

3 Caracterização dos Ensaios Experimentais

São apresentadas as descrições dos ensaios realizados a saber: primeiro conjunto de ensaios experimentais, composto pelos ensaios realizados por Ramires (2010), para sua tese de doutorado e a complementação realizadas em 2014; e o segundo conjunto de ensaios relativos ao estudo dos conectores. A primeira fase tem o objetivo de caracterizar o caminho da transmissão de solicitações em ligações viga-coluna semirrígidas mistas em aço-concreto; a segunda, foi realizada para verificar a resistência dos conectores e as formas de ruptura, de acordo com diferentes pernas de solda.

3.1. Introdução

Os modelos estáticos são realizados para a caracterização das ações permanentes, atuantes em sua maioria em um único sentido, para o estudo do comportamento estrutural. Para sua definição são inseridas as características geométricas e dos materiais, e as medições dos solicitações são efetuadas com instrumentos, como extensômetros. Posteriormente, com os resultados obtidos, é possível obter algumas conclusões.

Os ensaios de Ramires (2010) foram desenvolvidos para possibilitar o estudo dos seguintes parâmetros: efeito da quantidade e espaçamento dos conectores tipo *stud*, influência do concreto, quantidade e diâmetro das armaduras longitudinais. Os ensaios dos conectores estudou o comportamento desses elementos com diferentes pernas de soldas.

3.2. Modelo Experimental Estudado

A região dos apoios onde ocorrem os momentos negativos, em especial para as vigas contínuas, é uma área em desenvolvimento para os estudos. Isso porque ainda há uma série de variáveis envolvidas para o entendimento dos mecanismos de transmissão de esforços. Dessa forma, foram desenvolvidos

modelos que pudessem estudar essa área de forma direta, bem como seus efeitos.

A Figura 3.1 apresenta os principais componentes envolvidos no estudo da região de momento negativo: laje de concreto, barras de armadura e conectores de cisalhamento. Para o estudo desses componentes, admite-se que existe um caminho de transmissão, que inicia-se na mesa da viga e fixa-se por meio da solda do conector de cisalhamento, passando pelo concreto, onde ocorre a interação entre os dois componentes. A trajetória prossegue para as barras de armadura, ocorrendo nova interação entre os últimos componentes, onde há atuação propriamente dita das barras da armadura. Ligado a isso, ainda existe a possibilidade de ocorrer outras formas de transmissão, que não têm coerência de equilíbrio ou estabilidade de comportamento, conforme mostrado na Figura 2.28. Cada um dos componentes pode ter inúmeras variações que influenciam direta ou indiretamente no comportamento da ligação.

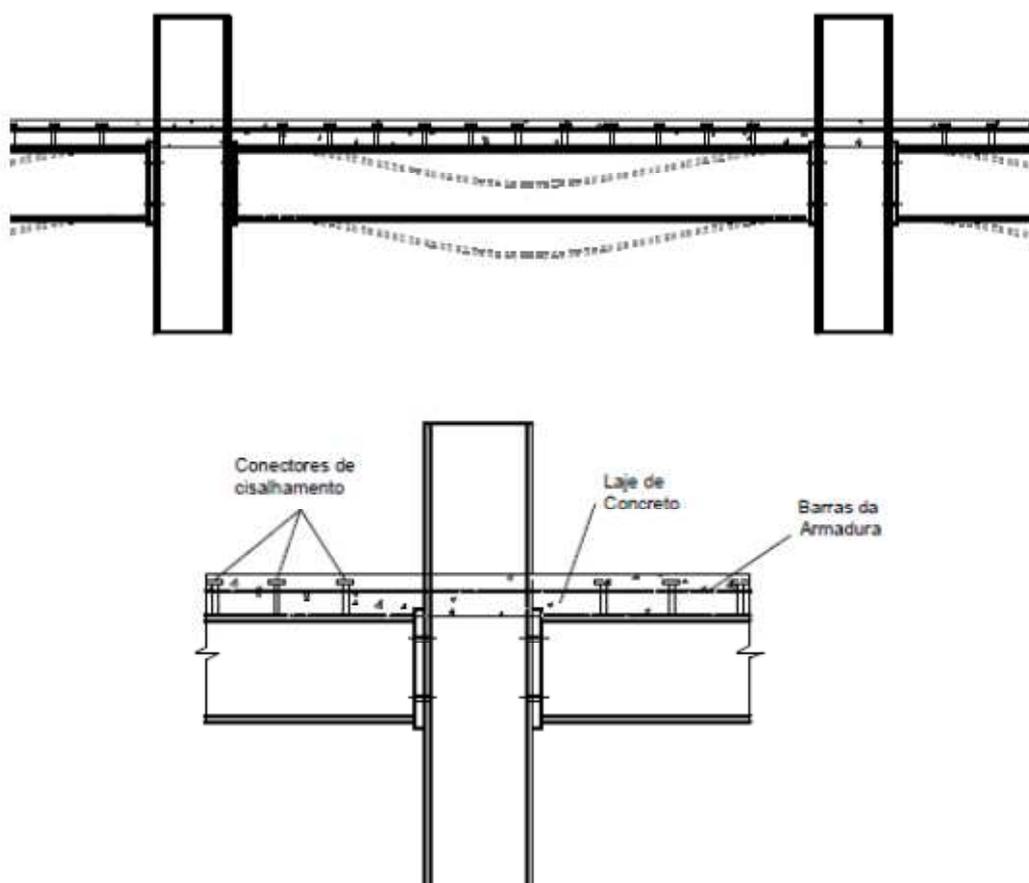


Figura 3.1 – Viga contínua (Ramires, 2010).

Os estudos experimentais são realizados para avaliar a influência dessas variáveis no comportamento de uma ligação semirrígida mista. Esses ensaios buscam isolar cada uma das componentes, identificando o seu comportamento e as trajetórias de transmissão de solicitações. Em relação a esta trajetória, as fases de sua propagação foram apresentadas no item 2.4.1.1.2.

O comprimento da armadura é calculado por meio da combinação do espaçamento dos conectores, que é representado pela face externa da mesa do pilar até o primeiro conector, e do espaçamento entre os próprios conectores, conforme Figura 3.2.

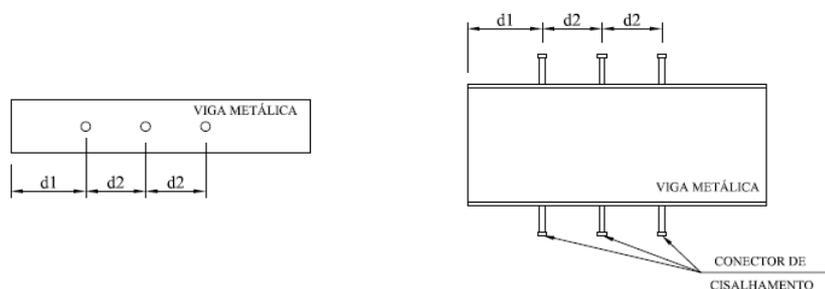


Figura 3.2 – Padrão para espaçamento dos conectores ($d1$ e $d2$).

Ramires (2010) utilizou, para definir a quantidade de experimentos a serem realizados, o método conhecido como Projeto Robusto, desenvolvido por Genichi Taguchi. A descrição das reduções estudadas é descrita na tese de Ramires (2010).

3.3. Modelo Experimental *Pull Out*

A escolha do modelo experimental realizado por Ramires (2010) teve a consideração dos estudos das variáveis envolvidas de maior influência. Os ensaios realizados foram desenvolvidos em duas partes: parte inicial, ensaios que serviram de base para verificação de não conformidades; segunda parte, realização das séries de ensaios que foram utilizados de base para análises.

O modelo experimental, correspondente ao ensaio realizado por Ramires (2010), composto com os seguintes elementos: laje de concreto, barra de armadura, conectores de cisalhamento e o perfil metálico da viga. Esse modelo foi projetado para possibilitar o estudo da região de momento positivo da viga mista, e por consequência a região de momentos negativos atuantes sobre o

concreto, onde ocorrem fissuras e a ação de solicitações de tração na componente. Para tanto, é realizada uma adaptação do ensaio de *push out*, para um ensaio de arrancamento *pull out* usando as barras de armadura, de modo a refletir a região tracionada do concreto. As barras de armadura foram fixadas externamente a estrutura da laje, enquanto o atuador hidráulico empurra o perfil metálico.

Os ensaios buscavam atingir, por meio da ruptura, a um dos modos de colapso estudados, dentre eles: a ruptura da barra de armadura, a ruptura da ancoragem da barra a laje de concreto, a ruptura do conector por cisalhamento ou flexão, ruptura da laje por excesso de fissuras ou pela compressão exercida pelos conectores.

3.3.1. Tipos de Confinamento

Ramires (2010) estudou os diferentes tipos de confinamentos possíveis de serem realizados, sendo esses: lateral ou longitudinal, individual ou em conjunto. Com essas possibilidades, têm-se a classificação dos diferentes tipos de confinamento, conforme a seguir. Para os ensaios realizados por esse autor e o segundo conjunto produzido para esta tese, foram produzidos apenas ensaios sem confinamento. Dessa forma, o estudo do confinamento não foi considerado.

- Confinamento total - contenção da laje de concreto na direção da ação do esforço de tração, além da restrição lateral que representa a extensão da laje de concreto real, ou seja, a continuidade da laje, simulando a existência de uma laje de comprimento e largura maiores.
- Confinamento parcial - representa a continuidade da laje na direção longitudinal, relativa a direção da ação de tração. O que o diferencia do modelo anterior é a não existência de contenção lateral.
- Sem confinamento – considerou-se para estes ensaios que a laje não sofre influência devido a sua continuidade. Dessa forma, o modelo não possui restrições transversais e longitudinais, estando a laje livre de qualquer tipo de confinamento ou contenção.

3.4. Descrição dos ensaios *pull out*

São apresentadas as descrições dos ensaios realizados no laboratório da Pontifícia Universidade Católica – PUC, localizado no Rio de Janeiro, com base nos ensaios desenvolvidos em 2010 por Ramires, e que serviram de base para inclusão de uma nova série de estudos. Dessa forma, a Tabela 3.1 descreve os ensaios realizados por Ramires (2010), série S2010 e a nova série de ensaios, série S2014. O objetivo destas séries foi estudar as influências dos elementos na parcela mista, simulando a região dos momentos negativos, tendo seus resultados divididos de acordo com os modos de falha obtidos.

Tabela 3.1 – Série dos ensaios *pull out*.

Série S2010		Série S2014	
PO.1X.r	PO.11.r	PO.1X	PO.11
	PO.12.r		PO.12
	PO.13.r		
PO.2X.r	PO.21.r	PO.2X	PO.21
	PO.22.r		PO.22
	PO.23.r		
PO.7X.r	PO.71.r		
	PO.72.r		
	PO.73.r		
PO.8X.r	PO.81.r	PO.8X	PO.81
	PO.82.r		
	PO.83.r		
		PO.9X	PO.91
			PO.92
			PO.93

3.4.1. Pré-ensaios

3.4.1.1. Configuração do ensaio

Foram realizados dois pré-ensaios para o estudo da configuração dos modelos dos ensaios principais, com o objetivo de avaliar a montagem, definindo-se e testando-se a estrutura auxiliar, além de possibilitar avaliar os resultados qualitativa e quantitativamente. Os pré-ensaios foram nomeados de PO.0.1 e PO.0.2.

Quanto as configurações do ensaio, as lajes de concreto tinham dimensões de 120 x 600 x 1000 mm, conforme Figura 3.3, ligadas cada uma a uma das mesas da viga de aço. Para a ligação entre a laje e o perfil metálico foi utilizado o conector tipo *stud* e a configuração seguiu o apresentado na Figura 3.4.

Os estribos foram compostos por armadura longitudinal e transversal, sendo a primeira localizada na maior dimensão da laje, paralela a viga, com 960 mm, com quatro estribos, e a segunda, na outra direção, com comprimento de 560 mm, com dois estribos, todos produzidos com barras de 10 mm de diâmetro. As armaduras podem ser observadas na Figura 3.5.

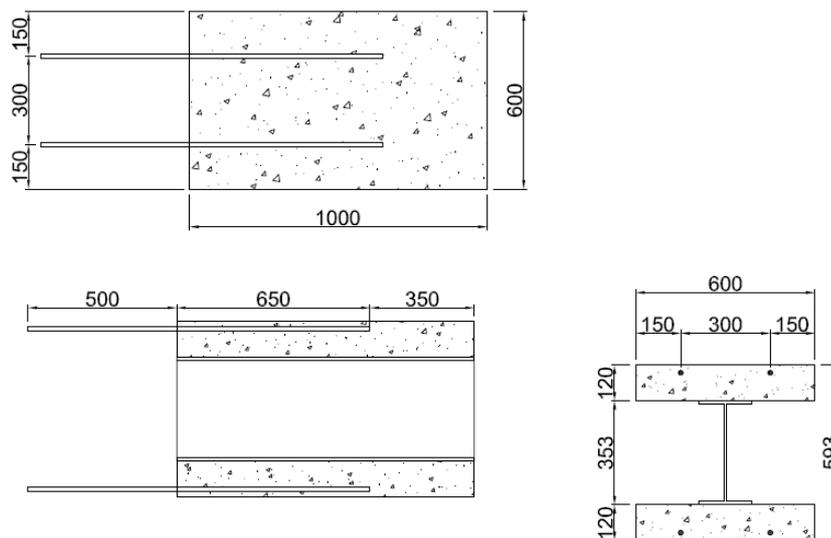


Figura 3.3 – Arranjo dos pré-ensaios (Ramires, 2010).

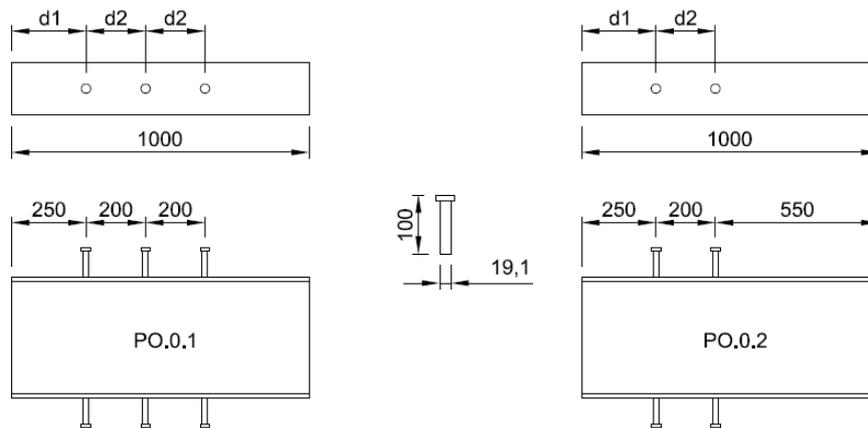


Figura 3.4 – Posicionamento dos conectores de cisalhamento para os pré-ensaios (Ramires, 2010).

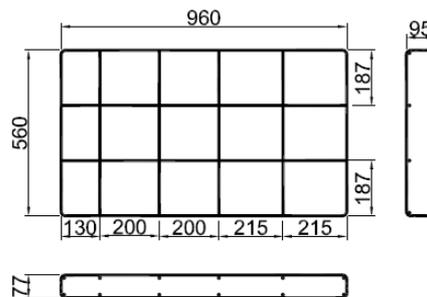


Figura 3.5 – Estribos para os pré-ensaios (Ramires, 2010).

Para a armadura principal dos *pull outs* utilizou-se o comprimento de 650 mm de ancoragem e comprimento total de 1050 mm, conforme Figura 3.3, e duas barras em cada laje.

Para as medições dos efeitos ocorridos nos ensaios foram utilizados instrumentos, como o extensômetro, para a medição das deformações específicas na direção longitudinal nas barras das armaduras, transdutores de deslocamentos, para a medição dos deslocamentos, e transdutores de pressão, para aferição da carga aplicada sobre o ensaio. Na Figura 3.6 apresenta-se a instrumentação para as armaduras principais, instalada para obter a resistência a ancoragem e tração.

A instrumentação foi planejada para obter os dados necessários para a caracterização da estrutura, sendo utilizados instrumentos na laje de concreto e na barra de armadura, com a finalidade de medir as deformações ocorridas.

Os extensômetros foram fixados na barra para medir a deformação específica, externamente, para verificar o comportamento sem a influência do

concreto, e internamente, para a obtenção com a influência do elemento, em relação ao conjunto aço-concreto sob tração. Os pares internos foram localizados entre conectores de cisalhamento, para verificação do comportamento das barras nesta região, devido a hipótese de ser a região com menor fissuração, e por conseguinte, de maior tensão na barra e concreto tracionados.

Foram utilizados outros extensômetros na barra de diâmetro igual a 5 mm, com o objetivo de por meio da medição da deformação específica da barra estimar as aberturas ou fissuras prováveis de ocorrer no concreto, sendo posicionados na linha de conectores, onde se pressupõe ser a área que primeiro ocorrerá a fissuração. Os estribos não receberam instrumentação.

O transdutor de pressão foi utilizado para assegurar a centralização da célula de carga, e verificar possíveis deslizamentos conforme o aumento de carga aplicada.



Figura 3.6 – Extensômetros nas armaduras principais dos *pull outs* (Ramires, 2010).

Para a medição das cargas aplicadas foi utilizada uma célula de carga central, localizada abaixo do perfil metálico, sob uma placa metálica com a função de distribuir a força uniformemente para a alma do perfil, cuja movimento era aplicado por meio do bombeamento do macaco hidráulico. Apesar da medição do transdutor de pressão, conforme descrito acima, nessa fase, a única forma de obtenção de valores de carga aplicada foi por meio da célula de carga. A Figura 3.7 apresenta o posicionamento da célula para os ensaios desta série.

Os transdutores de deslocamento (LVDTs) foram posicionados de forma a permitir a leitura de movimentos muito pequenos. A Figura 3.8 apresenta a configuração e identificação de todos os LVDTs e a Figura 3.9 o detalhe de montagem. Os LVDTs 1 e 2 estão localizados na parte inferior do ensaio, para medir o deslocamento relativo entre o perfil metálico e a laje de concreto; LVDTs

2, 3 e 4 para medir os deslocamentos laterais, identificando algum desequilíbrio da estrutura no plano horizontal; LVDTs 7, 8, 9 e 10 foram utilizados para medir o deslocamento vertical do ensaio, onde 7 e 8 as medições relativas entre aço e concreto, e os 9 e 10 para acompanhar o deslocamento em relação ao solo.



Figura 3.7 – Posicionamento da célula de carga (Ramires, 2010).

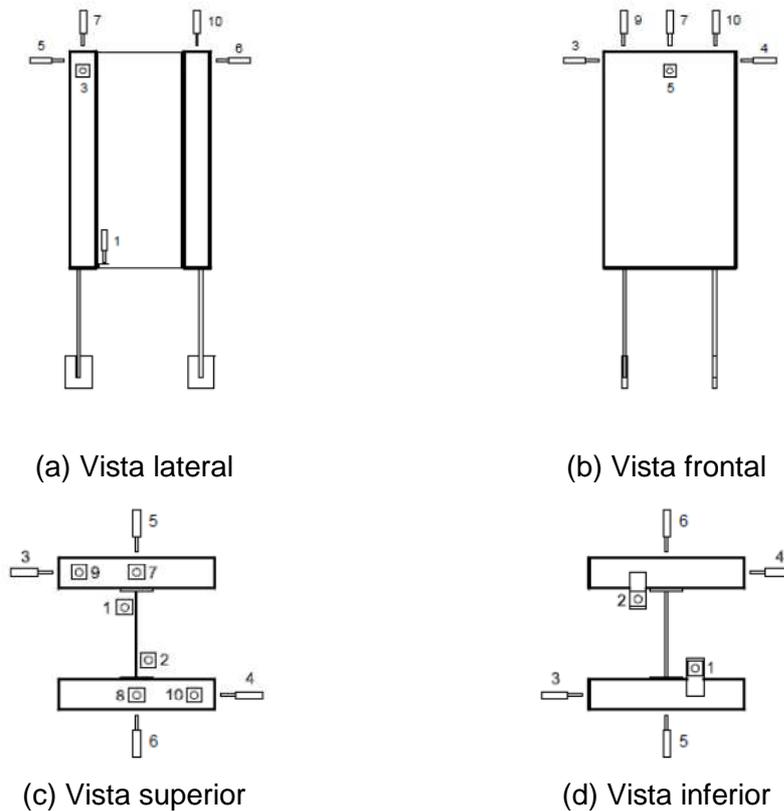


Figura 3.8 – Localização e identificação dos LVDTs (Ramires, 2010).



Figura 3.9 – Posicionamento dos LVDTs (Ramires, 2010).

3.4.1.2. Material de composição

Ramires (2010) iniciou os procedimentos de laboratório com a realização de pré-ensaios, que tiveram o objetivo de testar a estrutura de apoio, a quantidade e qualidade dos ensaios principais. A forma e sequência de preparação foi a mesma, tanto para os ensaios principais quanto para os pré-ensaios.

Foram utilizadas formas metálicas para os pré-ensaios, conforme Figura 3.10.



Figura 3.10 – Forma metálica para os pré-ensaios (Ramires, 2010).

O concreto para a laje dos ensaios iniciais foram preparados na betoneira do próprio laboratório, conforme Figura 3.11 (b). O traço considerado para sua execução foi obtido empiricamente, com resistência a compressão prevista de 30 MPa. A espessura da laje era 12 cm, e as dimensões estão conforme o esquema do ensaio, apresentado na Figura 3.3.

A Figura 3.11 (a) apresenta as características dos corpos de prova para o estudo da resistência a compressão, tendo sido confeccionado por meio do método preconizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT.



Figura 3.11 – Execução do concreto dos pré-ensaios (Ramires, 2010).

Foram utilizados três tipos de armadura: barra de armadura, estribos, e barra auxiliar. A última, de diâmetro de 5 mm, foi incluída no sistema para medir a deformação do concreto, por meio da colocação de extensômetros ao longo do seu comprimento, localizados próximos a linha de conectores de cisalhamento. Essa região foi escolhida devido a hipótese de que haveria o cruzamento das linhas de fissuras na laje de concreto, com a deformação específica da barra, semelhante a deformação do concreto. As barras auxiliares são apresentadas na Figura 3.12(a).

O dimensionamento dos estribos atendeu às recomendações do *Eurocode 4*, e tinham a função de controlar a fissuração da laje, dispostos nas direções longitudinais e transversais, distribuídas ao longo do comprimento da laje, conforme Figura 3.12(b), sendo observada a montagem do estribo realizada.

As barras de armadura foram tratadas de forma a permitir o recebimento dos extensômetros. As barras e os estribos foram produzidos com aço CA-50. A Figura 3.13 apresenta os extensômetros colados nas barras dos pré-ensaios.

Por último, a barra de armadura de diâmetro de 16 mm, com a função de aplicar a força de tração à laje de concreto, fixada na extremidade por placas de aço, conforme Figura 3.13. As armaduras foram posicionadas próximas ao ponto correspondente a um terço da largura da laje, tendo um par de extensômetros interno para medir as deformações específicas do concreto, na proximidade dos conectores de cisalhamento, e outro posicionado externo da laje de concreto, conforme pode ser observado na Figura 3.13.

Os conectores estudados são do tipo *stud*, e foram soldados ao perfil metálico no laboratório da PUC, conforme Figura 3.14, com a função de impedir o deslizamento entre a laje de concreto e o perfil metálico. O diâmetro dos conectores é de 19 mm. Devido a sua altura recebida de 12 a 12,5 cm se fez

necessário o corte do mesmo, para 10 cm, permitindo a preservação do cobrimento.

Para o ensaio PO 0.1 foram usados três conectores em cada laje de concreto, posicionados no centro da largura da mesa e longitudinalmente espaçados de 250 mm da extremidade até o primeiro conector (d1) e com 200 mm de distâncias entre eles (d2). O pré-ensaio PO.0.2, usou dois conectores em cada uma das mesas, espaçados da extremidade do perfil da viga 250 mm (d1) e 200 mm (d2) entre os mesmos, essas medidas são apresentadas na Figura 3.2.

A Figura 3.15 apresenta o perfil metálico utilizado para as vigas dos pré-ensaios que utilizaram o perfil Açominas, W 410x46,1, do tipo ASTM A-572 Gr.50.



(a) Armadura de 5 mm.



(b) Armadura dos estribos.

Figura 3.12 – Armaduras dos pré-ensaios (Ramires, 2010).



Figura 3.13 – Barra de armadura: detalhes e posicionamento dos extensômetros (Ramires, 2010).



Figura 3.14 – Conectores de Cisalhamento (Ramires, 2010).

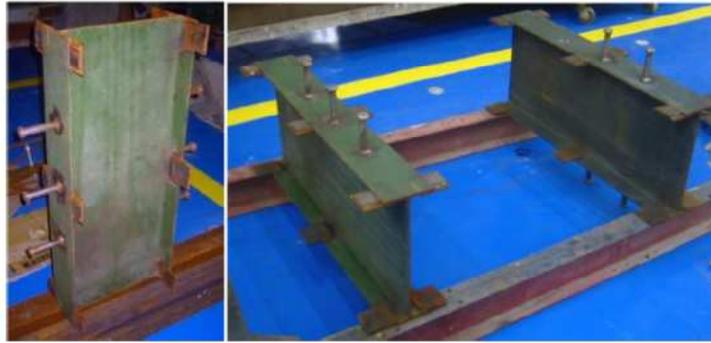


Figura 3.15 – Perfil metálico principal (Ramires, 2010).

3.4.1.3.

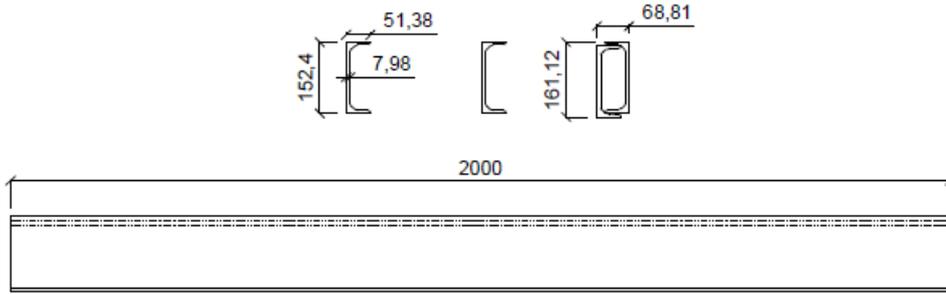
Estrutura de apoio dos ensaios (estruturas auxiliares)

Os pré-ensaios tiveram como uma de suas funções verificar se a estrutura de apoio respondia ao esperado na aplicação das solicitações ao ensaio. As estruturas de apoio, que suportavam e travavam o ensaio, eram compostas por dois níveis de travamento.

Os perfis de travamento de primeiro nível utilizados foram compostos de perfis U 6" x 12,5, conforme Figura 3.16 (a), laminados em aço tipo ASTM A-36. A Figura 3.16 (b) apresenta o posicionamento do perfil no conjunto. Para o travamento transversal, ou travamento de segundo nível, foi utilizado o perfil I 3" x 10, de mesmo aço, conforme Figura 3.17 (a). A Figura 3.17 (b) apresenta o perfil montado.

Para o travamento junto a laje de reação são utilizados quatro barras redondas, com diâmetro igual a $1 \frac{3}{4}$ " (44,45 mm), conforme Figura 3.18. As barras redondas foram utilizadas entre os perfis de segundo nível e travadas por meio de quatro porcas, duas em cada extremidade.

Esse sistema, com os travamentos em dois níveis, permitiu que as barras de armadura fossem tracionadas pela aplicação de carga por meio de um atuador hidráulico, conforme Figura 3.19.

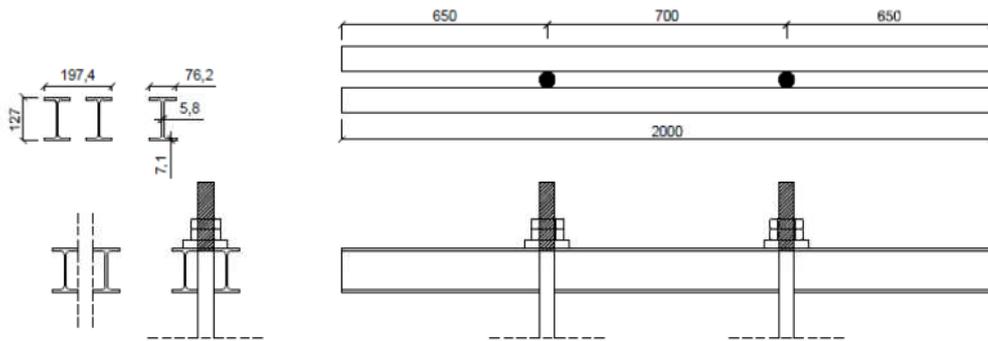


(a) Configuração

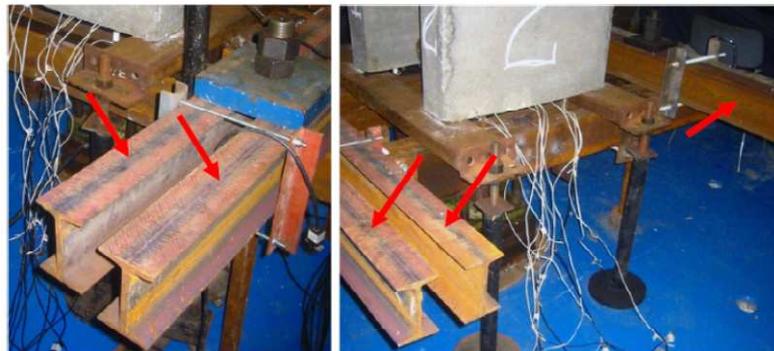


(b) Posicionamento

Figura 3.16 – Perfil metálico de travamento do primeiro nível (Ramires, 2010).



(a) Configuração



(b) Posicionamento

Figura 3.17 – Perfil metálico de travamento do segundo nível (Ramires, 2010).

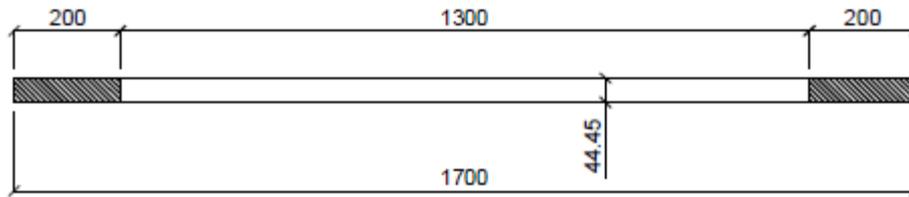


Figura 3.18 – Barra redonda (Ramires, 2010).



Figura 3.19 – Sistema de travamento e posicionamento do atuador hidráulico (Ramires, 2010).

3.4.1.4. Sequência de montagem

A Figura 3.20 apresenta a montagem da estrutura de travamento para os pré-ensaios, correspondente as mesas de apoio. Essa estrutura serviu de apoio para a realização do ensaio, localizando-se entre os furos da laje de reação onde são fixadas as barras redondas.

O atuador hidráulico foi posicionado entre as duas mesas, sobre placas de aço, permitindo que o atuador tivesse comprimento suficiente para manter o ensaio até o nível final pretendido, sem que para isso houvesse a necessidade de qualquer adequação da estrutura durante o ensaio. A Figura 3.21 mostra a fixação da estrutura.

Foi utilizado neoprene para proteger os pontos de apoio da laje do ensaio, de modo a impedir que houvesse danos na estrutura de concreto ou nos fios de instrumentação, conforme Figura 3.22, que apresenta o sistema já localizado em sua posição de ensaio, com as bordas da laje de concreto sobre o neoprene. Para melhor adaptação da placa, foi realizado um chanfro ao longo da alma do perfil, que teve a função de melhorar a distribuição das forças, aumentar a rigidez e impedir que ocorresse a flambagem local da alma do perfil principal.

A Figura 3.23 mostra a posição da placa de distribuição posicionada sobre o atuador, de modo a manter alinhado a aplicação das solicitações em relação ao atuador hidráulico.

Em seguida, foram posicionadas às vigas de travamento sobre as placas soldadas nas barras de armadura, conforme Figura 3.24 (a), e as demais peças das estruturas auxiliares incorporadas ao sistema, conforme Figura 3.24 (b), referentes ao primeiro nível de travamento.

A Figura 3.25 apresenta a fixação do segundo nível de vigas de travamento, apoiada sobre as de primeiro nível, posicionados a cada dois perfis, na extremidade das vigas do primeiro nível.

A Figura 3.26 apresenta a estrutura do ensaio montada, após a colocação das barras redondas presas aos perfis de travamento do segundo nível.



Figura 3.20 – Mesinhas de apoio dos *pull outs* (Ramires, 2010).



Figura 3.21 – Barras redondas posicionadas nos furos (Ramires, 2010).



Figura 3.22 – Pontos de apoio em neoprene (Ramires, 2010).



Figura 3.23 – Placa de distribuição de tensões (Ramires, 2010).



(a) Estrutura geral



(b) Posicionamento

Figura 3.24 – Posicionamento das estruturas auxiliares - primeiro nível de travamento (Ramires, 2010).



Figura 3.25 – Perfis de travamento do segundo nível (Ramires, 2010).



Figura 3.26 – Estrutura de travamento e *pull out* prontos para a execução do teste (Ramires, 2010).

3.4.1.5. Sequência de execução do ensaio

A sequência de execução do ensaio utilizada por Ramires (2010), para os pré-ensaios, estão descritos a seguir:

- Perfil metálico na posição vertical, Figura 3.27.



Figura 3.27 – Posicionamento do perfil metálico (Ramires, 2010).

- Preparação dos estribos, unindo os longitudinais e transversais. A armadura principal e os arames que medem a tração foram fixados internamente ao estribo, conforme Figura 3.28.



Figura 3.28 – Montagem das armaduras (Ramires, 2010).

- Posiciona-se a forma metálica, de forma invertida a posição final, conforme Figura 3.29. Fecha-se a parte inferior da forma, para a concretagem. Após a concretagem, foi realizado o fechamento superior.



Figura 3.29 – Posicionamento para concretagem do *pull out* (Ramires, 2010).

- Após a cura do concreto, retira-se as formas, e posiciona-se o conjunto conforme Figura 3.30.



Figura 3.30 – Posicionamento do *pull out* sobre a mesa (Ramires, 2010).

3.4.2.

Ensaio *pull outs* subsequentes - Série S2010 (Ramires, 2010)

Com as observações realizadas com a execução dos pré-ensaios, foi possível verificar a necessidade de algumas alterações nos ensaios propostos por Ramires (2010) e que são apresentadas a seguir.

3.4.2.1.

Configuração do ensaio

Os ensaios realizados nesta fase foram definidos conforme descrito na Tabela 3.1. Foram utilizados quatro diferentes configurações de ensaios divididas em grupos: PO.1X.r (PO.11.r, PO.12.r, PO.13.r), PO.2X.r (PO.21.r, PO.22.r, PO.23.r), PO.7X.r (PO.71.r, PO.72.r, PO.73.r) e PO.8X.r (PO.81.r, PO.82.r e PO.83.r). Cada grupo tem uma característica diferente, como o comprimento da armadura principal, número de conectores, modo de ruptura, entre outros.

A configuração dos ensaios foi semelhante as realizadas nos pré-ensaios, com itens permanecendo iguais, tais como as dimensões da laje, comprimento externo das barras de armadura, estribos e resistência do concreto.

Devido a alteração do perfil metálico utilizado, a configuração geral do conjunto teve modificações, conforme Figura 3.31. Nessa fase, o perfil metálico utilizado foi W 410 x 60.

As barras auxiliares de 5 mm não foram usadas nos ensaios principais, pois os resultados não contribuíram para a verificação da região instrumentada.

A Tabela 3.2 apresenta o resumo das configurações das séries realizadas por Ramires (2010).

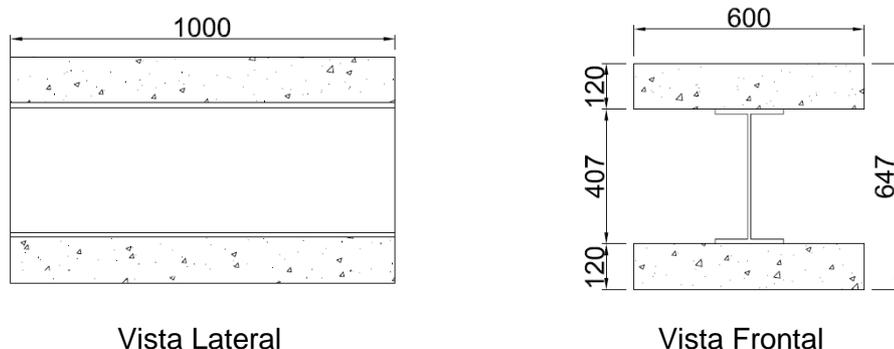


Figura 3.31 – Configuração geral dos ensaios principais (Ramires, 2010).

Tabela 3.2 – Características dos ensaios subsequentes - Série S2010.

Grupo	Armadura			f_{ck} (MPa)	Conector		
	L (mm)	Qt. (un.)	\emptyset (mm)		d1 (mm)	d2 (mm)	Qt. (un.)
PO.1X.r	1150 (650+500)	2	16	30	200	250	2
PO.2X.r	1000 (500+500)	4	20	30	200	100	3
PO.7X.r	950 (450+500)	2	20	30	100	250	3
PO.8X.r	800 (300+500)	4	16	30	100	100	2

3.4.2.1.1. Grupo PO.1X.r

A Figura 3.32 apresenta a configuração dos conectores de cisalhamento para o grupo PO.1X.r. Para a barra de armadura, essa série tem comprimento

total de 1150 mm, com ancoragem de 650 mm, conforme Figura 3.32. Foram utilizadas duas barras de 16 mm em cada uma das lajes de concreto, totalizando quatro barras por ensaio.

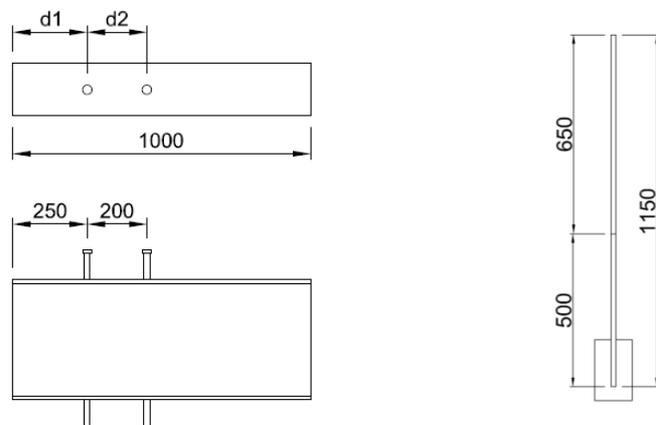


Figura 3.32 – Distribuição de conectores e barra de armadura - PO.1X.r (Ramires, 2010).

3.4.2.1.2. Grupo PO.2X.r

Para o grupo PO.2X.r a configuração dos conectores segue a Figura 3.33. A barra de armadura tem comprimento total de 1000 mm, com 500 mm de ancoragem no concreto, conforme Figura 3.33. Quanto a quantidade, foram consideradas quatro barras de 20 mm de diâmetro em cada uma dos lados da laje, em um total de oito barras por ensaio.

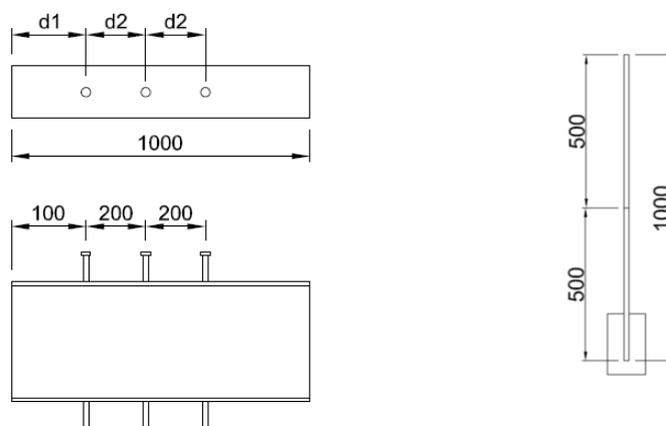


Figura 3.33 – Distribuição de conectores e barra de armadura - PO.2X.r (Ramires, 2010).

3.4.2.1.3. Grupo PO.7X.r

O grupo PO.7X.r desenvolvida por Ramires (2010) foi composta por três conectores de cisalhamento em cada laje, conforme Figura 3.34. A barra de armadura é representada na Figura 3.34, com 950 mm de comprimento total e 450 mm de ancoragem. O diâmetro das barras foram de 20 mm, com duas barras em cada laje, e quatro em cada ensaio.

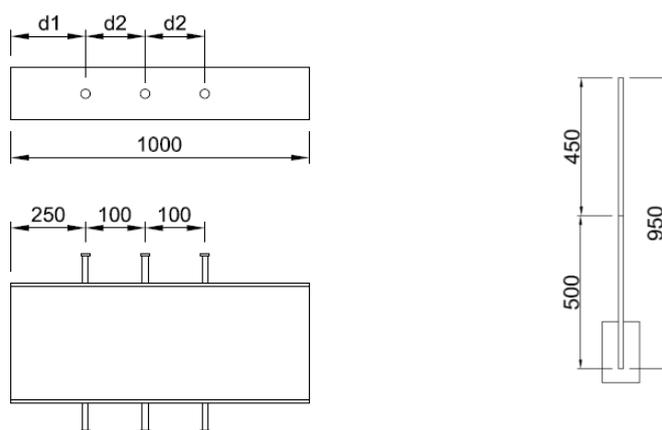


Figura 3.34 – Distribuição de conectores e barra de armadura - PO.7X.r (Ramires, 2010).

3.4.2.1.4. Grupo PO.8X.r

A Figura 3.35 apresenta a distribuição de conectores para o grupo PO.8X.r, composta de dois conectores em cada uma das lajes de concreto. O grupo PO.8X.r contou com a menor dimensão da barra de armadura, como pode ser observado na Figura 3.35, de dimensão total de 800 mm e ancoragem de 300 mm. Para este grupo, foram utilizadas quatro barras de 16 mm de diâmetro em cada laje de concreto, com um total de oito barras por ensaio.

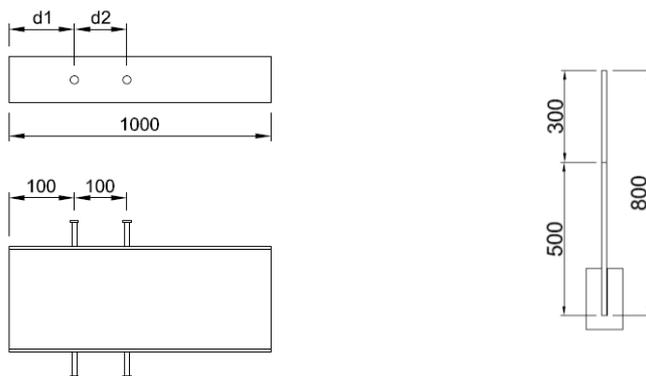


Figura 3.35 – Distribuição de conectores e barra de armadura - PO.8X.r (Ramires, 2010).

3.4.2.2.

Material de composição

As formas dos ensaios principais foram executadas com madeira, tipo compensado naval.

O concreto utilizado nos ensaios principais foi fornecido por concreteira, Holcim, devido a quantidade necessária, sendo concretado todos os ensaios de uma única vez, conforme Figura 3.36. A resistência a compressão (f_{ck}) esperada para o concreto também foi considerado de 30 MPa. Para a verificação da resistência foram produzidos corpos de prova, conforme Figura 3.37.

Os conectores de cisalhamento foram soldados dessa vez com equipamento específico para esse componente (caldeamento), permanecendo a realização no laboratório.

Para as barras de armadura, as séries foram configuradas para verificar diferentes comprimentos de ancoragem, o que necessitou produzir diferentes tamanhos de barras, sendo executado em aço CA-50.

Quanto as barras de 5 mm, incluídas nos pré-ensaios, após ser verificado nos pré-ensaios que não alcançaram o objetivo esperado, não foram incluídas nos ensaios principais.

O perfil utilizado foi modificado para W 410x60, material do tipo ASTM A-572 Gr.50, permanecendo a mesma altura dos pré-ensaios. A Figura 3.38 apresenta as características do perfil.



Figura 3.36 – Concretagem dos ensaios principais (Ramires, 2010).



Figura 3.37 – Corpos de prova de concreto (Ramires, 2010).

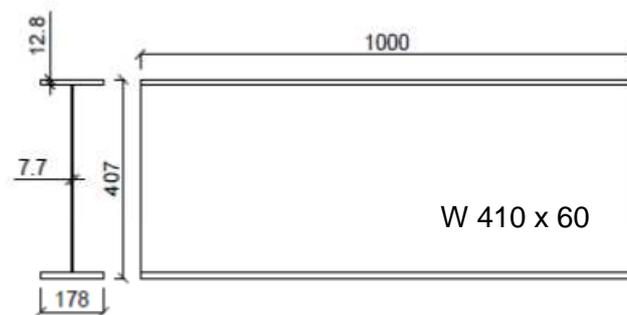


Figura 3.38 – Geometria do perfil dos ensaios principais (Ramires, 2010).

3.4.2.3. Estrutura de apoio dos ensaios (estruturas auxiliares)

Devido a algumas sobrecargas verificadas na estrutura dos pré-ensaios, foram realizadas modificações nas estruturas auxiliares de travamento e na arruela das barras redondas.

Os perfis de primeiro nível passaram a ser compostos com dois perfis U soldados, formando um tubo, a fim de aumentar a carga suportada pelo conjunto com o aumento da seção resistente, e assim diminuir a deformação da peça. A Figura 3.39 apresenta a configuração dos perfis soldados.

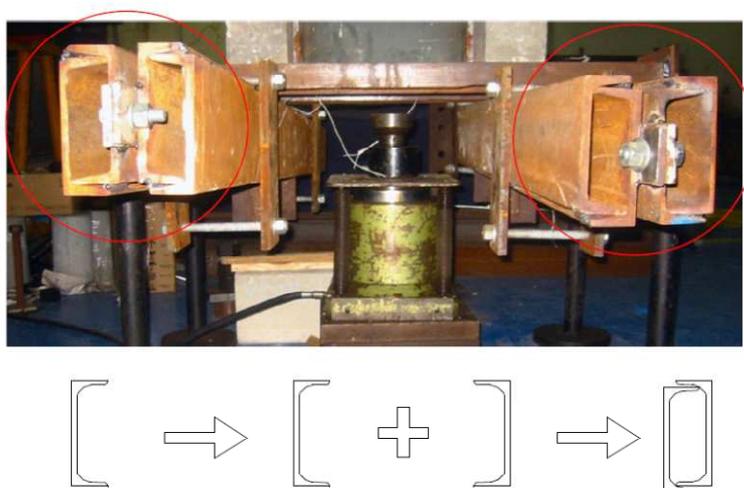


Figura 3.39 – Modificação dos perfis de primeiro nível (Ramires, 2010).

As barras redondas foram fixadas por meio de chapas sob a arruela, com largura de 1".

Para uma melhor distribuição de cargas aplicados pelo atuador, foi utilizada uma nova placa de distribuição.

Devido a problemas encontrados durante a execução dos ensaios PO.11.r e PO.12.r, modificou-se a estrutura de maneira que a ruptura do conjunto não fosse influenciada pela solda dos conectores, ponto de falha do sistema, concentrando-se nas barras de armadura. A nova disposição das estruturas auxiliares é apresentada na Figura 3.40. Foram utilizadas essas modificações nos ensaios PO.13.r, PO.22.r, PO.72.r, PO.82.r e PO.83.r, conforme observadas na Figura 3.41 e na Figura 3.42.



Figura 3.40 – Modificação da estrutura para o ensaio PO.13.r (Ramires, 2010).



Figura 3.41 – Modificação do ensaio PO.82.r (Ramires, 2010).



Figura 3.42 – Modificação do ensaio PO.83.r (Ramires, 2010).

3.4.2.4. Sequência de execução e montagem – Série S2010

Para todos os ensaios realizados utilizou-se o processo de carregamento e descarregamento do sistema, de modo a ultrapassar a resistência química inicial entre o aço e o concreto, e seguir o ciclo descrito no *Eurocode 4*. Após esse evento, o ensaio era encaminhado até a ruptura. Esse ciclo é composto de processo de carregamento e descarregamento, consistindo na aplicação de uma carga de 20% da de ruptura prevista, seguida de descarregamento, durante 25 ciclos.

A sequência de montagem em relação aos pré-ensaios tiveram pequenas modificações, mas seguiu o mesmo processo anterior. A cabeça do atuador hidráulico, correspondente ao elemento rotulado, foi retirada, permanecendo somente o cursor do atuador fixo, por medida de segurança.

Com as modificações de composição, as etapas sequenciais permaneceram as mesmas.

A sequência de execução seguiu os mesmos processos realizados pelos pré-ensaios, com exceção dos elementos incluídos das estruturas de apoio, conforme descrito no item 3.4.2.3. A Figura 3.43 apresenta a sequência de montagem para a forma de madeira.



Figura 3.43 – Montagem das formas de madeira (Ramires, 2010).

3.4.2.5. Instrumentação

O posicionamento dos extensômetros e transdutores de deslocamento (LVDTs) foram alterados, a fim de permitir uma melhor análise de acordo com a característica do ensaio. Por terem sido excluídas as barras auxiliares de 5 mm, os extensômetros desse conjunto também não foram considerados.

Para todos os ensaios, foram considerados quatro extensômetros em cada barra de armadura, localizados dois internamente e dois externamente a laje de concreto, conforme os pré-ensaios. Os internos ao concreto foram dispostos entre as fileiras de conectores, para verificar o efeito desses componentes.

Os transdutores de deslocamento (LVDTs) foram dispostos nas mesmas posições para todos os ensaios, tendo tido seu número reduzido em relação aos pré-ensaios. A disposição dos LVDTs são apresentados na Figura 3.44 e seu posicionamento no ensaios na Figura 3.45.

Como descrito para os pré-ensaios, a forma de medição de carga foi com a utilização de uma célula de carga central, localizada abaixo do perfil metálico. Não foram incluídas outras formas de medição, a fim de realizar a redundância e permitir a verificação de possíveis inconsistências.

O posicionamento dos extensômetros estão apresentados na Figura 3.46, para dois conectores e Figura 3.47, para três conectores. Para o grupo PO.1X.r o extensômetro no interior da laje fica localizado entre os conectores de cisalhamento, da mesma forma que o grupo PO.8X.r. Para o grupo PO.2X.r e o PO.7X.r, que contaram com três conectores de cisalhamento em cada laje, a posição dos extensômetros internos foi considerada sobre a linha central dos *studs*.

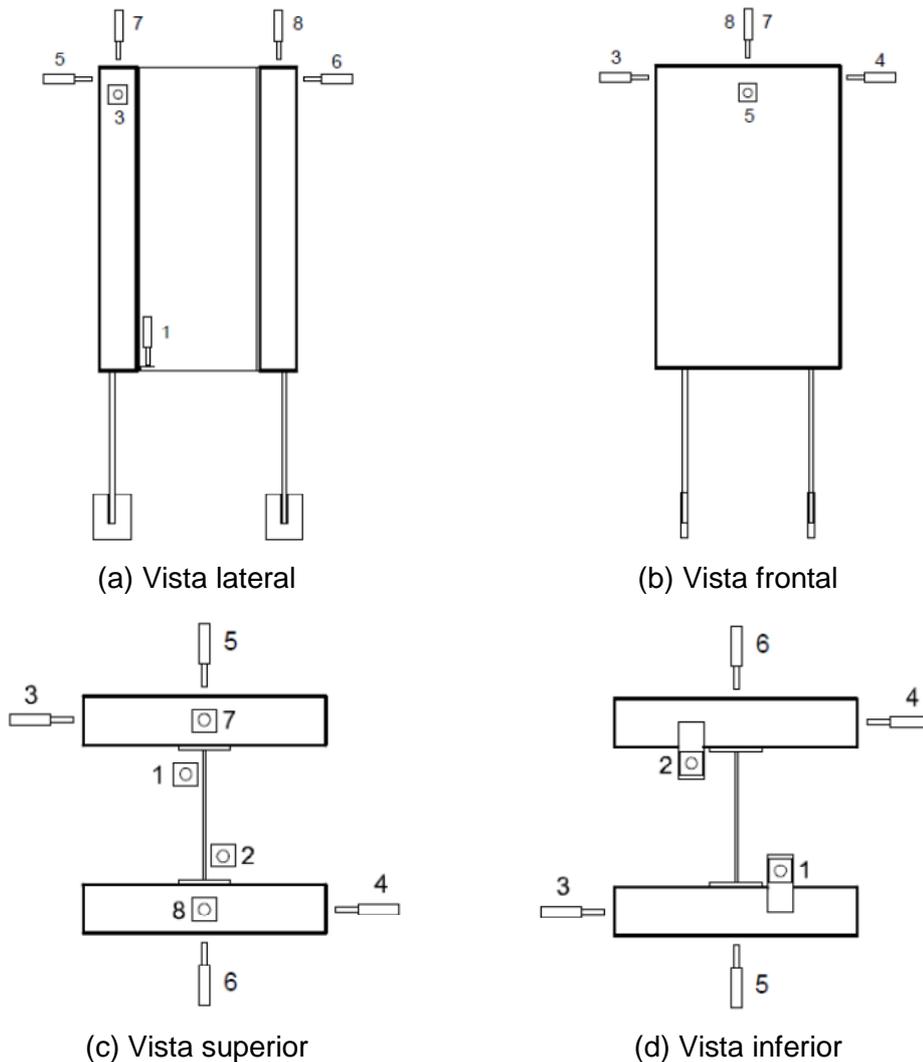


Figura 3.44 – Posicionamento dos transdutores de deslocamento - Série S2010 (Ramires, 2010).



Figura 3.45 – LVDTs posicionados (Ramires, 2010).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0921385/CA

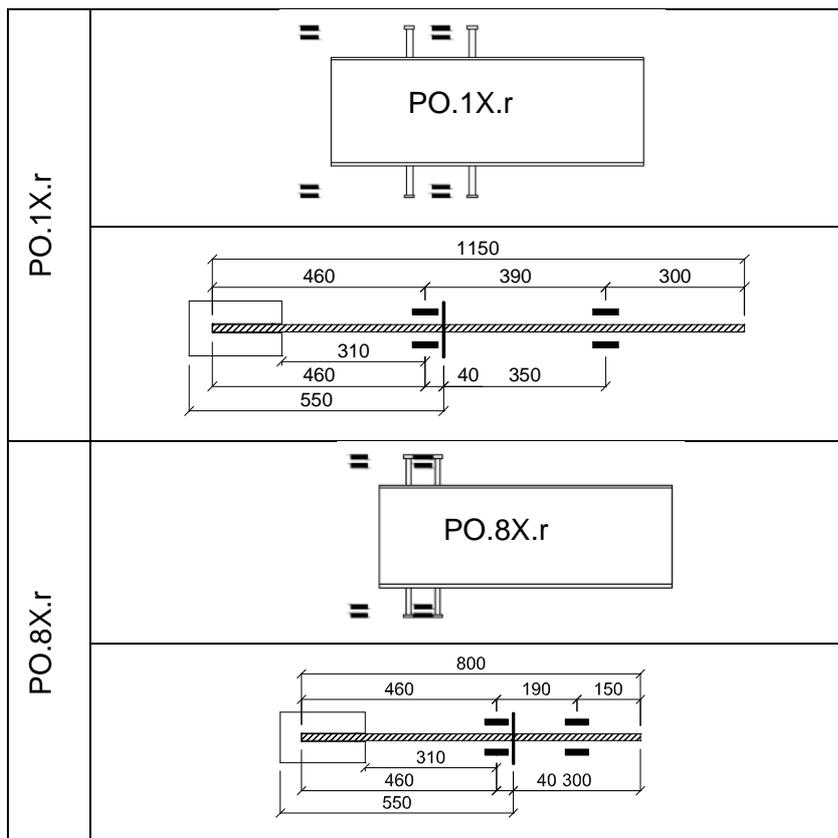


Figura 3.46 – Posicionamento dos extensômetros para ensaios com dois conectores - Séries S2010 (Ramires, 2010).

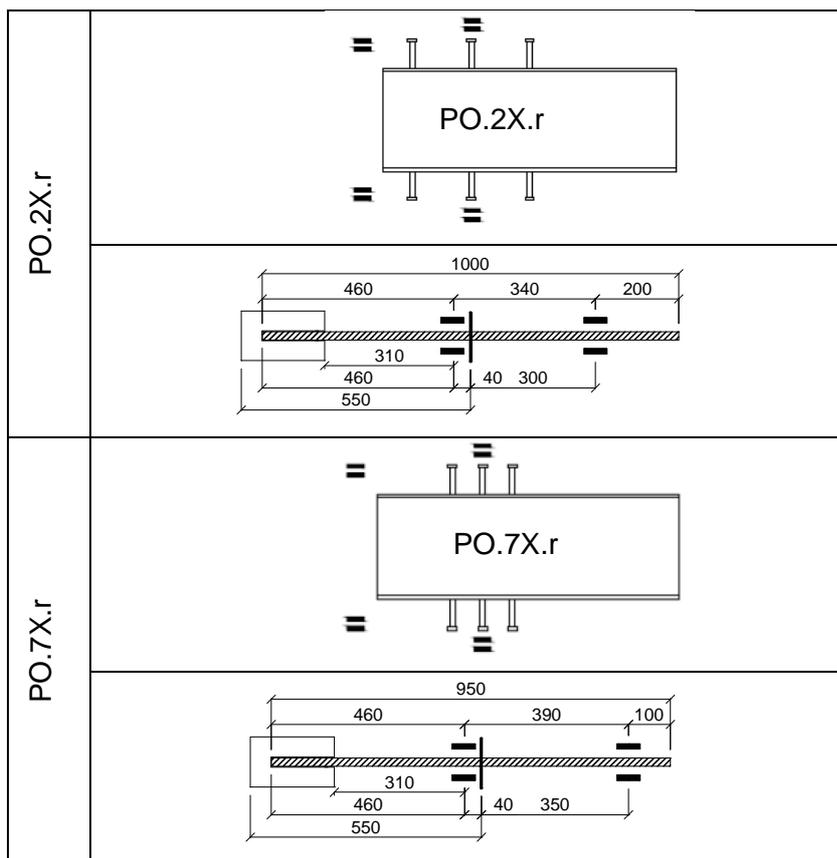


Figura 3.47 – Posicionamento dos extensômetros para ensaios com três conectores - Séries S2010 (Ramires, 2010).

3.4.3.

Ensaio *pull outs* subsequentes – Série S2014

A fim de aumentar o número de observações e resultados obtidos na série de ensaios realizados por Ramires (2010) foram desenvolvidos mais um grupo de ensaios, nessa fase de experimentos. Ao grupo realizado por Ramires (2010), ainda foi incluída uma nova série de ensaios, contribuindo para um novo conjunto de resultados para análise. As considerações para esses ensaios são apresentadas a seguir, denominadas como Série S2014.

3.4.3.1.

Configuração do ensaio

Os ensaios realizados nessa fase foram definidos conforme descrito na Tabela 3.1. Foram utilizados quatro diferentes configurações de ensaio, três delas seguindo as já apresentadas por Ramires (2010) e um novo conjunto de ensaios, com grupos denominados: PO.1X (PO.11, PO.12), PO.2X (PO.21,

PO.22), PO.8X (PO.81) e PO.9x (PO.91, PO.92, PO.93). Cada grupo tem uma característica diferente, dentre as quais: comprimento da armadura principal, número de conectores, modo de ruptura, entre outros.

A Tabela 3.3 apresenta resumo das configurações dos ensaios realizados na série produzida em 2014.

Tabela 3.3 – Características dos ensaios subsequentes - Série S2014.

Grupo	Armadura			f _{ck} (MPa)	Conector		
	L (mm)	Qt. (un.)	Ø (mm)		d1 (mm)	d2 (mm)	Qt. (un.)
PO.1X	1150 (650+500)	2	16	30	200	250	2
PO.2X	1000 (500+500)	4	20	30	200	100	3
PO.8X	800 (300+500)	4	16	30	100	100	2
PO.9X	1000 (500+500)	4	16	30	100	100	2

3.4.3.2.

Material de composição

As formas foram fabricadas com madeira plastificada, a fim de facilitar a desforma após o período de cura do concreto. A Figura 3.48 apresenta as formas executadas para as novas séries confeccionadas.

O concreto utilizado foi usinado, da fabricante Lafarge. A compra do material se fez necessário devido a quantidade de concreto necessário para as concretagens realizadas durante o processo. A resistência característica a compressão do concreto (f_{ck}) esperada era de 30 MPa, slump 16 ± 3 cm. Os procedimentos de recebimento foram seguidos conforme normas ABNT, com a retirada de corpos de prova (CPs) para estudo da resistência a compressão, tração e módulo de elasticidade do material. A Figura 3.49 apresenta o preenchimentos destes CPs.

As armaduras principais foram compradas já dobradas nas dimensões do estribo, o que facilitou a montagem do conjunto. As barras de armadura também foram fornecidas nas dimensões dos ensaios. Os aços para armadura são da

Gerdau, aço CA-50. A Figura 3.50 apresenta as barras da armadura com os extensômetros fixados e a marcação das barras, de acordo com seu ensaio.



Figura 3.48 – Formas das novas séries de ensaios.



Figura 3.49 – Preenchimento dos corpos de prova.



Figura 3.50 – Detalhe das barras de armadura.

3.4.3.2.1. Ensaio nos aços

Para verificação das resistências dos aços empregados, foram realizados ensaios dos mesmos materiais empregados na confecção dos ensaios principais, sendo a barra de armadura de 16 mm, a mesa e a alma do perfil. Os ensaios foram realizados no laboratório da Fonseca Teles, UERJ, por ter os equipamentos necessários para as espessuras estudadas. Para tanto, se fez necessário a usinagem das peças, a fim de seguir os padrões definidos pela ABNT NBR 6892/2002 para determinação do módulo de elasticidade, por meio do ensaio de tração. As barras foram cortadas no próprio laboratório da PUC. Para o perfil o corte foi realizado na empresa Metalfenas. Posteriormente, os exemplares foram usinados.

Foram desenvolvidos os desenhos para descrição dos corpos de prova (CPs). As peças foram identificadas de acordo com a região retirada dos CPs, possibilitando assim a análise em conjunto dos aspectos observados. A Figura 3.51 (a) apresenta a divisão geral estudada; a Figura 3.51 (b) o detalhe para a mesa do perfil e Figura 3.51 (c) o detalhe para alma da viga. A Figura 3.52 apresenta o dimensionamento para a barra redonda.

Para auxiliar na identificação dos corpos de prova empregados, foram dados nomes para cada elemento dos ensaios: as barras redondas de aço, de material CA-50, para estruturas gerais, com três corpos de prova, denominados CP1_Barra, CP2_Barra e CP3_Barra; a alma do perfil, com três corpos de prova CP1_Alma, CP2_Alma, CP3_Alma; e a mesa do perfil, com dois corpos de prova, denominados de CP1_Mesa, CP2_Mesa. A Tabela 3.4 apresenta os valores teóricos dos materiais utilizados.

Tabela 3.4 – Características do aço estudado - previsão.

	Tensão de escoamento f_y (MPa)	Tensão de Ruptura f_u (MPa)	Módulo de Elasticidade E (MPa)
CP Barra	500	540	205000
CP Mesa do perfil	345	450	205000
CP alma do perfil	345	450	205000

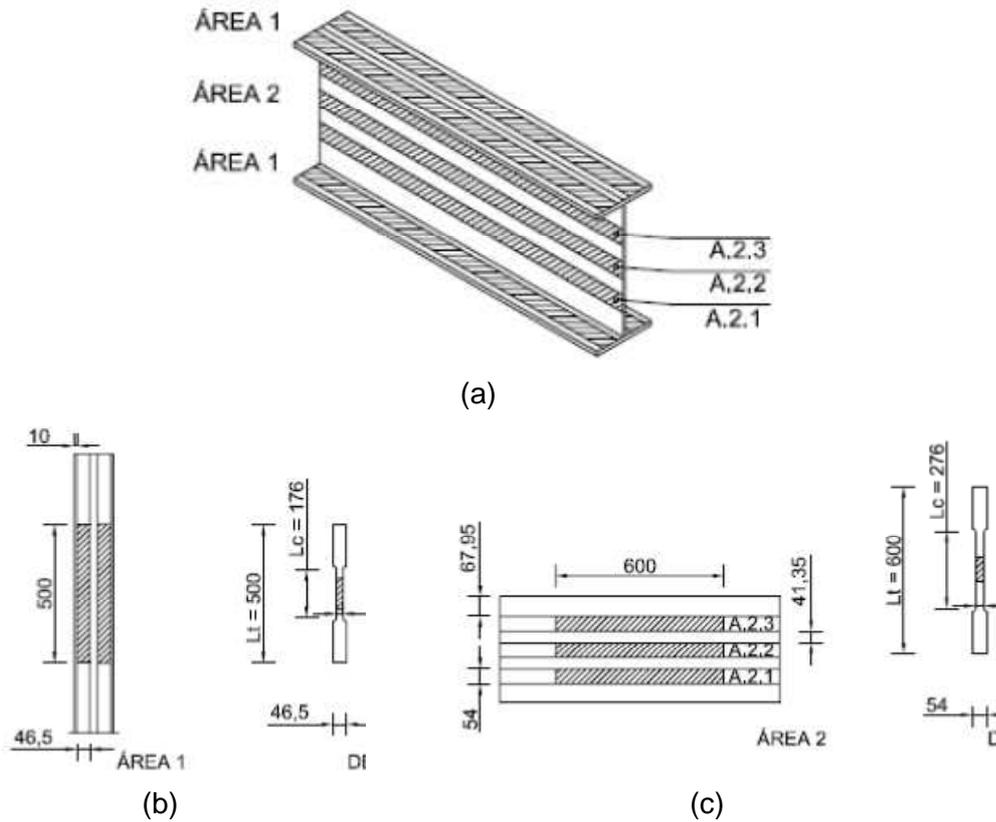


Figura 3.51 – Configuração ensaio perfil: (a) divisão geral, perfil W 410x46; (b) divisão da mesa; (c) divisão da alma.

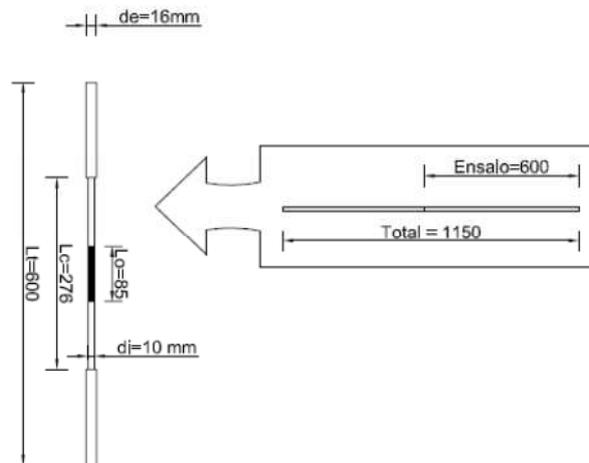


Figura 3.52 – Detalhe para marcação da barra redonda.

A Figura 3.53 apresenta a preparação dos ensaios da barra. A Figura 3.54 mostra a montagem dos ensaios para a alma do perfil. Por último, a Figura 3.55 apresenta o posicionamento dos corpos de prova para a mesa do perfil.

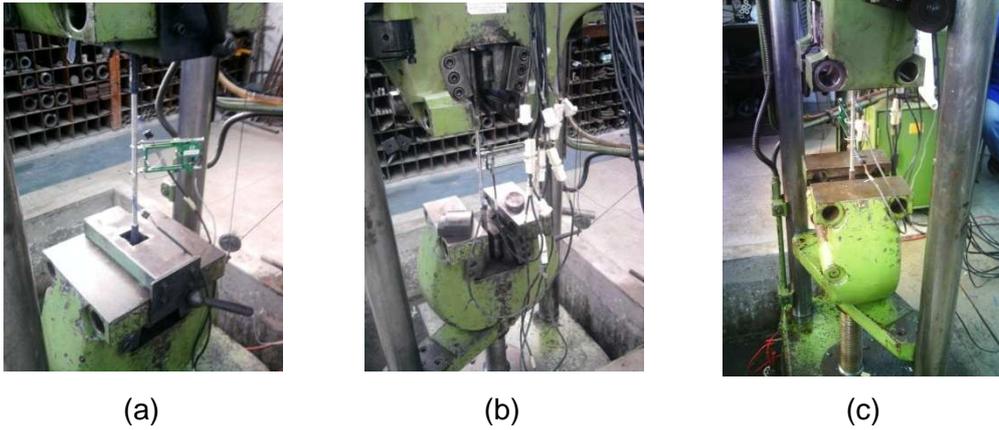


Figura 3.53 – Ensaios barra: (a) CP1_Barra; (b) CP2_Barra; (c) CP3_Barra.

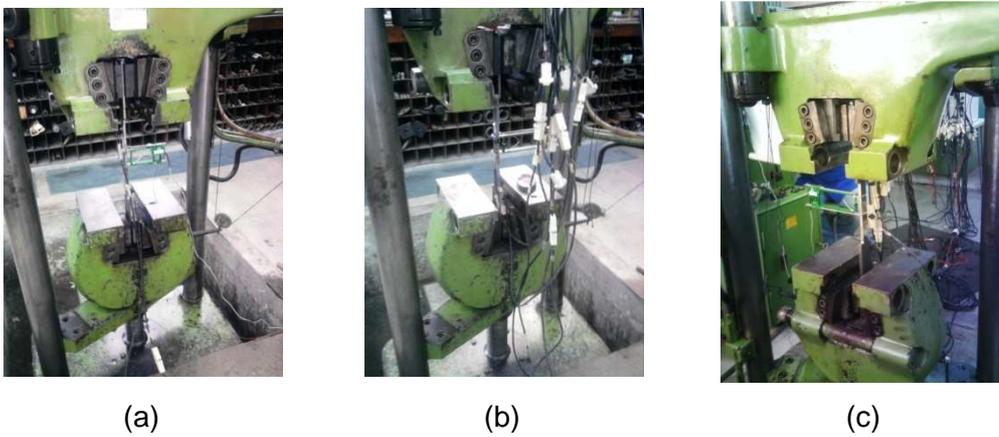


Figura 3.54 – Ensaios alma do perfil: (a) CP1_Alma; (b) CP2_Alma; (c) CP3_Alma.

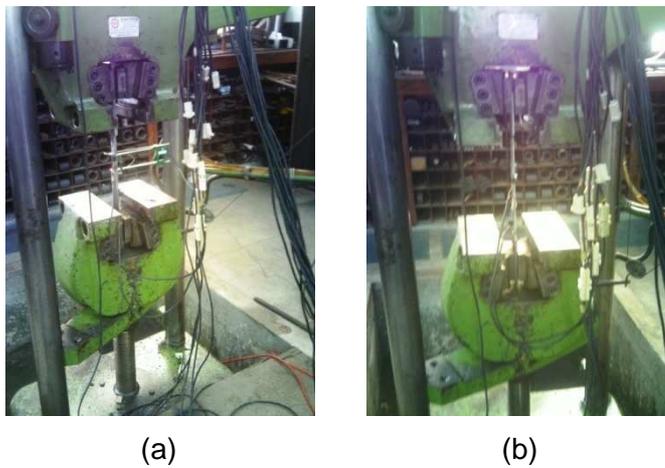


Figura 3.55 – Ensaios alma do perfil: (a) CP1_Mesa; (b) CP2_Mesa.

A velocidade de execução dos ensaios foi mantida constante e entre os limites constantes na Norma.

Em relação às incertezas dos resultados, pode-se levantar os seguintes parâmetros divididos em duas categorias:

- parâmetros metrológicos, tais como as classes da máquina de ensaios e do extensômetro e a incerteza das medições das dimensões do corpo de prova;
- parâmetros do material e do ensaio, tais como a natureza do material, a geometria e preparação do corpo de prova, velocidade do ensaio, temperatura, aquisição de dados e técnicas de análise.

Após o corte dos corpos de prova na dimensão prevista e a usinagem das áreas úteis, foi realizada a colagem dos extensômetros, dois por corpo de prova, próximo a cada extremidade da área útil do ensaio, conforme Figura 3.56, para a medição das deformações por meio do sistema de aquisição de dados. Posteriormente, foram realizados os testes para a determinação da tração.

Os ensaios foram realizados em equipamento de tração específico, com dois sistemas de aquisição de dados, para poder assim, possibilitar a redundância de dados, por meio dos dois sistemas, além da medida direto do equipamento.

Para o cálculo do módulo de elasticidade, foi utilizado o gráfico de tensão *versus* deformação específica, e a lei de Hooke $\sigma = E \cdot \epsilon$.



Figura 3.56 – Extensômetros nos CPs de aço.

3.4.3.2. Ensaio no concreto

Foram realizados os ensaios de resistência a compressão do concreto (f_c), em diferentes idades, para verificação da resistência a compressão do concreto, e transformadas nas resistências aos 28 dias. Para verificação dos resultados obtidos no laboratório de estruturas e materiais da PUC-Rio (LEM-DEC), foram rompidos alguns corpos de prova no laboratório da UERJ (Fonseca Teles), permitindo assim a confirmação dos valores obtidos.

3.4.3.3. Estruturas de apoio dos ensaios (estruturas auxiliares)

Com o transcorrer das atividades para a nova série de ensaios, mostrou-se a necessidade de modificações na estrutura de apoio utilizados por Ramires (2010). Dessa forma, e a fim do melhor arranjo para a execução dos ensaios, foram desenvolvidos três modelos de estruturas de apoio, no total. Para os ensaios realizados sem o impedimento das solicitações sobre os conectores, se manteve a estrutura utilizada por Ramires (2010). Posteriormente, a fim de impedir esse esforço sobre os conectores, foi realizado um novo modelo de apoio. Com essa modificação se fez necessário um reforço na estrutura para suportar cargas superiores de aplicação, além da melhoria quanto a questão do nivelamento dos elementos. Esses modelos serão apresentados a seguir.

A estrutura de apoio, conforme os ensaios de Ramires (2010), foi utilizada nos ensaios PO.12, PO.21, PO.91 e PO.93, não havendo alterações para os perfis de primeiro nível para estes ensaios, conforme Figura 3.57. As mesas de apoio permaneceram as mesmas para todos os novos ensaios, conforme Figura 3.58. Para o travamento de segundo nível, foram utilizados os perfis U, em substituição aos perfis I utilizados por Ramires (2010). A Figura 3.59 apresenta os perfis ainda não posicionados.



Figura 3.57 – Perfis de travamento de primeiro nível.

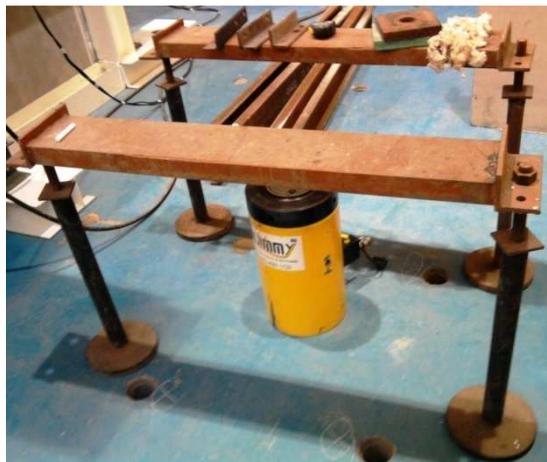


Figura 3.58 – Mesa de apoio.



Figura 3.59 – Perfis de travamento de segundo nível.

Para todos os ensaios foram incluídas cantoneiras nas chapas localizadas na extremidade das barras de armadura, a fim de permitir o nivelamento e melhorar o recebimento de cargas das barras, e evitar que as solicitações atuantes fossem diferentes em cada uma delas. Para sua fixação foi utilizado o nível laser e massa de secagem rápida.

As barras redondas, mostradas na Figura 3.60, de fixação a laje de reação, permaneceram as mesmas para os ensaios PO.12, PO.21, PO.91 e PO.93. Para os demais ensaios, a barra redonda foi substituída para de diâmetro de 1". Dessa forma, foi possível suportar cargas aplicadas superiores.



Figura 3.60 – Barras redondas.

Nos ensaios PO.22, PO.81 e PO.92, na estrutura de segundo nível foi realizado o reforço por meio da solda de barras de 1,5" x 6" x 1,7m e usadas na estrutura de primeiro nível. Dessa forma, o que antes era considerado primeiro nível, passou para a posição do segundo nível, e a estrutura de segundo nível, com o reforço das barras, passaram para o primeiro nível. Essa modificação é verificada na Figura 3.61.



Figura 3.61 – Perfis de travamento de segundo nível com adição das barras soldadas.

A placa de aplicação da carga, para o caso dos ensaios em que essa apoiava o perfil metálico e as lajes em concreto, está apresentada na Figura 3.62. Essa placa apoiava o perfil metálico e a laje de concreto, permitindo que todo o conjunto fosse empurrado pelo atuador hidráulico.



Figura 3.62 – Placa de aplicação - ensaios modificados.

3.4.3.4. Sequência de montagem

Durante o preenchimento do primeiro conjunto de ensaios concretados, na tentativa de vibração com o aparelho, ocorreu a abertura das formas. Nesse momento, optou-se para a realização do adensamento do concreto com uma barra de ferro, evitando-se assim o deslocamento das formas. A fixação foi reforçada por grampos, mas em alguns ensaios uma pequena abertura das formas pode ser observada.

A sequência de montagem inicial seguiu ao proposto na tese de Ramires (2010). Porém, no decorrer das atividades se fez necessário a alteração do conjunto de peças auxiliares do ensaio, e por conseguinte, da forma de montagem do ensaio. A seguir, são apresentadas as diferentes formas de montagem executados no decorrer dos ensaios.

A sequência de montagem é descrita abaixo:

- Foram localizadas as mesas de apoio para o conjunto do ensaio, e o corpo de prova posicionado invertido a concretagem realizada, conforme Figura 3.63. Acima das chapas das barras, são apoiados os perfis do primeiro nível de travamento, perfis esses soldados dois a dois, conforme Figura 3.64.
- Nessa fase também é posicionado o atuador hidráulico abaixo da peça e sobre chapa, que receberá a célula de carga e possibilitará que o cursor do atuador atue com a sua altura útil disponível. Sobre o atuador foi inserida uma placa de aço, que servirá de base para a célula de carga. A Figura 3.65 apresenta esse conjunto.

- Em seguida é realizado o posicionamento do travamento do segundo nível realizado através de perfil C.
- Realizada a ligação da instrumentação dos extensômetros ao equípe principal, conforme Figura 3.66.



Figura 3.63 – Posicionamento do ensaio sobre a mesa de apoio.



Figura 3.64 – Primeiro nível de travamento.



Figura 3.65 – Conjunto atuador hidráulico e placa de aço.



Figura 3.66 – Fios ligados dos extensômetros.

O posicionamento dos extensômetros seguiu o descrito nos próximos itens, de acordo com o ensaio realizado. A posição dos transdutores de deslocamento (LVDTs) teve variações de acordo com os ensaios, a fim de melhorar a coleta de dados, e também são apresentados a seguir.

Essa sequência de montagem foi realizada para os ensaios PO.11 e PO.12, onde a placa para atuação do atuador hidráulico aplicava somente força sobre o perfil metálico.

Para os ensaios PO.22, PO.81 e PO.92, foram realizados os seguintes procedimentos, diferentes do anteriormente citados:

- Inserida a rótula entre a célula de carga principal e a placa de aplicação sobre o perfil e as lajes de concreto, para permitir a melhor aplicação da carga sobre o sistema, conforme Figura 3.67.

- Colocação dos perfis de segundo nível, seguindo a modificação descrita, com a adição das barras soldadas, e placas de nivelamento das células secundárias, presas a barra redonda, conforme Figura 3.61.
- Fixação das barras retangulares as lajes de concreto, com a finalidade de facilitar a medição dos deslocamentos pelos transdutores, conforme Figura 3.68.

A Figura 3.69 apresenta as diferenças da estrutura para os ensaios PO.22, PO.81 e PO.92.



Figura 3.67 – Conjunto atuador hidráulico, placa de aço e rótula.



Figura 3.68 – Barras retangulares para medição dos LVDTs.

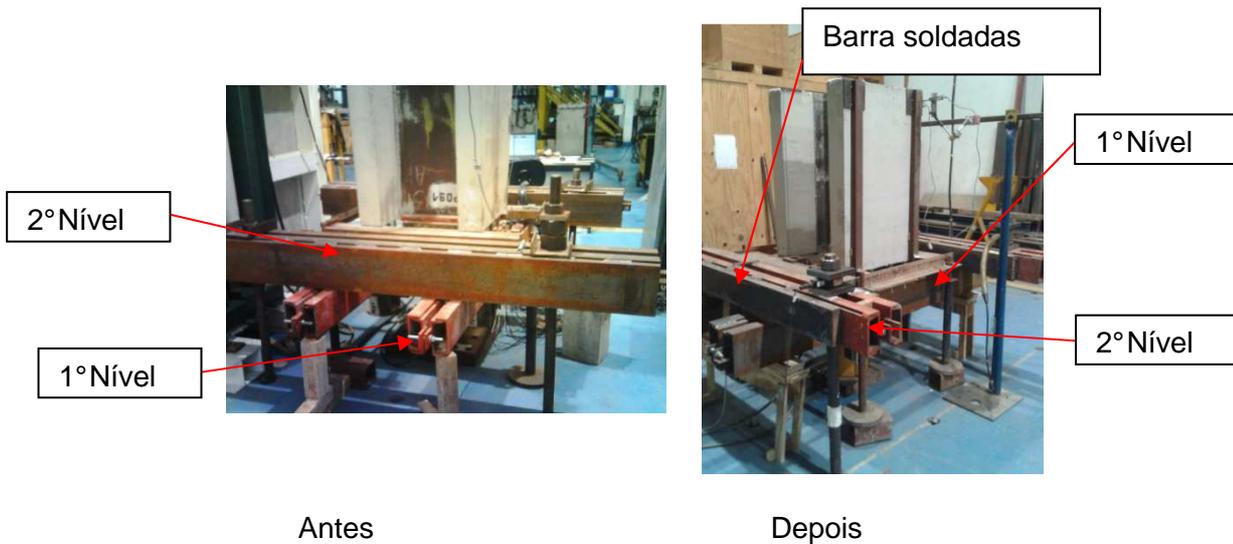


Figura 3.69 – Modificações da estrutura para os ensaios PO.22, PO.81 e PO.92.

A instrumentação utilizada seguiu o mesmo procedimento realizado na Série S2010, com a utilização de extensômetros nas barras de armadura, transdutores de deslocamento e células de carga. Modificações do posicionamento dos extensômetros e transdutores de deslocamento foram realizadas, para obter melhores resultados. Quanto a célula de carga, mediante a não realização de redundâncias de medições na Série S2010, foi incluída a possibilidade de novas medições de carga por meio de um conjunto de quatro células de carga localizadas nas barras redondas da estrutura auxiliar, e de extensômetros que fazem diretamente a conversão das unidades, na própria barra redonda. Como essas medições foram incluídas no decorrer dos ensaios, conforme verificada a necessidade de melhorias e alterações, pode-se observar que nem todos os ensaios apresentaram o conjunto completo de medições. Dessa forma, foram assim divididos:

- Apenas célula de carga principal: PO.91
- Células de carga principal e secundárias: PO.11, PO.12, PO.21, PO.93
- Células de carga principal e secundárias e extensômetros: PO.22, PO.81, PO.92

A utilização do transdutor de pressão foi realizada, mas durante o desenvolvimento dos ensaios, percebeu-se que suas medidas oscilavam muito

por ter influência direto do movimento de aplicação de carga por meio do macaco hidráulico, onde no momento de aplicação os valores atingiam picos de valores, com posterior decaimento, sem permanecer com a carga. Dessa forma, em alguns ensaios seus valores foram obtidos com o coeficiente de calibração observado, mas não foram considerados para a comparação de resultados. São eles: PO.22, PO.81, PO.91 e PO.92.

A instrumentação utilizada para medição das cargas foi calibrada de forma individual, para obter os coeficientes a serem utilizados no sistema de aquisição de dados e comparativamente, possibilitando assim verificar se os valores obtidos entre eles estava coerente. Esses coeficientes são obtidos com a comparação dos valores previstos em equipamento calibrado previamente por laboratório registrado no INMETRO, conforme recomendações técnicas. As medições realizadas apontaram bons resultados nas comparações entre os instrumentos, dentro dos padrões de tolerância, para os ranges possíveis de aquisição de cada elemento. No decorrer da apresentação dos resultados, serão apresentadas as comparações dos resultados obtidos em cada medição, tendo sido considerado para os estudos, o valor obtido pela célula de carga principal.

3.4.4. Previsão dos resultados

Para a previsão dos resultados foram realizados cálculos considerando-se a resistência da armadura e sua ancoragem, dos conectores e da laje de concreto. Com esse estudo, foi possível prever o tipo de ruptura esperada para o ensaio, que podem ser pela ruptura: da armadura principal por tração, dos conectores de cisalhamento, arrancamento da armadura pela ruptura da ancoragem e do concreto devido a compressão exercida pelos conectores.

As Tabela 3.5 e Tabela 3.6 apresentam os resultados esperados para os pré-ensaios e os ensaios subsequentes (Séries S2010 e S2014), respectivamente.

Tabela 3.5 – Previsão dos resultados para os pré-ensaios.

Grupo	Resistência _(EC)			Ruptura _(EC)	
	Ancoragem (kN)	Barra (kN)	Conector (kN)	(kN)	Modo
PO.0.1	569,40	402,12	713,44	402,12	Barra
PO.0.2	569,40	402,12	475,63	402,12	Barra

Tabela 3.6 – Previsão dos resultados - Séries S2010 e S2014.

Grupo	Resistência _(EC)			Ruptura _(EC)	
	Ancoragem (kN)	Barra (kN)	Conector (kN)	(kN)	Modo
PO.1x.r PO.1x	569,40	402,12	475,63	402,12	Barra
PO.2x.r PO.2x	1095,00	1256,64	713,44	713,44	Conector (modo 1)
PO.7x.r	480,95	628,32	713,44	480,95	Ancoragem
PO.8x.r PO.8x	525,60	804,25	475,63	475,63	Conector (modo 1)
PO.9x	917,23	804,25	475,63	475,63	Conector (modo 1)

3.5.

Ensaio de cisalhamento direto nos conectores

Visando estudar a reação as solicitações sobre os conectores e a influência da perna de solda do resultado final, foram realizados ensaios com esses elementos, que serão descritos a seguir. Esse estudo foi realizado porque, durante a execução dos três primeiros ensaios, sendo PO.91, PO.93 e PO.21 observou-se o rompimento dos conectores, devido a problemas de soldagem.

3.5.1.

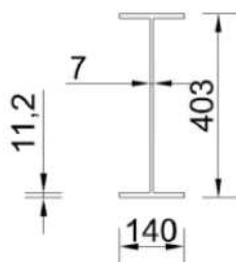
Ensaios com perna de solda conhecidas

Estes ensaios foram desenvolvidos no laboratório de estruturas e materiais (LEM-DEC), na PUC-Rio. A configuração foi escolhida considerando-se a melhor adequação de sua execução no laboratório. Inicialmente, foram previstas a execução das soldas de conectores, com diferentes pernas efetivas de soldagem, em um único perfil, totalizando um conjunto de seis diferentes tipos de

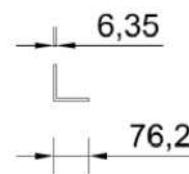
solda. Porém, no desenvolvimento da montagem, observou-se que a configuração inicial poderia apresentar problemas relativos a estabilidade e possível tombamento, quando da aplicação da carga. Dessa forma, a configuração do ensaio passou a contar com dois perfis, idênticos, ligados por meio de cantoneiras, evitando-se assim, o possível tombamento. A realização do ensaio inicialmente ocorreria de dois em dois conectores, porém, durante a execução dos primeiros testes, verificou-se a possibilidade do rompimento individual, com uma pequena alteração da configuração, e os demais ensaios foram realizados seguindo-se esse novo modelo.

Para os perfis base, foram utilizados dois perfis metálicos. As cantoneiras foram as utilizadas para nivelamento das barras, também dos mesmos ensaios. Esses elementos encontram-se nas Figura 3.70.

A soldagem foi executada por profissional da empresa Metalfenas, de modo a ser realizada por pessoa capacitada para essa atividade. O processo realizado foi por solda manual, utilizando-se eletrodo específico para solda de elementos que receberão cargas. Devido ao processo executado, ou seja, manualmente, percebeu-se a dificuldade da execução da solda, com diferenças pequenas entre as pernas efetivas. Dessa forma, optou-se pela realização de três conjuntos de soldas, sendo a primeira com uma camada de passe, a segunda, com uma camada reforçada, e a terceira, com duas camadas de passe. As pernas e a configuração do ensaio encontram-se de Figura 3.71.



(a) Perfil metálico - W 410 x 46,1



(b) Cantoneira - 3" x 1/2"

Figura 3.70 – Elementos utilizados.

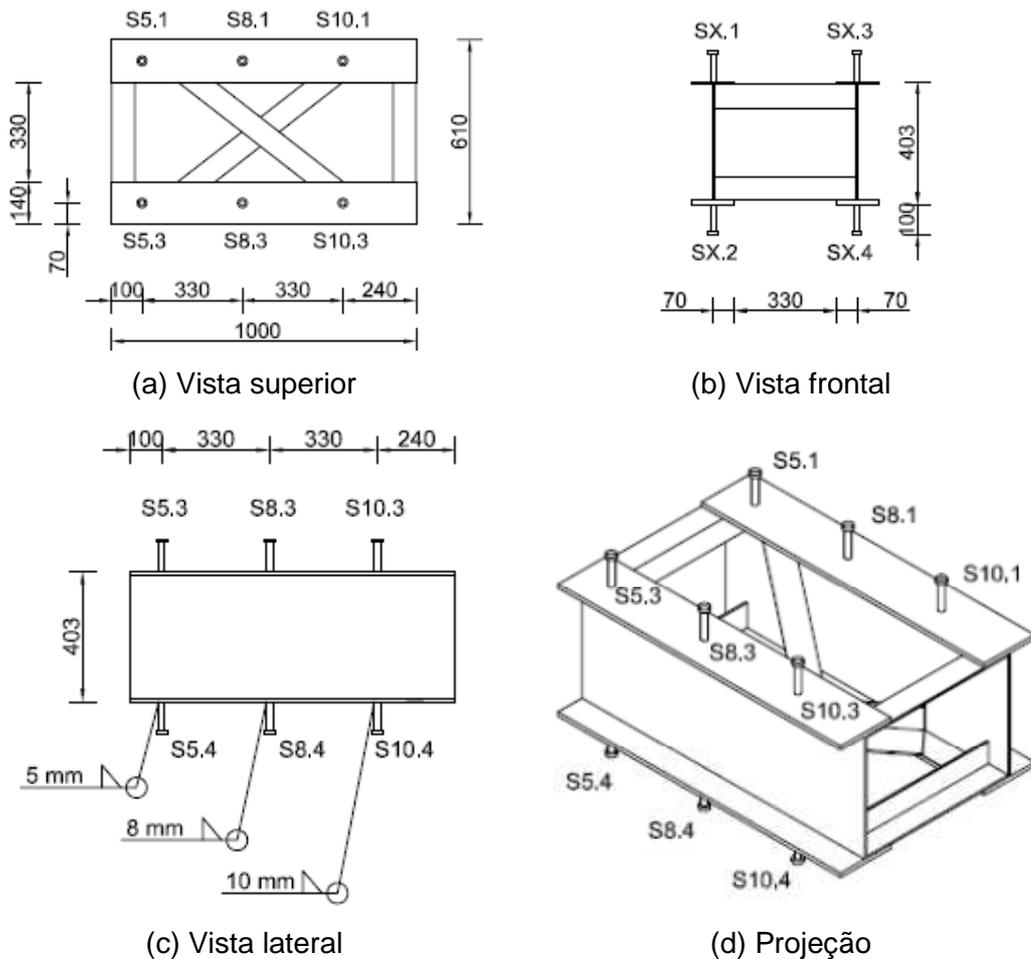


Figura 3.71 – Arranjo dos ensaios.

O ensaio foi realizado conforme a Figura 3.72, possibilitando o rompimento de cada conjunto de conectores, sem interferir nos demais elementos. Para isso, foi montado esquema em que os elementos auxiliares ficaram presos ao equipamento de içamento de carga, a fim de facilitar a mudança de cada ensaio, além de evitar que nas peças ocorram danos com a queda no rompimento. Dessa forma, foi possível manter o perfil base sobre o piso, e apenas mudar o sistema auxiliar de posição, para evitar grandes deslocamentos e agilizar o processo.

A Figura 3.73 apresenta fotos de execução da solda dos perfis e conectores. A Figura 3.74 mostra os detalhes de posicionamento dos conectores, e dos conjuntos de soldas executados.

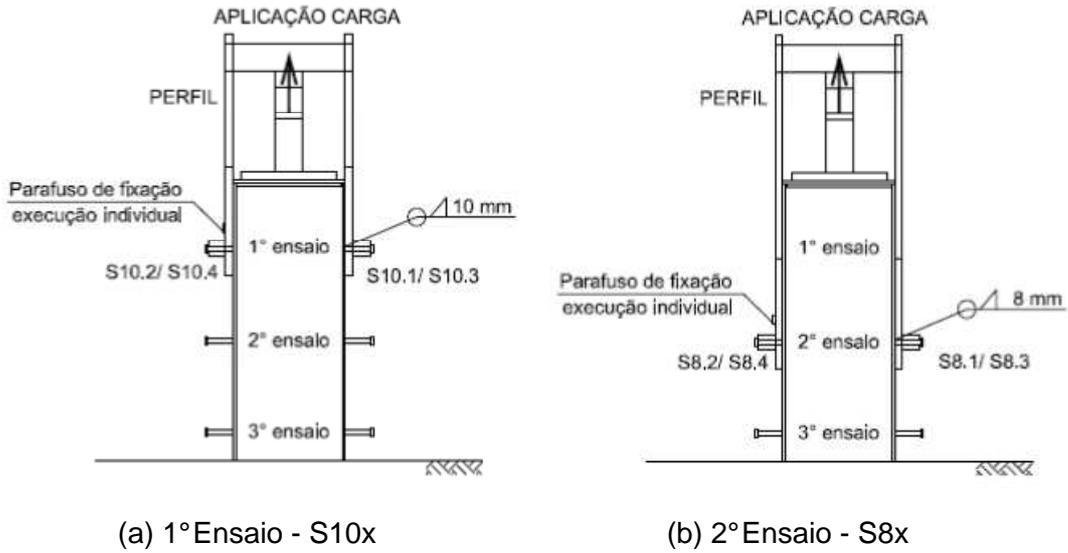


Figura 3.72 – Execução do ensaio - arranjo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0921385/CA



(a) Execução da solda



(b) Perfis soldados

Figura 3.73 – Execução das soldas do arranjo.

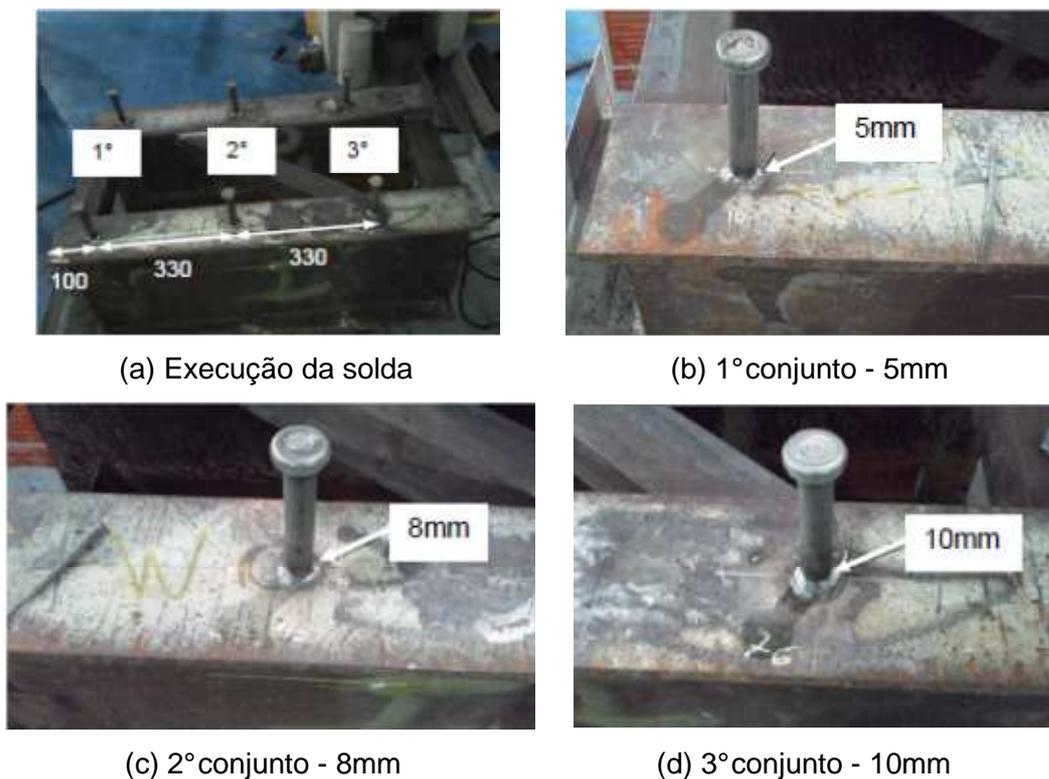


Figura 3.74 – Detalhes de posicionamento dos conectores.

A Figura 3.75(a) apresenta o sistema de execução de ensaio arrumado, com a presença do macaco e da célula de carga em seu posicionamento. Sobre a célula, ainda é incluído um sistema de apoio móvel no sentido dos conectores (longitudinal), permitindo que nesse sistema se tenha rotação, mas que no outro eixo não ocorra. A Figura 3.75(b) mostra o furo na chapa de transferência de carga para o conector, que teve esse formato para possibilitar a passagem da cabeça do conector.

A Figura 3.75(c) traz o primeiro grupo de parafusos utilizados para travamento de uma das placas, para possibilitar a execução dos ensaios em cada conector. Por não ser de alta resistência e devido ao seu tamanho, o parafuso rompeu antes de se alcançar a carga última prevista. A Figura 3.75(d) apresenta o novo grupo de parafusos, de alta resistência, que suportaram aos ensaios realizados, a chapa fixada ao perfil, por esses parafusos, conforme nova configuração do ensaio, e a placa de recebimento dos conectores, que foi soldada à chapa, para facilitar a montagem de cada um dos ensaios.



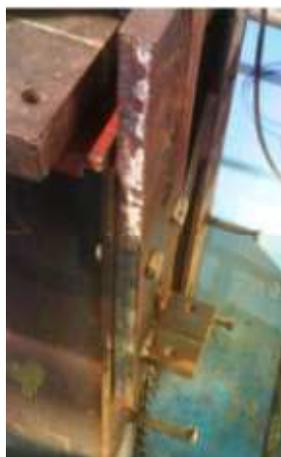
(a) Macaco e placa de apoio



(b) Chapa de transferência



(c) Parafuso rompido



(d) Parafusos e placa soldada

Figura 3.75 – Detalhes de montagem do sistema auxiliar.

Para o sistema foi realizada a calibração da célula de carga, para a obtenção da constante de transformação a ser utilizada no sistema de aquisição de dados. Para tanto, a célula foi inserida em um equipamento capaz de medir as forças aplicadas e comparar com os resultados lidos pela própria célula de carga. Ao final, é produzido um gráfico leitura de célula *versus* leitura do equipamento e obtida a constante de conversão para o sistema e a célula.

Em relação a montagem, sobre a perfil base de aço, onde está soldado o conector, foram incluídos dois perfis, de menores dimensões, responsáveis pelo travamento das barras redondas que têm em sua extremidade as placas de contato com os conectores. Essas placas simulam o efeito do deslocamento do concreto confinado existente na área próximo aos conectores, conforme os ensaios principais, submetidos à força de compressão no conjunto estudado.

Para a aplicação de carga, que ocorre com a aplicação de força de tração ao conjunto ensaiado (conectores), foi incluída a célula de carga, que estava ligada ao sistema de aquisição de dados, para a obtenção dos valores de cargas

aplicadas, até o rompimento dos conectores. Para evitar que houvesse o deslizamento lateral da peça em relação a célula de carga, e desta forma ocorresse a aplicação desigual das solicitações sobre o par de conectores, foi incluída rótula, que permitia o movimento na direção longitudinal aos conectores.

Para o ensaio, foi executado um sistema de bombeamento para a célula de carga, e a gravação manual dos valores de carga obtidos, conforme desenvolvimento do processo. Com a configuração individual de cada conector, foi possível a execução de quatro ensaios para cada solda realizada, podendo haver um maior número de resultados para o estudo.

Para se evitar que ocorram problemas após o rompimento dos conectores e assim perdas de equipamentos, a partir do segundo ensaio foi inserido um sistema de anteparas de madeiras, restringindo-se assim o espaço e áreas de contatos dos elementos envolvidos.

Observa-se ainda que com a realização do primeiro ensaio, constituído de dois conectores, com solda de 10 mm, pode-se observar que as pontas vivas existentes na placa com o furo comportou-se como uma guilhotina, gerando um acúmulo das solicitações naquela região e o posterior rompimento do conector no ponto. A observação do ocorrido neste primeiro ensaio gerou a necessidade de algumas modificações do arranjo do modelo, a fim de evitar o rompimento pelo corte não previsto e o possível defeito das peças envolvidas na montagem do ensaio. Para tanto, a chapa responsável pela fixação do conector foi arredondada, retirando-se assim os cantos vivos da placa, a fim de se evitar o efeito de corte ocorrido no primeiro ensaio. Além disso, os elementos responsáveis pela aplicação de carga foram presos, por meio de alças em outras estruturas fixas, para que, no momento do rompimento, essas não tivessem danos devido ao impacto gerado.

Para os ensaios individuais foi realizada a fixação de uma das chapas por meio de parafusos de alta resistência. Durante os ensaios foi realizado o estudo da questão de confinamento ou não do conector, com a utilização de uma ou duas placas para fechamento.

Para a previsão dos valores a serem alcançados nos ensaios, foi considerado o dimensionamento com as prescrições estabelecidas na Norma Brasileira NBR 8800:2008 e no *Eurocode 4* (EC4:1994). O valor final considerado foi o menor entre os dois dimensionamentos. O conector utilizado foi de 19 mm de diâmetro e Aço ASTM 108 Gr, 1020, com tensão de escoamento de 345 MPa. A Tabela 3.7 apresenta os valores previstos para as diferentes pernas de solda. Na mesma tabela, é apresentado o valor para o

sistema, quando utilizado o sistema com dois conectores sendo ensaiados ao mesmo tempo.

Os valores previstos para as tensões e o deslocamento esperados para a perna de solda de 5 mm são apresentados na Equação (3.1) e Equação (3.2), que indicam como foram obtidos os demais valores para da Tabela 3.8, onde V é a força cisalhante, Q é o momento estático da seção, I é o momento de inércia, t é a largura da seção transversal, L é o comprimento relativo ao deslocamento, e E é o módulo de elasticidade.

Tabela 3.7 – Resistências previstas dos ensaios de cisalhamento direto nos conectores.

NBR 8800						
Perna (mm)	Conector (kN)	Solda (kN)	F _{máx} (kN)	Modo de falha	Quant. Sistema	F _{sist} (kN)
10	94,13	91,53	91,53	Solda	2	183,06
8	94,13	73,22	73,22	Solda	2	146,44
5	94,13	45,76	45,76	Solda	2	91,52
Eurocode (EC3 e EC4)						
Perna (mm)	Conector (kN)	Solda (kN)	F _{máx} (kN)	Modo de falha	Quant. Sistema	F _{sist} (kN)
10	75,31	124,18	75,31	Conector	2	150,62
8	75,31	99,34	75,31	Solda	2	150,62
5	75,31	62,09	62,09	Solda	2	124,18

Tabela 3.8 – Resistências previstas dos ensaios de cisalhamento direto nos conectores.

Perna (mm)	τ_{NBR} (MPa)	τ_{EC} (MPa)	δ_{NBR} (mm)	δ_{EC} (mm)
10	430,4	354,1	23,3	19,1
8	344,3	354,1	18,6	19,1
5	215,2	292,0	11,6	15,8

$$\tau = \frac{VQ}{It} = \frac{4V}{3A} = \frac{4 \times 45760}{3 \times \left(\pi \times \left(\frac{19}{2} \right)^2 \right)} = 215,2 \text{ MPa} \quad (3.1)$$

$$\delta = \frac{VL^3}{3EI} = \frac{45760 \times 100^3}{\left(3 \times 205000 \times \left(\pi \times \frac{\left(\frac{19}{2}\right)^4}{4}\right)\right)} = 11,6 \text{ mm} \quad (3.2)$$

3.5.2.

Ensaio de cisalhamento direto com conectores da Série S2014

Após a execução dos ensaios principais, foi também realizada para complementar os ensaios produzidos com os conectores, os ensaios com esses elementos que permaneceram intactos durante a realização dos rompimentos dos testes, devido a configuração de aplicação de carga. Dessa forma, seria possível comparar os resultados com os de solda com perna pré-definida e avaliar se os problemas com as soldas dos ensaios principais, indicados como causa da falha, realmente ocorreram. Uma pequena modificação da estrutura foi realizada, para agilizar a montagem.

Os perfis e seus respectivos conectores foram aproveitados dos ensaios PO.11, PO.12 e PO.22.

A configuração de aplicação de carga para a série realizada nos perfis dos ensaios principais foi a mesma apresentada para o realizado com soldas de perna conhecida. A diferença do arranjo consiste na união dos perfis, que foram soldados diretamente um ao outro, configurando três perfis unidos, porém, com a análise individual de cada conector. Para cada perfil foram realizados ao todo quatro ensaios. Essa configuração é apresentada na Figura 3.76 (a).

A estrutura de aplicação de carga foi a mesma desenvolvida para os demais ensaios com solda, e a forma de execução também seguiu o mesmo processo. A Figura 3.76 (b) apresenta a configuração montado do ensaio, antes de sua execução.

Este capítulo apresentou os detalhes dos ensaios experimentais, as configurações e a forma de execução dos ensaios. Também foram apresentados os testes para o estudo da solda, a primeira execução com as pernas de solda pré-determinadas, e o segundo, com os conectores executados para a Série S2014, de forma a confirmar as pernas que foram executadas e verificar se as mesmas resistiriam as solicitações previstos. No próximo capítulo, serão apresentados os resultados obtidos para os ensaios desenvolvidos.



(a) Preparação



(b) Montagem final

Figura 3.76 – Montagem dos ensaios com os perfis utilizados nas Série S2014.