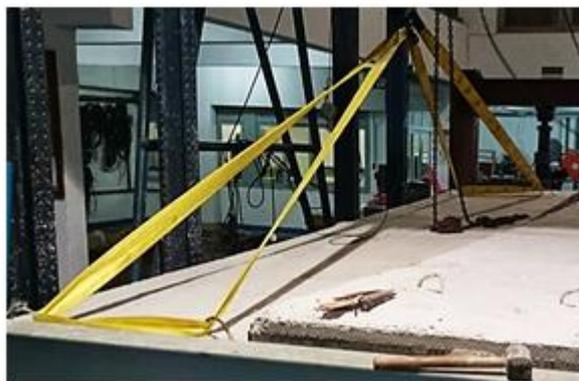


Figura 4.31 - Içamento do protótipo.

Foram aplicadas quatro cargas concentradas por meio de dois atuadores hidráulicos com capacidade de 500 kN cada. Um sistema de transmissão de cargas foi montado com duas vigas de distribuição de cargas em quatro pontos. Perfis metálicos duplos foram posicionados ao longo da largura efetiva da laje para a transmissão das cargas, como mostrado na Figura 4.32.



Figura 4.32 - Sistema de transmissão de cargas.

Os atuadores foram ativados simultaneamente por uma bomba manual, Figura 4.33. Na saída da bomba foi colocado um registro com bifurcação e controle independente para cada atuador.

O controle do carregamento aplicado foi feito por uma célula de carga, em cada atuador, com capacidade de 100 kN cada. Também foi utilizada rotula, conforme Figura 4.30, em uma direção para evitar excentricidades na aplicação da carga.



Figura 4.33 - Bomba hidráulica com sistema de controle de aplicação de carga.

Antes do ensaio, foi realizada uma série de pré-ensaios para aferição da instrumentação e acomodação da estrutura, na tentativa de rompimento da ligação por aderência química na interface entre o aço e o concreto. Para a VM-01 foram realizados quatro pré-ensaios. No primeiro foi aplicada uma carga até 25 kN e manteve-se neste valor por 15 minutos e depois fez-se o descarregamento. No segundo, terceiro e quarto pré-ensaios foram feitos carregamentos até 35, 45, e 50 kN, respectivamente, mantendo-se fixa a carga por 30 minutos antes do descarregamento.

A cada incremento de carga de 5 kN foi feita uma pausa para observação da viga, das rotulas e dos apoios. O sistema de aplicação de carga não permitiu um controle na velocidade e nos valores das cargas dos atuadores durante o descarregamento.

A leitura dos dados era feita automaticamente pelo programa de aquisição de dados, apresentado na Figura 4.34, a cada variação de 0,5 kN da carga, 1 microstrain nos extensômetros ou 1 mm nos transdutores.



Figura 4.34 - Sistema de aquisição de dados.

No ensaio final, a VM-01 foi carregada até 50 kN a qual foi mantida fixa durante 15 minutos, depois prosseguiu-se até o final do ensaio.

As cargas mencionadas referem-se ao valor registrado em cada célula de carga, denominada de $2P$. Um croqui com as distancias de cada força aplicada é apresentada na Figura 4.35 para o modelo VM-01.

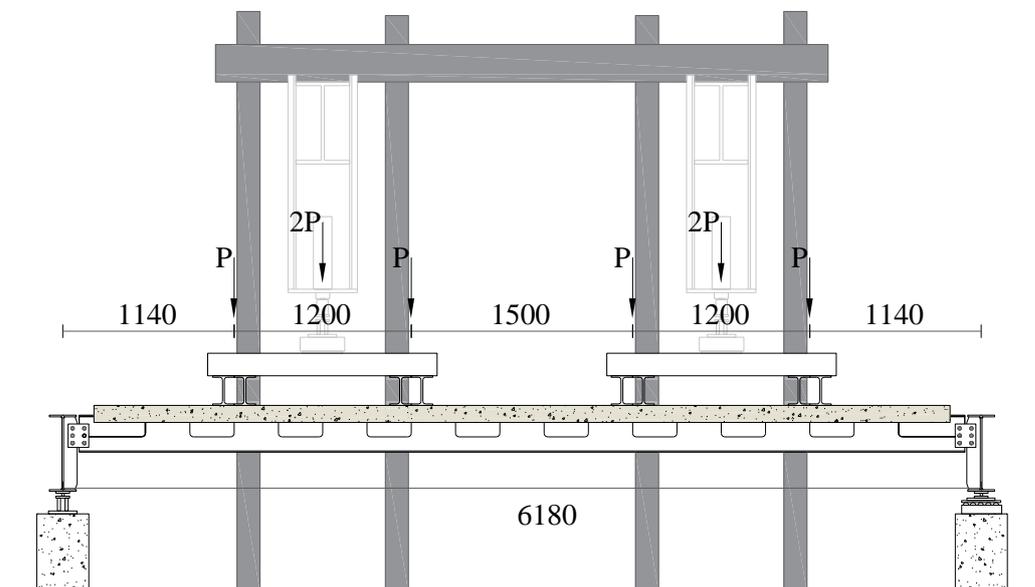


Figura 4.35 - Esquema do sistema de ensaio para a VM-01 (dimensões em mm).

4.8.2. Ensaio do Protótipo VM-02

Na realização do ensaio do modelo VM-02, foi utilizado o mesmo sistema de ensaio (pórtico, vigas de transmissão de carga, atuadores, bomba hidráulica e células de carga) do protótipo VM-01.

Durante o içamento da VM-02, foi realizada a aferição do peso próprio através de uma célula de carga colocada na talha. O valor encontrado foi de 1518 kg e o calculado de 1528 kg, como descrito na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Peso próprio da viga mista mais sistema de transmissão de carga.

Peso Próprio	g kN/m	P_{total} kN
Perfil metálico	0,21	1,27
Concreto	2,39	13,74
Armadura	0,045	0,27
Sistema de transmissão das cargas	0,82	4,92
Total	3,47	20,2

Antes do ensaio final, foram feitos dois pré-ensaios. O primeiro até 35 kN e o segundo até 45 kN, mantendo a carga por 30 minutos e logo após realizando-se o descarregamento da estrutura.

No ensaio final do modelo VM-02, foi aplicado uma carga até 60 kN a qual foi mantida por 30 minutos, para então continuar com o ensaio até o estágio final. A Figura 4.36 mostra o esquema de carregamento do modelo VM-02 com as distâncias de cada força aplicada.

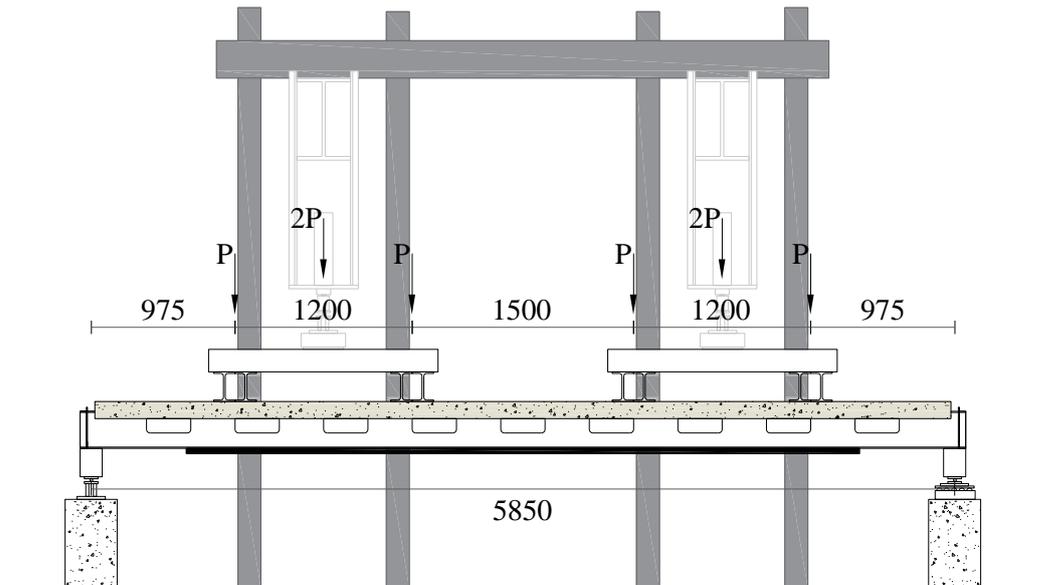


Figura 4.36 - Esquema do sistema de ensaio para a VM-02 (dimensões em mm).