

5

Análise Experimental

Neste capítulo é feita a descrição das características dos ensaios tipo pull-out's desenvolvidos, e também o detalhamento de sua fabricação e montagem. Para cada tipo de ensaio é apresentado o sistema de aplicação de carga, instrumentação e comentários a respeito dos detalhes.

5.1

Descrição dos Ensaios

Os pré-ensaios mostrados a seguir tiveram por objetivo testar e definir os ensaios principais e também contribuir para a definição da quantidade e da qualidade de resultados. Estes ensaios podem ser identificados pelos nomes de PO 0.1 e PO 0.2.



Figura 5.1 – Forma metálica

Os ensaios nesta fase preparatória utilizaram formas metálicas, Figura 5.1, para reaproveitamento e posterior agilidade na montagem da próxima série de ensaios planejados.

A instrumentação destes pré-ensaios foi planejada para obter dados de toda a estrutura. Instrumentaram-se o concreto e as barras de armadura de modo a medir as deformações ocorridas.

Um sistema de vigas metálicas foi criado para prender o ensaio na laje de reação, de forma que as barras de armadura fossem tracionadas pela aplicação de carga através de um atuador hidráulico, Figura 5.2.



Figura 5.2 – Sistema de travamento com vigas metálicas

Os ensaios experimentais tinham início sempre a partir de um sistema de carregamento e descarregamento de modo a romper a resistência química inicial entre o aço e o concreto. O ensaio era levado até a ruptura que ocorreu devido a algum dos modos de colapso estudados. Entre os modos de colapso, podem ser citados a ruptura da barra de armadura, ruptura da ancoragem ligando a barra de armadura da laje de concreto, ruptura do conector por cisalhamento ou flexão, ruptura da laje de concreto pelo excesso de fissuras ou pela compressão exercida na região dos conectores.

O concreto dos pré-ensaios foi preparado manualmente no próprio laboratório, através de betoneira. Para a determinação das quantidades dos

elementos que compõem o concreto foi realizado um estudo de dosagem experimental, determinando a melhor composição que se adaptaria aos elementos a serem estudados.

Os extensômetros foram posicionados nas barras de armadura, em pontos específicos, onde são realizados alguns desgastes nas barras de modo a preparar uma superfície adequadamente plana para que fossem colados de maneira correta, Figura 5.3.



Figura 5.3 – Posicionamento dos extensômetros

5.1.1

Pré-Ensaio

O ensaio inicial, chamado de PO 0.1, teve por objetivo obter os primeiros dados de resposta da estrutura, buscando calibrar os valores das cargas aplicadas, e o modo de colapso da barra de armadura. Seu principal objetivo foi preparar uma estrutura de ensaio que resistisse às solicitações de modo a apresentar resultados confiáveis, sem comprometer à segurança. Inicialmente foram necessárias inúmeras tentativas para realizar um ensaio completo até a ruptura, pois ocorreram falhas na seção dos furos onde seria fixado o sistema de vigas. Ocorreu com isso um sub-dimensionamento das vigas devido ao aumento do comprimento entre apoios que compuseram o sistema de travamento dos

pull-out's, e também nas arruelas de travamento que foram deformadas devido a cargas excessivas, muito antes do colapso das barras do ensaio.

No segundo ensaio, nomeado como PO 0.2, não ocorreram problemas na estrutura de travamento, de forma que foram realizados todos os procedimentos necessários para iniciar e finalizar com o carregamento atingindo o colapso, ocorrendo somente um colapso diferente do modo previsto. O modo previsto era inicialmente o rompimento da barra da armadura, e na verdade ocorreu a ruptura do conector por cisalhamento.

5.1.1.1

Breve Descrição dos Pré-Ensaio

Os pré-ensaios foram compostos por vigas metálicas W 410x46, fornecidos pela empresa METALFENAS, juntamente com as peças que compuseram a forma metálica em chapa dobrada e também as barras redondas, e os perfis U de travamento da estrutura, também a soldagem dos conectores de cisalhamento. As barras de armadura foram fornecidas pela GERDAU, de modo que os cortes e dobras foram realizadas no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM). O concreto foi em betoneira, no próprio laboratório, Figura 5.4.



Figura 5.4 – Material para montagem das estruturas pull-out

5.1.1.2

Caracterização dos Materiais

Nesta seção serão apresentadas as características dos materiais utilizados nestes pré-ensaios, desde suas propriedades mecânicas até as geométricas.

O concreto, como já foi comentado anteriormente, foi produzido em laboratório, e seu traço foi gerado a partir de um estudo de dosagem experimental onde foram confeccionados 32 corpos de prova cilíndricos, com medidas de 35 cm de altura e 15 cm de diâmetro. A dosagem experimental objetiva uma resistência de concreto de 30 MPa. A resistência final obtida pela ruptura dos corpos de prova gerados foi de 28 MPa aos 28 dias, Figura 5.5.



Figura 5.5 – Dosagem Experimental

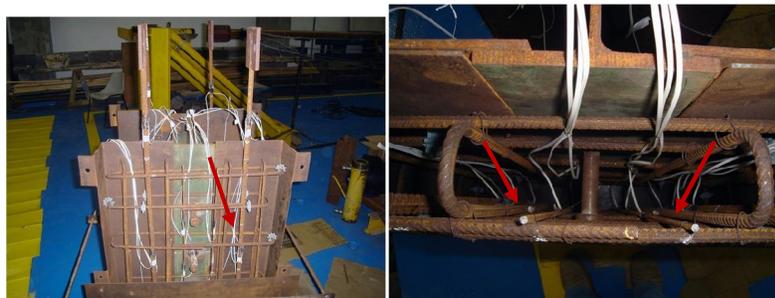


Figura 5.6 – Armadura de 5 mm

A armadura foi dividida em três diferentes tipos, cada tipo com sua respectiva função. O primeiro tipo de armadura teve a função de medir a deformação do concreto, através da colocação de extensômetros ao longo do seu comprimento, com os extensômetros posicionados próximos a linha dos conectores de cisalhamento. Neste ponto usou-se uma hipótese que esta região, que iria cruzar a linha de fissuras na laje de concreto, teria uma deformação nesta barra de diâmetro igual a 5 mm, semelhante a deformação do concreto na sua vizinhança. **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

O segundo tipo de armadura foram os estribos, no qual seguiu-se as recomendações do EC4 [4]. Estas barras tinham o objetivo de controlar a fissuração da laje, e foram dispostas nas direções longitudinais e transversais distribuídas ao longo do comprimento da laje, Figura 5.7.



Figura 5.7 – Armadura dos estribos

O último tipo de armadura foi composto por um diâmetro de 16 mm, e teve por objetivo a aplicação do esforço de tração à laje de concreto. Ela foi fixada na outra extremidade por placas de aço, Figura 5.8, através de um corte nesta placa, onde encaixa-se a barra de armadura, local onde a mesma foi soldada. As armaduras foram posicionadas próximas ao ponto correspondente a um terço da largura da laje. Um par de extensômetros foi colocado em cada ponto onde deseja-se medir estas deformações. Outro par de extensômetros foi posicionado em cada barra externamente a laje de concreto e os restantes nas proximidades dos intervalos entre os conectores de cisalhamento, Figura 5.8.



Figura 5.8 – Armadura Principal

A viga deste ensaio foi cosntituída pelo perfil W410x46,1 da AÇOMINAS de aço tipo ASTM A-572, com dimensões 410x140x6,7x11,2, sendo altura, largura da mesa, espessura da alma e espessura da mesa, respectivamente. O comprimento deste perfil foi de 1000 mm, Figura 5.10.



Figura 5.9 – Perfil Metálico Principal

Neste ensaio usou-se também perfis de travamento longitudinal da estrutura composto pelos perfis U6"x12,5 laminados em aço tipo ASTM A-36, sendo considerados perfis de travamento do primeiro nível, Figura 5.10.



Figura 5.10 – Perfil de Travamento do Primeiro Nível

Para o travamento transversal, também chamado de perfil de travamento do segundo nível, Figura 5.11, foram utilizados perfis I3"x10 em aço tipo ASTM A-36.

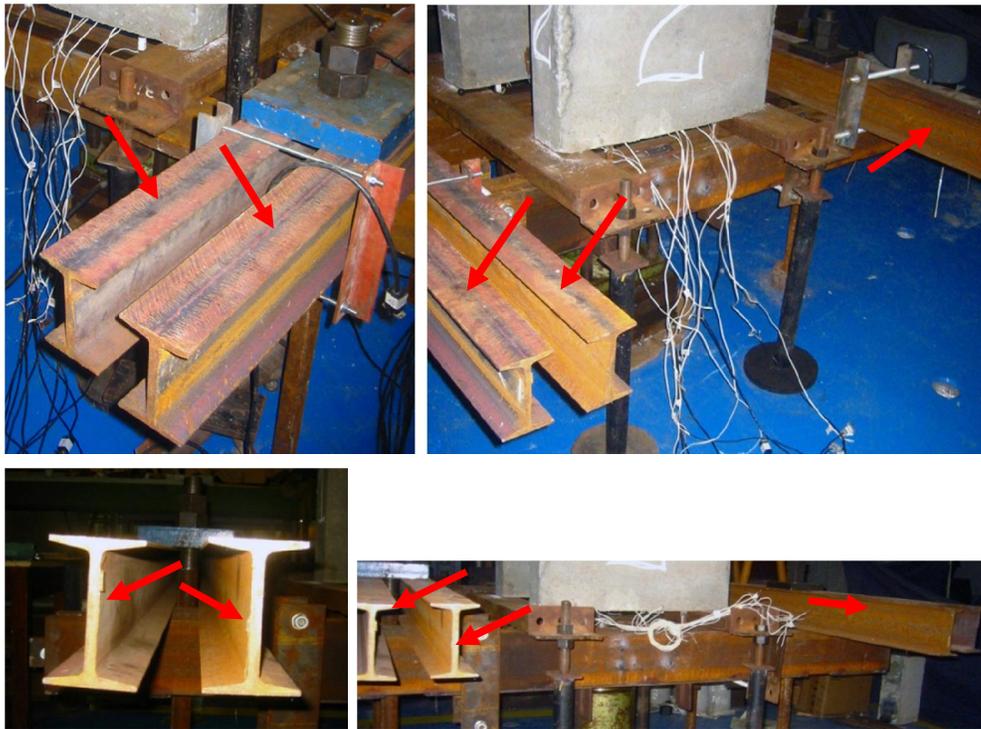


Figura 5.11 – Perfil de Travamento do Segundo Nível

Alguns problemas ocorreram devido ao sub-dimensionamento dos perfis de primeiro nível e foi necessário unir dois perfis U, formando um tubo para obter uma seção resistente o suficiente para resistir às solicitações do ensaio e evitando que a estrutura se deformasse excessivamente.

Os conectores de cisalhamento, Figura 5.12, soldados na mesa do perfil metálico possuíam a função de impedir o deslizamento da laje de concreto em

relação ao perfil metálico, utilizando no ensaio de pull-out PO 0.1, três conectores e no pull-out PO 0.2, dois conectores. O diâmetro destes conectores foi de 19,1mm, com comprimento de 125mm, 5,0mm maiores do que a espessura da laje de modo que foi necessário reduzi-los 2,5mm para que coubessem corretamente e permanecesse uma folga recomendada que deveria ser maior que 2 mm.



Figura 5.12 – Conectores de Cisalhamento

5.1.1.3

Montagem da Estrutura de Travamento do Pré-Ensaio

A montagem da estrutura de travamento dos pull-out's iniciou-se com o posicionamento das mesas, Figura 5.13, onde será apoiado o pull-out para a realização do ensaio, entre os furos da laje de reação onde serão presas as barras redondas que farão o travamento.



Figura 5.13 – Mesinhas de apoio dos pull-out's

Entre as duas mesas foi posicionado o atuador hidráulico, Figura 5.13, sobre placas de aço alinhadas de modo que o curso do atuador tivesse comprimento suficiente para levar o ensaio até o final, sem que fosse preciso

interrompê-lo para reposicionar a estrutura em busca de maior comprimento de curso do atuador.

Após o posicionamento do atuador hidráulico foram colocadas cada uma das barras redondas, suas porcas e arruelas nos furos da laje de reação, que foram utilizados para fixar a estrutura, Figura 5.14.



Figura 5.14 – Barras redondas posicionadas nos furos

Sobre a mesa foram colocados pedaços de neoprene para proteger os pontos de apoio da laje do ensaio de modo a impedir que ocorresse qualquer dano na estrutura de concreto do pull-out ou nos fios da instrumentação, Figura 5.15.



Figura 5.15 – Pontos de apoio em neoprene

Com uma talha manual (girafa), o pull-out foi deslocado da sua posição invertida (concretagem) para a posição de ensaio, onde foi apoiado sobre as

mesas apoiando-se as bordas da laje de concreto sobre os apoios de neoprene, Figura 5.15.

O ensaio ficou alinhado com a cabeça do atuador hidráulico, para que a aplicação da força fosse exatamente ao centro da alma do perfil metálico, ocorrendo uma distribuição equilibrada sobre a estrutura. Para tentar corrigir imperfeições de posicionamento desta aplicação de força, foi usada uma placa retangular com um chanfro ao longo da alma do perfil para gerar uma melhor distribuição da força, aumentando a rigidez de modo a impedir que ocorresse a flambagem local da alma do perfil principal, Figura 5.16.



Figura 5.16 – Placa de distribuição de tensões

Em seguida foram posicionadas as vigas de travamento sobre as placas soldadas nas barras de armadura, Figura 5.17.



Figura 5.17 – Placas de apoio dos perfil de travamento

As vigas de travamento foram colocadas em cada uma das bordas das placas de apoio, sendo fixadas através de travamentos compostos por duas placas e barras rosqueadas.



Figura 5.18 – Estrutura de fixação e travamento dos perfis

Após a colocação e fixação do primeiro nível de vigas, Figura 5.18, iniciou-se a colocação do segundo nível de vigas de travamento, Figura 5.19, as quais foram apoiadas sobre o primeiro nível. O segundo nível de vigas foi composto por quatro perfis I 3 "x10, que foram posicionados a cada dois perfis nas extremidades das vigas do primeiro nível. Travamentos como os dos perfis do primeiro nível foram utilizados para garantir a união destes dois perfis.



Figura 5.19 – Perfis de travamento do segundo nível

A parte final da montagem da estrutura do ensaio foi realizada com a subida das barras redondas, sendo travada entre os perfis do segundo nível através de porcas e arruelas, Figura 5.20.



Figura 5.20 – Estrutura de travamento e pull-out prontos para a execução do teste.

5.1.1.4

Configuração dos Ensaios Pull-out

Nesta seção será apresentada a geometria de cada uma das partes que compõe as duas estruturas do pull-out dos pré-ensaios.

5.1.1.4.1.

Geometria

Os dois pré-ensaios PO 0.1 e PO 0.2 utilizaram o mesmo perfil metálico principal, Açominas, W410x46,1, de aço tipo ASTM A-572 Gr. 50, de dimensões apresentadas na Figura 5.21.

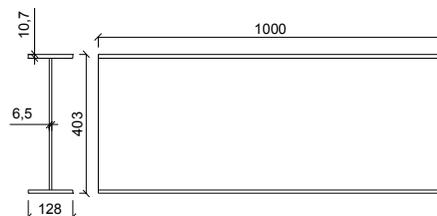


Figura 5.21 – Geometria dos perfis metálicos principais

O primeiro nível de travamento foi realizado pelo perfil U6"x12,5 duplo, posicionado boca a boca, em formato tubular, Figura 5.22. As dimensões destes perfil estão descritas na figura abaixo.

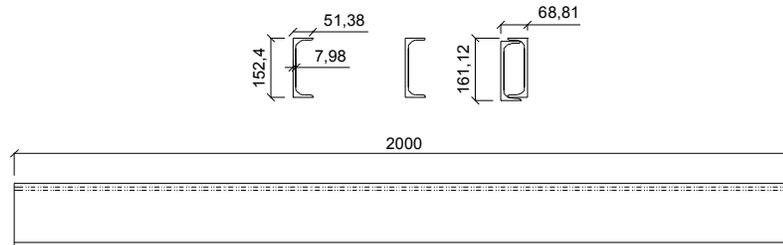


Figura 5.22 – Perfil metálico de travamento do primeiro nível

O segundo nível de travamentos foi composto por perfis I3"x8, unidos lado a lado, separados pela barra redonda que passa entre eles. Estes tem a função de resistir às solicitações que a barra redonda os impõe por ser travada neste ponto.

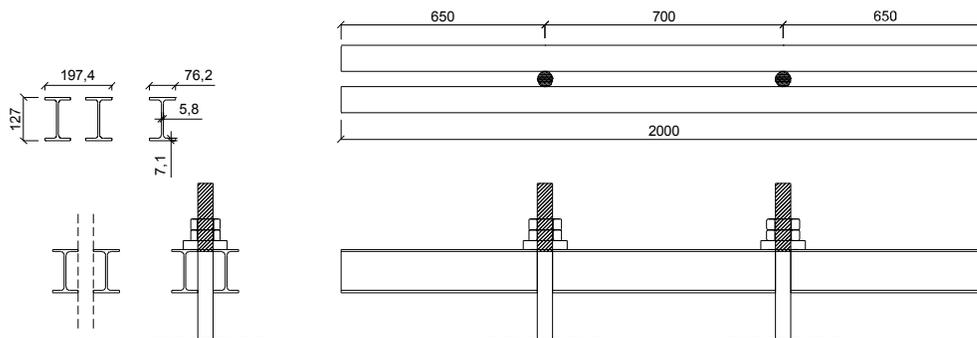


Figura 5.23 – Perfil metálico de travamento do segundo nível

“As barras redondas representadas abaixo, fixam a estrutura na laje de reação, possuindo um diâmetro igual a $1\frac{3}{4}$ ” (44,45mm), Figura 5.24, possuindo quatro porcas, duas em cada extremidade.

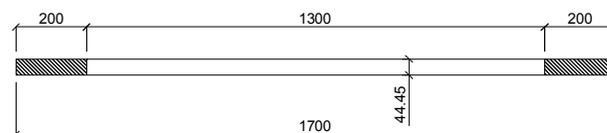


Figura 5.24 – Barra redonda

Os conectores de cisalhamento são do tipo pino com cabeça, com cabeça e altura de 100mm e diâmetro ϕ 19,1mm. Suas dimensões também são apresentadas na Figura 5.25. O pré-ensaio PO 0.1 utilizou três conectores de cisalhamento, posicionados no centro da largura da mesa e longitudinalmente espaçados de 250,0mm da extremidade até o primeiro conector e entre conectores distanciados de 200mm. O pré-ensaio PO 0.2, usou dois conectores de cisalhamento soldados em cada uma das mesas, espaçados da extremidade do perfil da viga 250mm e 200mm entre os mesmos.

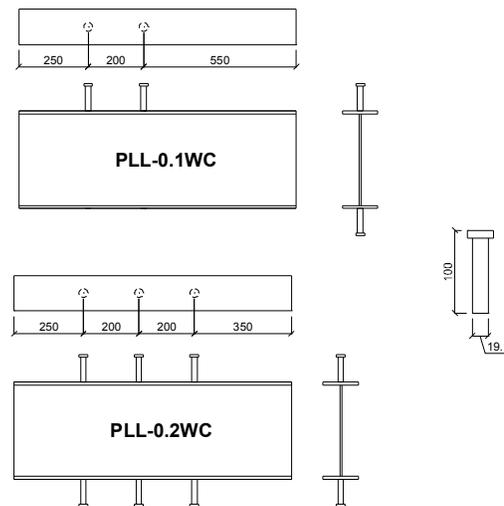


Figura 5.25 – Posicionamento dos conectores de cisalhamento

A laje de concreto foi composta por duas partes iguais, de dimensões 120x600x1000mm, Figura 5.26, sendo cada parte ligada a uma das mesas da viga de aço.

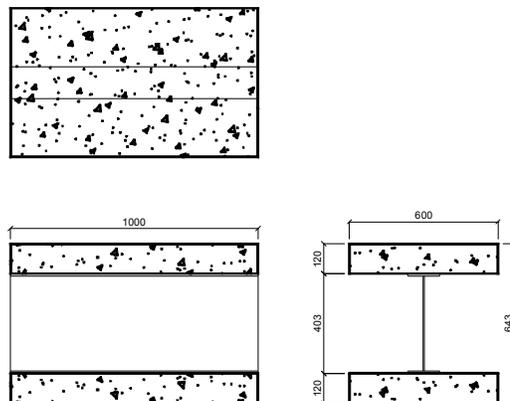


Figura 5.26 – Lajes de concreto

Para a armadura principal dos pull-out's utilizou-se o mesmo comprimento de 650,0mm de ancoragem e comprimento total de 1050,0mm, Figura 5.27, sendo que cada laje contém duas barras. As armaduras dos estribos foram compostas por armadura longitudinal e transversal. A armadura longitudinal posicionada na maior dimensão da laje, paralela a viga metálica medem 960,0mm, com um diâmetro igual a 10,0mm, possuindo 4 estribos distribuídos proporcionalmente em cada laje. A armadura transversal posicionada transversalmente a viga de aço possuiu comprimento de 560,0mm e um diâmetro de 10,0mm, totalizando seis estribos em cada uma das lajes.

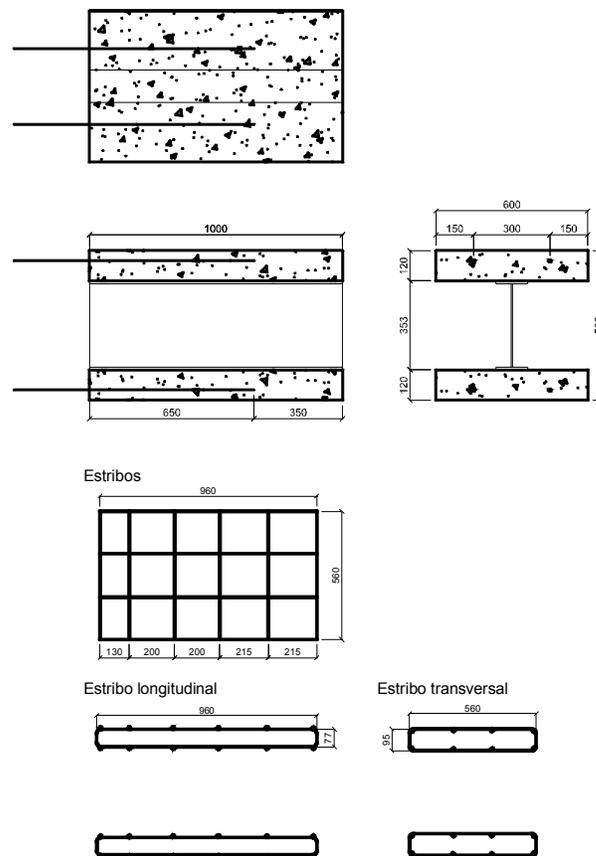


Figura 5.27 – Armaduras

5.1.1.4.2.

Concretagem.

Para obter um concreto de resistência confiável foi realizado um estudo sobre seus elementos através de uma dosagem experimental, cujo objetivo era

determinar um traço que possuísse os parâmetros exigidos por um concreto de resistência característica, f_{ck} , igual a 30,0MPa.

Foi realizado o método preconizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, o qual é bastante simples e eficiente.

5.1.1.4.3.

Instrumentação

A instrumentação para aferição do comportamento individual das partes que constituem os ensaios utilizada extensômetros elétricos, para a medição das deformações nas barras das armaduras em diversos pontos, LVDT's para a medição dos deslocamentos, e transdutor de pressão para aferição da carga aplicada no pull-out.

Os extensômetros foram exclusivamente utilizados para medir as deformações nas barras de armadura. As armaduras principais, responsáveis pela resistência a ancoragem e tração foram instrumentadas de acordo com a Figura 5.28.



Figura 5.28 – Extensômetros nas armaduras principais dos pull-out's

Uma série de extensômetros, dois a cada ponto da barra, colados na parte externa ao concreto, mediram deformações sem a influência do concreto e outros dois pares posicionados internamente, mediram as deformações com relação ao conjunto aço-concreto sob tração. Um par de extensômetros foi posicionado bem próximo da laje de concreto, pressupondo-se ser o ponto externo com maior nível de tensão na barra. Os pares internos foram posicionados de forma a obter o comportamento nas barras na região entre os conectores de cisalhamento, pois, supõe-se que esta seria a região de menor

fissuração, portanto de maior tensão na barra e concreto tracionados, Figura 5.29.

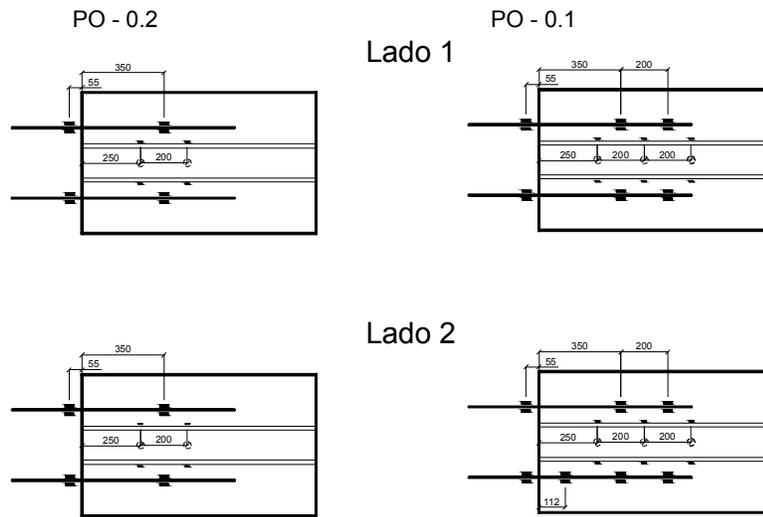


Figura 5.29 – Extensômetros nas armaduras principais

Outros extensômetros colados em barras de armadura de diâmetro igual a 5,0mm, tiveram o objetivo de medir as aberturas ou fissuras que iriam ocorrer no concreto. Eles foram posicionados na linha dos conectores de cisalhamento, Figura 5.30, ou seja a região onde primeiro ocorrerão as fissuras.

Os estribos não foram instrumentados por não apresentarem influência significativa no comportamento da estrutura.

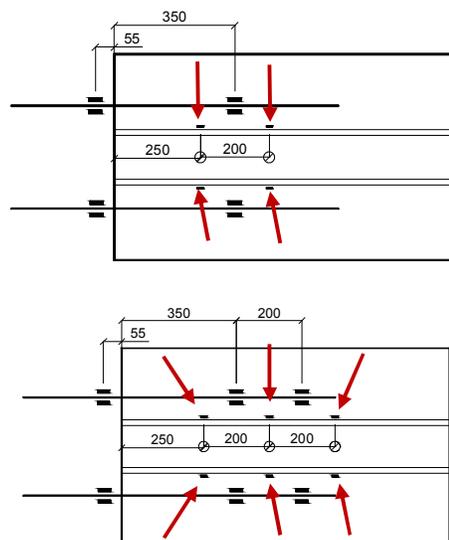


Figura 5.30 – Extensômetros nas armaduras de 5mm

Foi necessária a utilização de um transdutor de pressão para a centralização da célula de carga, que nos testes iniciais deslizava à medida que a aplicação de carga atingia uma força considerável. Entretanto, o transdutor de pressão foi perfeitamente calibrado e não houve problemas com seu uso.

Os LVDT's, Figura 5.31 foram posicionados em vários locais de modo a obter um estudo das melhores e mais significativas leituras de deslocamento.



Figura 5.31 – Posicionamento dos LVDT's

O posicionamento dos LVDT's foi feito de modo que qualquer movimento pudesse ser detectado. Na Figura 5.32, podem ser observadas as posições onde os LVDT's adotados foram colocados.

A Figura 5.32, mostra o posicionamento de cada grupo de LVDT's. Os LVDT's 1 e 2, posicionados na parte inferior do ensaio e mediram o deslocamento relativo entre perfil metálico e lajes de concreto. Em todo perímetro horizontal do pull-out, os LVDT's 3, 4, 5 e 6 mediram os deslocamentos laterais, de forma a identificar algum desequilíbrio da estrutura para qualquer direção no plano horizontal. Os LVDT's superiores 7, 8, 9 e 10 mediram deslocamentos verticais do pull-out, onde os de número 7 e 8

realizaram as medições relativas entre aço e concreto. Os LVDT's 1 e 2, no outro extremo do pull-out, identificariam um possível comportamento diferenciando entre as duas extremidades. Finalmente os LVDT's 9 e 10 acompanharam o deslocamento do ensaio em relação ao solo, e foram posicionados nas extremidades das lajes de concreto, verificando também qualquer desequilíbrio da estrutura.

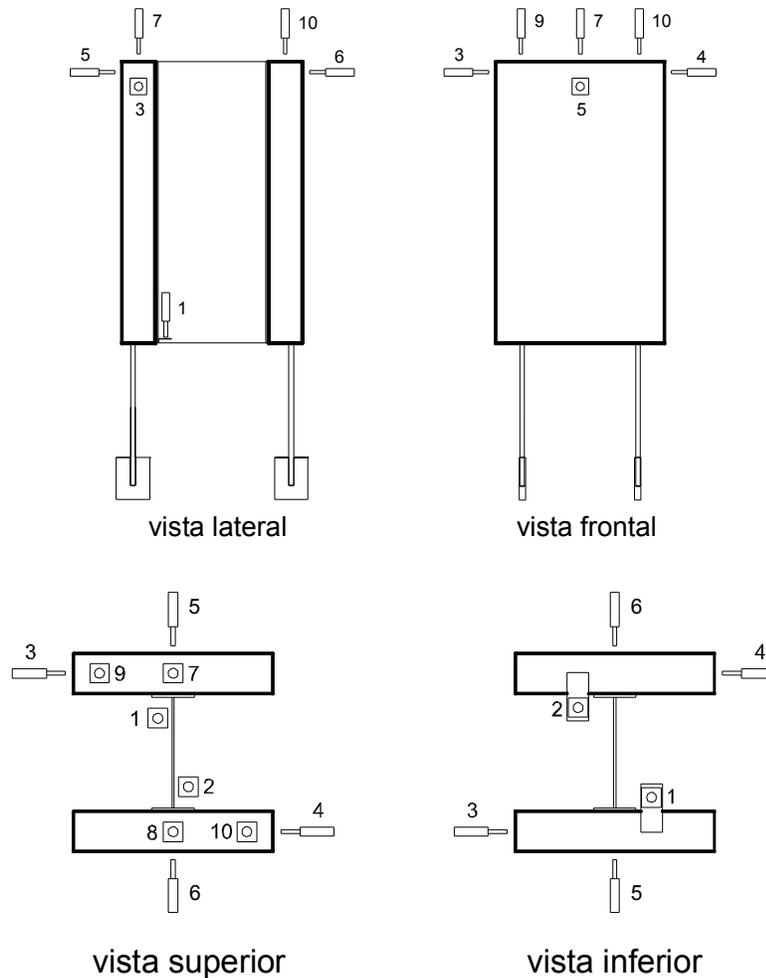


Figura 5.32 – Locação e identificação dos LVDT's

5.1.1.4.4.

Montagem do Pull-out

A montagem dos ensaios foi iniciada com o perfil metálico na posição vertical, Figura 5.33.



Figura 5.33 – Posicionamento do Perfil Metálico

Em seguida deve existir a preparação dos estribos longitudinais entrelaçados com os transversais, formando um tipo de gaiola. A armadura principal e os arames que medem a tração devem ser fixados internamente a esta gaiola, Figura 5.34.



Figura 5.34 – Montagem das armaduras

O próximo passo foi encaixar a primeira parte da forma metálica no perfil, em cada um dos lados do pull-out, lubrificando completamente a superfície interna para facilitar a retirada da forma. Toda a gaiola, em conjunto com as armaduras principais, foi colocada dentro da forma já posicionada na viga metálica, deixando o ensaio em uma posição invertida com relação a sua posição final, Figura **5.35**.

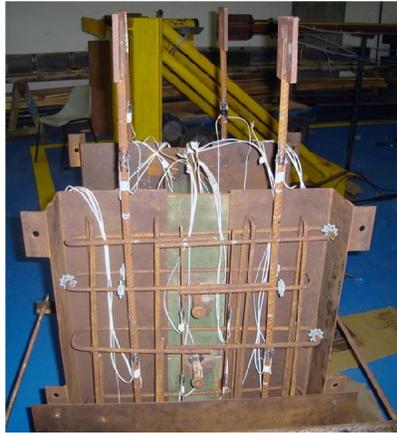


Figura 5.35 – Posicionamento de Concretagem do Pull-out

Neste ponto completa-se o fechamento da forma metálica na parte inferior para facilitar a primeira fase da concretagem, Figura 5.35, evitando-se problemas de lançamento do concreto.

Após a concretagem da primeira fase, fecha-se a segunda porção da forma com a segunda e última parte da chapa metálica na concretagem.

Desta forma finaliza-se a montagem do ensaio, restando somente aguardar a cura do concreto, dentro do planejamento, e após, realizar a retirada da forma, posicionando o pull-out sobre a mesa de apoio, como apresentado na Figura 5.36.



Figura 5.36 – Posicionamento do Pull-out Sobre a Mesa

5.1.1.4.5.

Previsão dos Resultados

Uma previsão para os resultados foi obtida através dos dados oriundos da configuração de cada ensaio, avaliando as resistências da armadura e ancoragem, dos conectores e da laje de concreto.

Na parte inicial da previsão apresentam-se os modos de ruptura, que são associados a ruptura da armadura principal por tração, ruptura dos conectores de cisalhamento, arrancamento da armadura pela ruptura da ancoragem e ruptura do concreto devido a compressão exercida pelos conectores.

Para o ensaio PO 0.1, é apresentada na Tabela **5.1** a previsão inicial dos resultados.

Tabela 5.1 – Planilha de Previsão dos Resultados do PO 0.1

Pull-Out modelo	Pull-Out Resistência Prevista			Modo de Ruptura
	Ancoragem [kN]	Barra [kN]	Conector [kN]	
PLL-0.1WC	569,40	402,12	713,44	ruptura na barra

Pull-Out modelo	Pull-Out Ruptura			Modo de Ruptura
	Ancoragem [kN]	Barra [kN]	Conector [kN]	
PLL-0.1WC	-	535,00	-	ruptura na barra

Como é observado na Tabela 5.1, o modo de ruptura do pull-out PO 0.1 foi a ruptura da barra de armadura com uma carga aplicada de 402,0kN, sendo seguida pela ruptura da ancoragem com 569,4kN, não ultrapassando a capacidade de aplicação da carga do atuador hidráulico que era de 1000,0kN.

A previsão de ruptura do ensaio PO 0.2 é apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Planilha de Previsão dos Resultados do PO 0.2

Pull-Out modelo	Pull-Out Resistência Prevista			Modo de Ruptura
	Ancoragem [kN]	Barra [kN]	Conector [kN]	
PLL-0.2WC	569,40	402,12	475,63	ruptura na barra

Pull-Out modelo	Pull-Out Ruptura			Modo de Ruptura
	Ancoragem [kN]	Barra [kN]	Conector [kN]	
PLL-0.2WC	-	-	473,00	ruptura no conector

O ensaio PO 0.2, diferente do ensaio PO 0.1 possui um conector de cisalhamento a menos em cada uma das mesas da viga, Figura 5.25. Desta forma, o ensaio PO 0.2 possuiu uma previsão de ruptura também na barra de armadura com 402,0kN seguido pela resistência dos conectores com 475,6kN.

5.1.1.4.6.

Descrição dos Pré-Ensaios

O ensaio PO 0.1, Figura 5.37, iniciou-se com uma série de pré-ensaios que serviram para obter resultados preliminares e principalmente, preparar a estrutura de ensaios ou estrutura de travamento resistente e eficiente o suficiente para realizar outros ensaios finais, também chamados de definitivos.

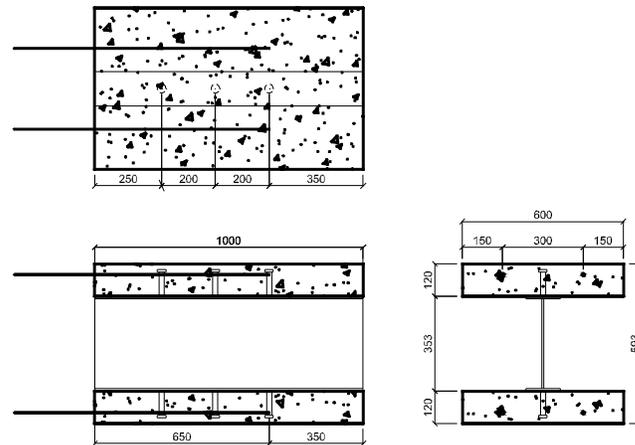


Figura 5.37 –Pull-out 0.1

Previamente foi realizado um ensaio de pré-carga na estrutura, buscando alcançar em torno de 20% da sua carga de ruptura, o qual ocorreu sem nenhum problema. No dia seguinte foi realizado o ensaio definitivo do PO 0.1, conforme recomendações do EC4 [4], iniciando com o processo de carregamento e descarregamento, consistindo na aplicação de uma carga de 20% da carga de ruptura prevista seguida de descarregamento, realizando-se este processo 25 vezes. Após esta etapa realizada iniciou-se a aplicação de carga numa velocidade moderada até seu colapso. Sendo assim, o atuador hidráulico logo que ultrapassou os 30% da carga prevista deslocou-se interrompendo o ensaio. O deslocamento do atuador hidráulico ocorreu devido a cabeça do seu curso ser rotulada. Duas outras tentativas foram realizadas e por fim, optou-se pela retirada deste elemento rotulado, Figura 5.38, deixando somente o cursor do atuador hidráulico fixo, por medida de segurança.



Figura 5.38 –Atuador Hidráulico Sem a Cabeça Rotulada

Iniciou-se outra tentativa de ensaio, agora com a cabeça do cursor do atuador fixo, sem haver possibilidade de escorregamento. No entanto, quando se alcançou 65% da carga de ruptura prevista, os perfis de travamento do primeiro nível começaram a flambar, independentes dos travamentos colocados ao longo do seu comprimento. Esta flambagem ocorreu devido ao aumento do vão do travamento que dobrou de tamanho, tornando os perfis subdimensionados, levando-os a falhar por flambagem.



Figura 5.39 – Flambagem dos Perfis de Travamento do Primeiro Nível

Deste modo, para que não ocorresse mais este tipo de comportamento foi necessário reforçar os perfis de travamento. Optou-se por perfis U simples, tornando-os compostos, acrescentando-se outro perfil, soldados boca a boca, em todo seu comprimento, garantindo a solidarização, Figura 5.40.

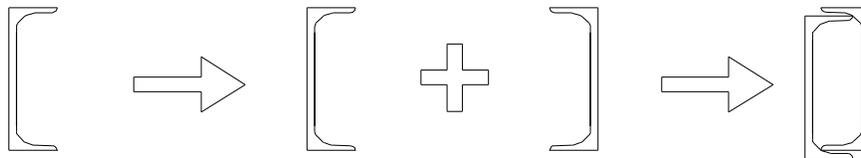
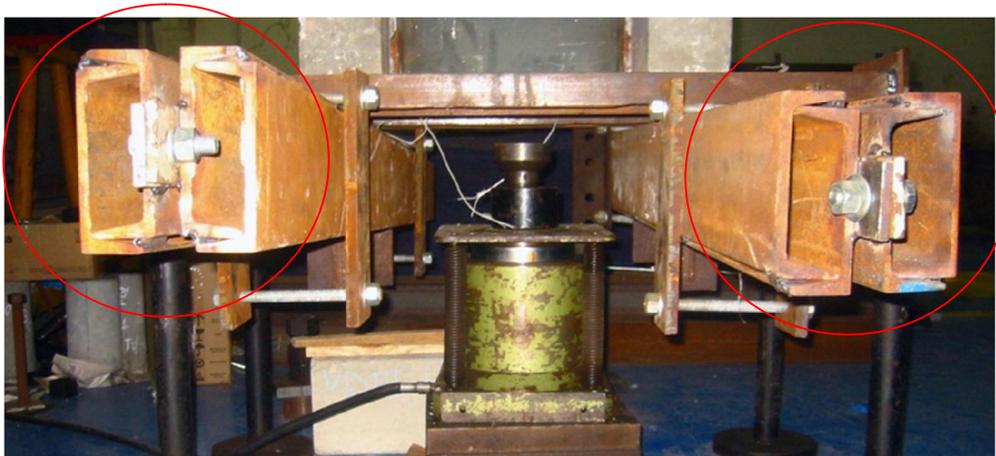


Figura 5.40 – Perfil de Travamento Composto

Tornando o perfil composto e tubular, obteve nesta situação mais do que o dobro da resistência do que o perfil simples.

Após o problema da flambagem do perfil de travamento de primeiro nível ser solucionado, foi notado um amassamento das mesas o perfil I de travamento do segundo nível, onde são apoiadas as barras redondas, Figura 5.41.

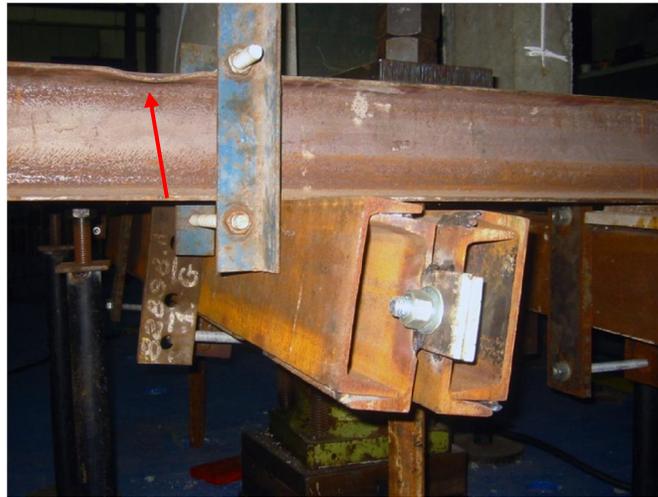
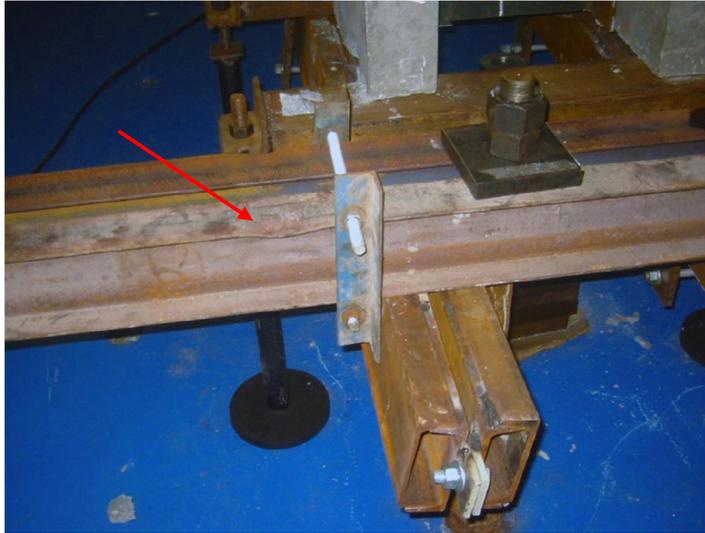


Figura 5.41 – Amassamento das Mesas do Perfil de Travamento

Para resolver este problema optou-se pela colocação de um tipo de arruela para distribuição da carga exercida pela porca. A arruela foi confeccionada a partir dos perfis U que foram inutilizados pela ocorrência da flambagem, Figura 5.42.



Figura 5.42 – Arruela Para Distribuição das Solicitações

Com estes perfis de travamentos reforçados e uma arruela, novamente iniciou-se o ensaio, onde o acompanhamento e observação do comportamento da estrutura foram constantes, até que se notou o afundamento da arruela utilizada, com isso o ensaio foi interrompido novamente. A alma do perfil U utilizado como arruela era muito fina, não resistindo ao esforço solicitado, Figura 5.43. Sendo assim adotou-se o uso de chapas de espessura de 25,4mm, Figura 5.44, que resolveram os possíveis problemas de deformação para esforços desta magnitude.



Figura 5.43 – Arruelas com Afundamento



Figura 5.44 – Arruelas de 25,4mm

A partir deste ponto não ocorreram mais problemas, sendo o ensaio realizado até o final com a ruptura da barra da armadura principal com uma carga aplicada de 513,0kN, com as modificações adotadas toda estrutura de travamento teve desempenho adequado, Figura 5.45.



Figura 5.45 – Ruptura do Pull-out PO 0.1

O ensaio PO 0.2, Figura 5.46, ocorreu normalmente como previsto, desde o início com a aplicação do carregamento e descarregamento até o colapso.

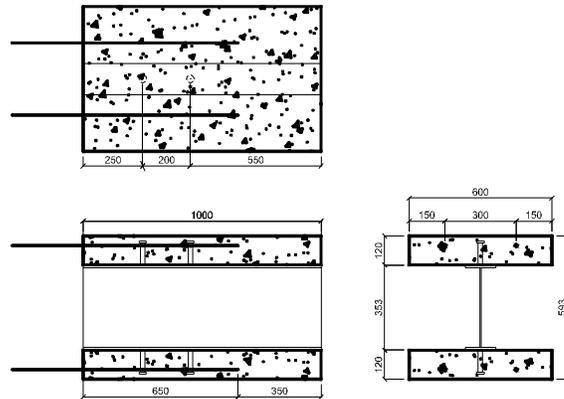


Figura 5.46 – Pull-out PO 0.2

Foram mantidos todos os instrumentos de leitura do ensaio inicial de forma a obter um parâmetro para avaliar a validade das leituras obtidas.

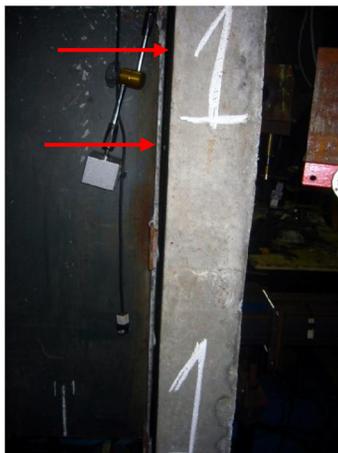
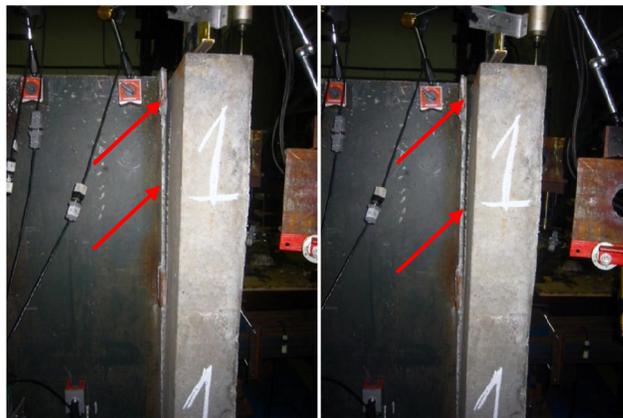


Figura 5.47 – Ruptura do Pull-out PO 0.2

O ensaio PO 0.2 é diferenciado do PO 0.1, pois somente dois conectores de cisalhamento em cada mesa da viga são usados enquanto o PO 0.1 possui três em cada mesa. A previsão de ruptura também é igual ao PO 0.1, rompendo a barra da armadura com uma força aplicada de 402,0kN, porém sua ruptura ocorreu no conector de cisalhamento com uma carga de 473,0kN, Figura 5.47.

5.1.2

Ensaio

Os ensaios realizados após os pré-ensaios foram definidos como definitivos, de modo que foram os ensaios que contribuirão definitivamente para análise de resultados e não para calibração e teste da estrutura.

Compostos pelos ensaios de PO11, PO12, PO13, PO21, PO22, PO23, PO71, PO72, PO73, PO81, PO82 e PO83, possuíram dimensões idênticas as dos pré-ensaios, desde as dimensões da laje de concreto, mesma altura do perfil metálico, mesmo comprimento externo das barras de armadura, mesmos diâmetros utilizados, mesma disposição e diâmetro dos estribos e mesma resistência característica do concreto. As diferenciações destes ensaios para os ensaios anteriores, estão na fôrma, já que foram confeccionadas com chapas de compensado naval para as formas, as varetas para medição da deformação não foram empregadas e utilização de um perfil metálico mais compacto, porém mantendo a altura anterior.

Nesta série foram realizadas 4 diferentes configurações de ensaios, para os mesmos pull-out's, sendo representados pelos ensaios de nome PO1X, PO2X, PO7X e PO8X. Cada um dos diferentes ensaios possuía um específico modo de ruptura, sendo que cada uma das quatro séries possui três repetições, totalizando doze ensaios. Dentre estes ensaios realizados, algumas modificações foram executadas buscando controlar problemas construtivos que serão comentados nos itens a seguir.

5.1.2.1

Breve Descrição dos Ensaio

Nos ensaios definitivos os perfis que unem as lajes de concreto foram modificados, porém manteve-se a altura, utilizando o W 410x60, também fornecido pela METALFENAS, juntamente com as barras de armadura principal e as placas de travamento soldadas em suas extremidades. A estrutura que

compõe todo o travamento foi mantida, uma nova placa de distribuição da força aplicada pelo atuador hidráulico foi utilizada. Os vergalhões utilizados para os estribos foram fornecidos pela GERDAU, sendo que uma parte da dobra foi realizada em laboratório e outra parte realizada pelo fornecedor. O concreto utilizado foi usinado, fornecido pela Holcim.

5.1.2.2

Caracterização dos Materiais

Nesta seção serão apresentadas as características dos materiais utilizados nos ensaios definitivos, diferentes das já utilizadas nos pré-ensaios.

O concreto utilizado foi usinado, devido à grande quantidade de espécimes a serem concretados, Figura 5.48. O fck requerido foi de 30,0MPa, sendo que nos ensaios de ruptura dos corpos de prova deste concreto obteve-se uma média de resistência a compressão de 28,0MPa.



Figura 5.48 – Espécimes a serem concretados

As armaduras utilizadas nestes ensaios foram as mesmas dos pré-ensaios, variando somente seus comprimentos de ancoragem, de acordo com cada modelo e modo de ruptura. No entanto, devido à ineficiência das varetas para medição da deformação do concreto, estas foram dispensadas.

Os perfis metálicos foram todos mantidos nas configurações anteriores, sendo que o perfil principal foi alterado como foi comentado no item anterior.

Os conectores de cisalhamento foram os mesmos utilizados dos pré-ensaios, sendo que a solda foi realizada com equipamento específico de solda para conectores de cisalhamento (caldeamento).

5.1.2.2.1.**Montagem da Estrutura do Ensaio Pull-out**

A montagem da estrutura da segunda etapa dos ensaios foi idêntica a estrutura dos pré-ensaios, já comentado no item 5.1.1.3, desde o posicionamento da estrutura até o material usado para realização dos ensaios. Portanto não existem comentários adicionais a serem acrescentados neste item.

5.1.2.2.2.**Configuração dos Pull-out**

Nesta seção será apresentada a geometria de cada uma das partes que compõem os ensaios de pull-out definitivos.

5.1.2.2.3.**Geometria**

Os doze ensaios PO 11, PO 12, PO 13, PO 21, PO 22, PO 23, PO 71, PO 72, PO 73, PO 81, PO 82 e PO 83 utilizaram o mesmo perfil metálico principal, Açominas, W410x60, de aço tipo ASTM A-572 Gr. 50, de dimensões apresentadas na Figura 5.49.

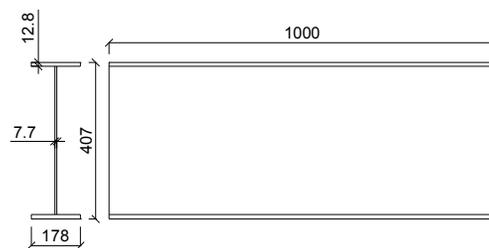


Figura 5.49 – Geometria dos perfis metálicos principais

Os elementos de travamento utilizados foram os mesmos dos pré-ensaios juntamente com o mesmo sistema estrutural de travamento.

A distribuição dos conectores variou de acordo com cada série, sendo utilizadas quatro diferentes distribuições, apresentadas através da Figura 5.50, a Figura 5.53.

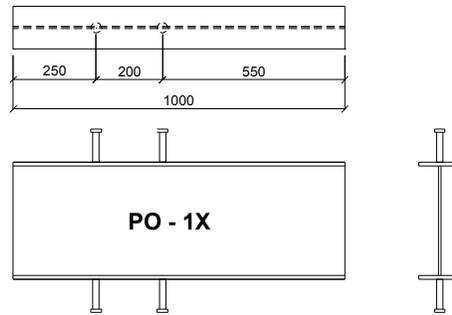


Figura 5.50 – Distribuição dos conectores do PO-11, PO-12 e PO-13

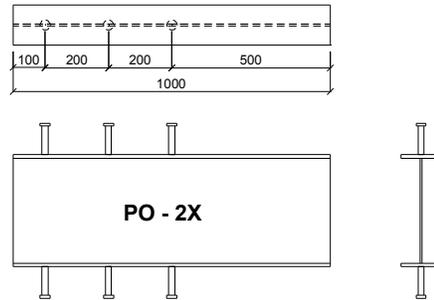


Figura 5.51 – Distribuição dos conectores do PO-21, PO-22 e PO-23

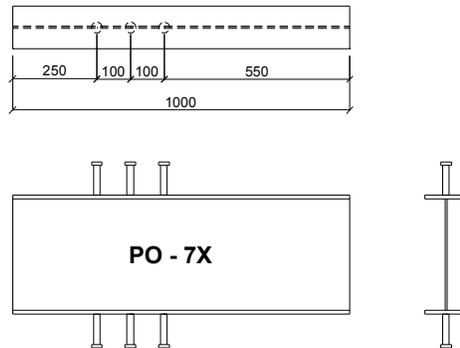


Figura 5.52 – Distribuição dos conectores do PO-71, PO-72 e PO-73

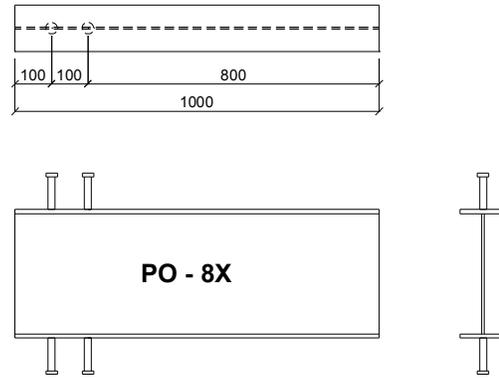


Figura 5.53 – Distribuição dos conectores do PO-81, PO-82 e PO-83

A laje de concreto foi mantida com as mesmas dimensões, no entanto a geometria mista foi alterada devido ao aumento da altura da viga metálica, como pode ser observado na Figura 5.54.

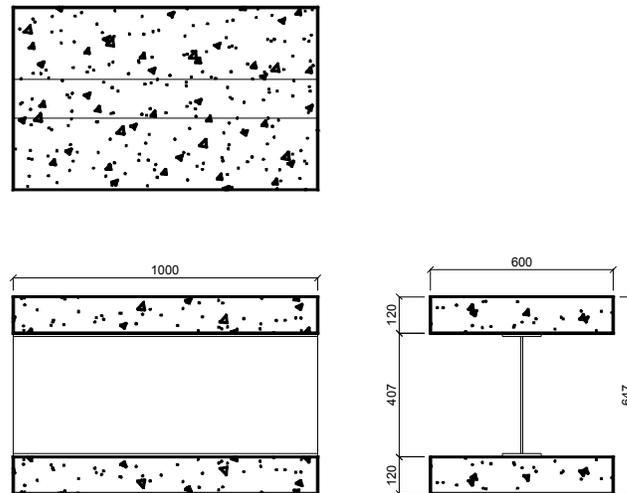


Figura 5.54 – Seção mista da segunda etapa dos ensaios

A armadura dos estribos e sua geometria foi mantida sem alterações com as apresentadas na Figura 5.27. No entanto, em cada série de ensaios variou-se o comprimento das suas armaduras principais, Figura 5.55, de modo a obter-se um respectivo modo de ruptura.

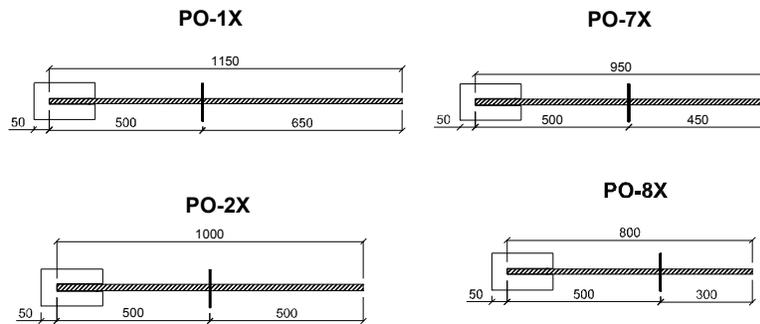


Figura 5.55 – Comprimento das armaduras principais

A série de ensaios PO-1X possui duas barras principais com 1150mm, sendo que 650mm estão embutidos no concreto com diâmetro de 16mm. A série de ensaios PO-2X possui quatro barras principais de diâmetro 20mm e com 1000mm de comprimento, sendo que 500mm estão embutidos no concreto. A série de ensaios PO-7X possui duas barras principais de diâmetro 20mm e com 950mm de comprimento, sendo que 450mm estão embutidos no concreto. A série de ensaios PO-8X possui quatro barras principais de diâmetro 16mm e com 800mm de comprimento, sendo que 300mm estão embutidos no concreto.

5.1.2.2.4.

Concretagem

Diferente dos pré-ensaios, nesta etapa, os ensaios utilizaram concreto usinado, devido a quantidade de formas a serem concretadas, que eram num total de 12, Figura 5.56.



Figura 5.56 – Concretagem dos ensaios

A resistência característica prevista é igual a 30MPa, sendo que na ruptura dos corpos de prova obteve-se uma média em torno de 29MPa, Figura 5.57.



Figura 5.57 – Corpos de prova

5.1.2.2.5.

Instrumentação

A instrumentação utilizada para medição das deformações e deslocamentos foi composta de extensômetros e LVDT's, sendo os mesmos dos pré-ensaios, sendo que alguns posicionamentos diferem entre cada série de ensaios. O sistema de aquisição de dados manteve-se o mesmo, manteve-se também a utilização do transdutor de pressão devido a sua eficiência obtida nos pré-ensaios.

Os extensômetros utilizados nas barras de 5,0mm foram descartados devido a não terem fornecido os resultados ou comportamentos esperados.

Para cada uma das séries de ensaios foram criados diferentes posicionamentos para os extensômetros de acordo com a distribuição dos conectores de cisalhamento.

Nas séries de ensaios PO-1X e PO-8X, Figura 5.58 e Figura 5.59, pode ser observada a utilização de 4 extensômetros por barra, com um par em cada ponto de medição por barra, sendo que um par posicionado na porção externa e outro na interna, mais precisamente entre as duas linhas de conectores de cisalhamento.

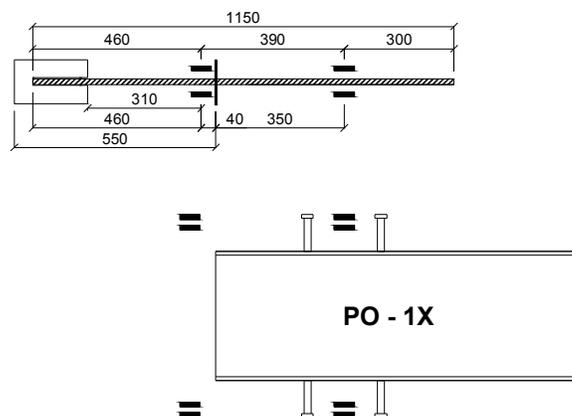


Figura 5.58 – Posicionamentos dos extensômetros na série de ensaios PO 1X

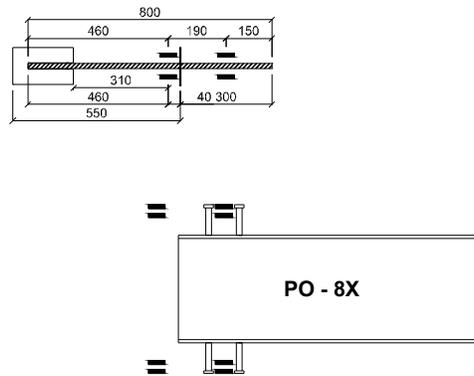


Figura 5.59 – Posicionamentos dos extensômetros na série de ensaios PO 8X

Nas séries de ensaios PO-2X e PO-7X, Figura 5.60 e Figura 5.61, pode ser notado o emprego de 4 extensômetros, com um par em cada ponto de medição por barra, sendo que um par disposto na porção externa e outro na interna, na linha do conector de cisalhamento central.

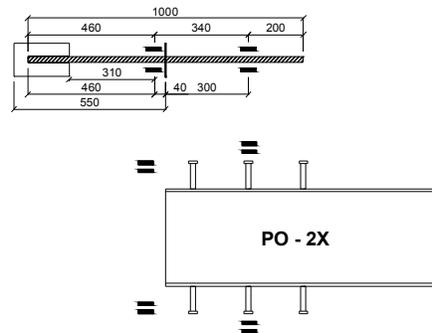


Figura 5.60 – Posicionamentos dos extensômetros na série de ensaios PO 2X

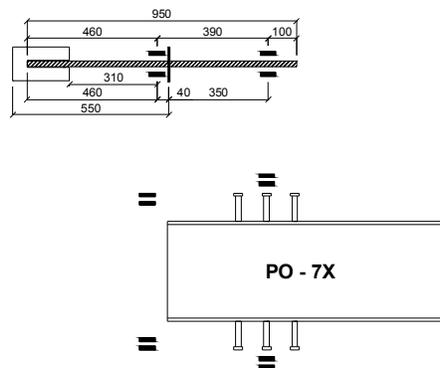


Figura 5.61 – Posicionamentos dos extensômetros na série de ensaios PO 7X

Dois novos posicionamentos de extensômetros internos na laje de concreto foram utilizados visando a obtenção de melhores resultados. As séries de ensaios 1X e 8X, Figura 5.58 e Figura 5.59, posicionam os extensômetros na linha transversal onde os conectores de cisalhamento trabalham, onde ocorrem as prováveis fissuras de maior importância na laje de concreto, e outro posicionamento entre os conectores de cisalhamento nos casos das séries 2X e 7X, Figura 5.60 e Figura 5.61, os quais verificam esta região intermediária onde ocorrem as possíveis fissuras.

Os LVDT's da fase de ensaios definitivos (segunda fase), foram distribuídos com um número menor de posições, devido aos resultados obtidos nos pré-ensaios. Os ensaios foram todos instrumentados com LVDT's nas posições indicados na Figura 5.62.



Figura 5.62 – Posicionamento dos LVDT's

As posições dos LVDT's foram modificados de uma forma mais simplificada que as dos pré-ensaios de forma a aproveitar melhor os resultados. Na Figura 5.63 observam-se as posições dos LVDT's.

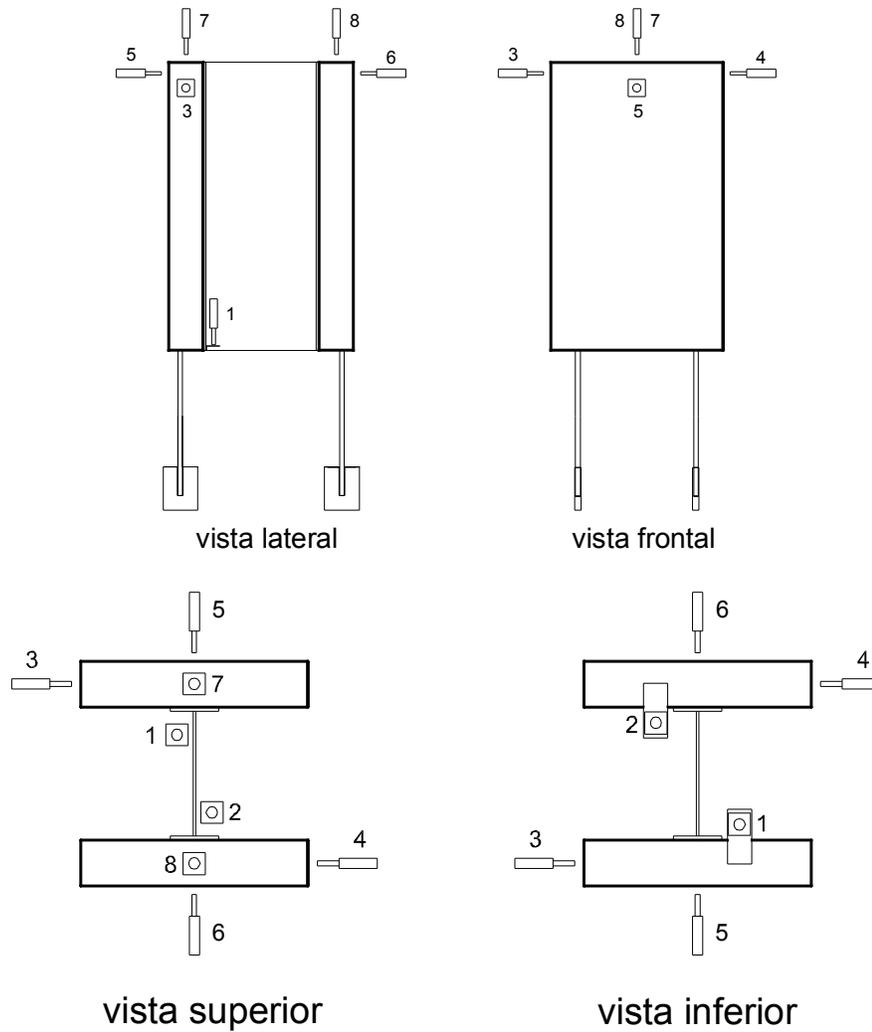


Figura 5.63 – Locação e identificação dos LVDT's dos ensaios

A Figura 5.63, mostra o posicionamento de cada grupo de LVDT's. Diferentes dos LVDT's dos pré-ensaios, somente os posicionados na parte superior de borda, pois não foram obtidos resultados significativos que poderiam ser aproveitados.

5.1.2.2.6.***Montagem do Pull-out***

A montagem dos ensaios foi idêntica a dos pré-ensaios, diferenciando-se somente no modelo da forma, que anteriormente era constituída de material metálico e neste caso constitui-se de madeira, para a maior produção de experimentos e facilidade na desforma das mesmas.

A ordem de montagem do pull-out para a concretagem foi mantida, iniciando pelo posicionamento do perfil metálico invertido com relação à posição de ensaio, colocação dos estribos juntamente com as barras principais junto ao perfil metálico, seguida da montagem da forma de madeira.

Na Figura **5.64** é apresentada a seqüência da montagem final da forma de madeira para a concretagem do pull-out.

A montagem do pull-out inicia-se pelo posicionamento da forma para receber o perfil metálico, encaixam-se as armaduras compostas pela gaiola de estribos e a armadura principal, fechando a fôrma. Realiza-se este procedimento em cada um dos lados do pull-out a serem concretados, e finalmente fixam-se as partes de madeira que compõe a forma com grampos para colocação de parafusos nas travessas que finalizam o fechamento da forma.

Nos ensaios, após várias discussões e pesquisas em outras séries de experimentos, não houve preocupação com a altura de lançamento do concreto, pois a quantidade de armadura existente dentro da forma ameniza a altura desse lançamento.

Da mesma forma dos pré-ensaios, o tempo de cura dos experimentos foi de mais de 20 dias, garantindo a obtenção da resistência prevista.



Figura 5.64 – Montagem da Forma para a Concretagem do Pull-out

5.1.2.2.7. Previsão dos Resultados

Uma previsão para os resultados foi obtida através dos dados oriundos da configuração da cada ensaio, avaliando as resistências da armadura e ancoragem, dos conectores e da laje de concreto.

Na parte inicial da previsão apresentam-se os modos de ruptura, que são associados a ruptura da armadura principal por tração, ruptura dos conectores de cisalhamento, arrancamento da armadura pela ruptura da ancoragem e ruptura do concreto devido a compressão exercida pelos conectores.

Para a série de ensaios PO 1X, é apresentada a Tabela 5.3, onde pode ser observada uma previsão inicial dos resultados e valores finais de ruptura, seguido por cada um dos seus respectivos modos.

Tabela 5.3 – Planilha de Previsão dos Resultados do PO 11, PO 12 e PO 13

Pull-Out modelo	Pull-Out Resistência Prevista			
	Ancoragem [kN]	Barra [kN]	Conector [kN]	Modo de Ruptura
PO-11, PO-12 e PO-13	569,40	402,12	475,63	ruptura da barra

Pull-Out modelo	Pull-Out Ruptura	
	[kN]	Modo de Ruptura
PO-11	316,00	ruptura solda conector
PO-12	352,19	ruptura solda conector
PO-13	516,21	ruptura da barra

O valor de carga previsto para ruptura da série PO 1X é de 402,12kN, rompendo a seção transversal da barra da armadura. No entanto, a ruptura nos ensaios PO-11 e PO-12 ocorreu de maneira diferente do previsto numericamente, sendo que no ensaio PO-13, de modo a obter o modo de ruptura esperado, fez-se uma modificação na estrutura garantindo que a ruptura seja igual a previsão com um valor de carga acima do esperado, com um valor de 516,21kN. Os ensaios PO11 e PO 12 entraram em colapso de forma inesperada pela ruptura da solda que liga o conector de cisalhamento a mesa da viga, com os valores de 316,00kN e 352,19kN respectivamente.

Nos ensaios da série PO 2X as previsões são apresentadas na Tabela 5.4, onde pode ser observada uma previsão inicial dos resultados e valores finais de ruptura, seguido por cada uma dos seus respectivos modos.

Como ocorrido na série anterior, rupturas inesperadas na solda do conector de cisalhamento surgiram nos ensaios PO 21 e PO 23 com valores de carga 438,61kN e 414,52kN respectivamente, ocorrendo também uma flambagem na alma do perfil metálico principal no ensaio PO-22, sendo que a interrupção do ensaio ocorreu quando a carga aplicada na estrutura atingiu 522,02kN.

Tabela 5.4 – Planilha de Previsão dos Resultados do PO 21, PO 22 e PO 23

Pull-Out modelo	Pull-Out Resistência Prevista			
	Ancoragem [kN]	Barra [kN]	Conector [kN]	Modo de Ruptura
PO-21, PO-22 e PO-23	1095,00	1256,64	713,44	ruptura do conector (modo 1)

Pull-Out modelo	Pull-Out Ruptura	
	[kN]	Modo de Ruptura
PO-21	438,61	ruptura solda conector
PO-22	522,02	flambagem da alma
PO-23	414,52	ruptura solda conector

Na Tabela 5.5 são apresentados os resultados dos ensaios da série PO-7X com suas respectivas cargas e modos de ruptura.

Tabela 5.5 – Planilha de Previsão dos Resultados do PO 71, PO 72 e PO 73

Pull-Out modelo	Pull-Out Resistência Prevista			Modo de Ruptura
	Ancoragem [kN]	Barra [kN]	Conector [kN]	
PO-71, PO-72 e PO-73	480,95	628,32	713,44	ruptura da ancoragem

Pull-Out modelo	Pull-Out Ruptura	
	[kN]	Modo de Ruptura
PO-71	415,52	ruptura solda conector
PO-72	448,56	ruptura da ancoragem
PO-73	433,75	ruptura solda conector

Como nas duas séries iniciais, rupturas da solda do conector de cisalhamento novamente ocorreram, com cargas de 415,52kN no ensaio PO-71 e 433,75kN no ensaio PO-73. No ensaio PO-72 ocorreu o modo de ruptura previsto, rompendo a ancoragem da barra da armadura com uma carga aplicada de 448,56kN.

Na Tabela 5.6 são apresentados os resultados dos ensaios da série PO-8X com suas respectivas cargas e modos de ruptura.

Tabela 5.6 – Planilha de Previsão dos Resultados do PO 81, PO 82 e PO 83

Pull-Out modelo	Pull-Out Resistência Prevista			Modo de Ruptura
	Ancoragem [kN]	Barra [kN]	Conector [kN]	
PO-81, PO-82 e PO-83	525,60	804,25	475,63	ruptura do conector (modo 1)

Pull-Out modelo	Pull-Out Ruptura	
	[kN]	Modo de Ruptura
PO-81	268,34	ruptura solda conector
PO-82	474,28	ruptura da ancoragem
PO-83	445,91	ruptura da ancoragem

Novamente no ensaio PO-81 foi detectada uma deficiência na solda dos conectores e a ruptura sucedeu-se mais uma vez na solda entre conectores de cisalhamento e mesa da viga, alcançando uma carga de 268,34kN. Os ensaios restantes, PO-82 e PO-83, foram modificados em função dos problemas com a solda dos conectores e tornaram-se somente ensaios que mediram a resistência da ancoragem, onde foram travadas as lajes de concreto de modo que somente as barras de armadura trabalhassem neste sistema, alcançando valores de cargas de ruptura de 474,28kN e 445,91kN.

5.1.2.2.8. Descrição dos Ensaios Definitivos e Modos de Ruptura

A montagem dos ensaios ocorreu normalmente, sem que ocorressem imprevistos, de forma que os pré-ensaios foram eficientes para que verificasse todos os tipos de falha para as séries de ensaios definitivos.

Os problemas ocorridos foram com relação à fabricação dos elementos dos ensaios, mais especificamente a solda entre conector de cisalhamento e viga de aço. Este modo de ruptura não foi previsto nos ensaios, pois considerava-se que esta solda garantiria a fixação dos conectores de cisalhamento diante de todas as solicitações impostas durante os ensaios. Nas figuras a seguir podem ser observadas as várias falhas ocorridas nas soldas dos conectores, notando que não existiu fusão entre os materiais, caracterizando a baixa amperagem no equipamento de solda. Na Figura 5.65, pode-se observar a estrutura de colapso com o perfil metálico desligado da laje de concreto após a ruptura da solda dos conectores.



Figura 5.65 – Ruptura da solda dos conectores de cisalhamento

Na Figura 5.66, pode ser visto com mais detalhe a base do conector de cisalhamento praticamente intacta, confirmando a hipótese de baixa amperagem

no equipamento de solda, gerando uma fusão insuficiente entre os materiais, tornando a resistência da solda inferior a resistência dos outros elementos envolvidos no ensaio.



Figura 5.66 – Detalhe das rupturas das soldas dos conectores

Na série de ensaios PO-1X, Figura 5.67, os ensaios PO-11 e PO-12 foram prejudicados pela solda, portanto seu modo de ruptura foi a falha na solda do conector de cisalhamento. No ensaio PO-13, de forma a não prejudicar mais um ensaio, modificou-se a estrutura de maneira que a ruptura concentrar-se-ia nas barras de armadura.

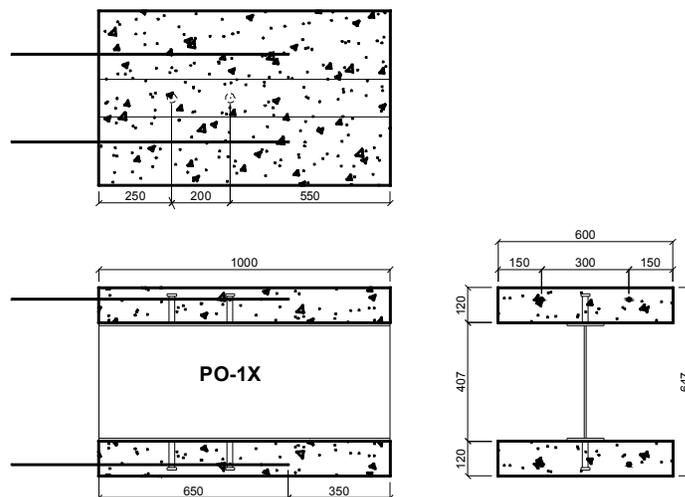


Figura 5.67 – Padrão de ensaios da série PO-1X

Podem ser observadas na Figura 5.68, as modificações realizadas de modo a impedir a ruptura na solda dos conectores. Foram colocados perfis metálicos entre as barras de armadura, travados nas lajes de concreto e no perfil metálico, fazendo com que a carga fosse totalmente voltada para as barras de armadura, evitando a sollicitação dos conectores e sua inesperada ruptura.

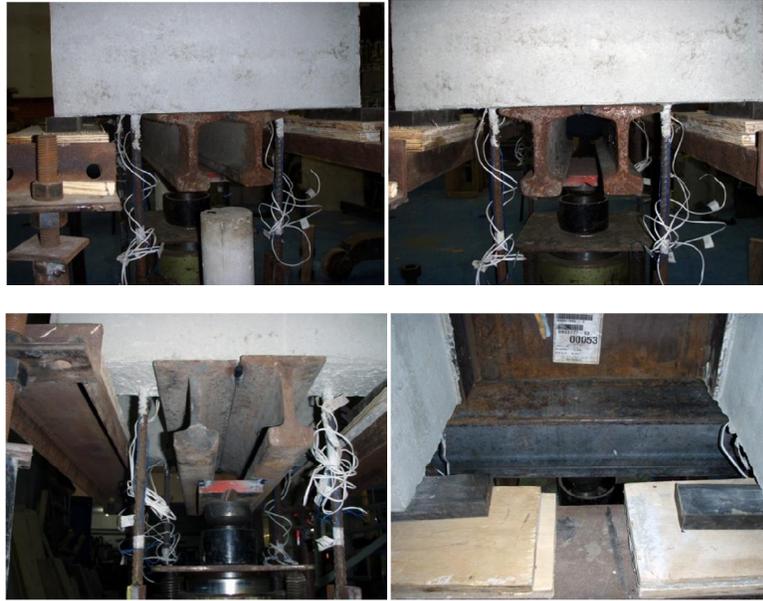


Figura 5.68 – Modificação da estrutura do ensaios PO-13

O ensaio PO-13 obteve êxito na determinação do modo de ruptura, Figura 5.69, devido a modificação da sua estrutura, tendo uma previsão de ruptura com carga 402,12kN, sendo que o colapso deveria ocorrer na barra de armadura, e a ruptura ocorreu com um carga final de 516,21kN.

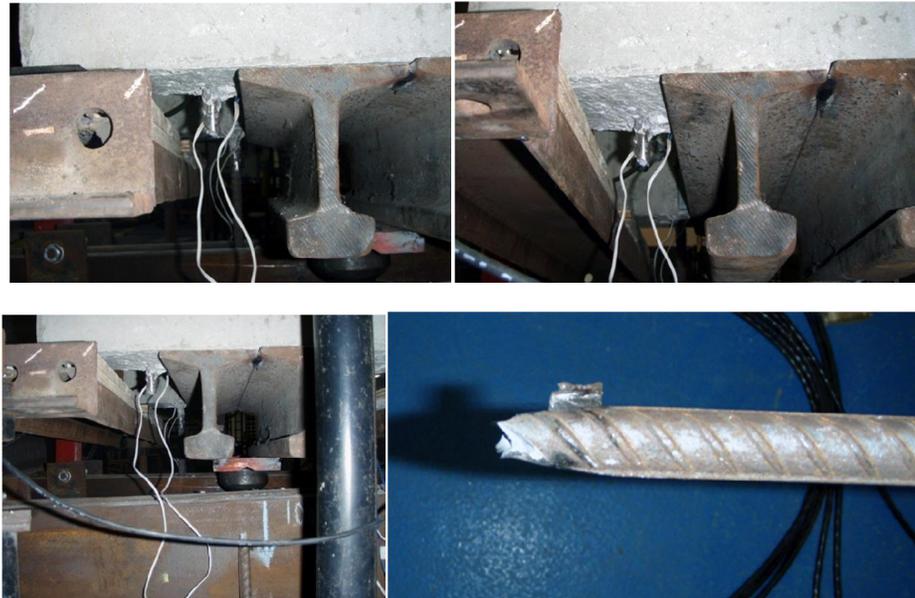


Figura 5.69 – Ruptura na barra do ensaio PO-13

Com a modificação da estrutura de ensaio deste experimento, o modo de ruptura ocorreu como previsto, rompendo a barra da armadura com uma carga final de 516,21kN.

Na serie de ensaios PO-2X, Figura 5.70, nos ensaios PO-21 e PO-23 ocorreu à ruptura pela fragilidade da solda dos conectores. No ensaio PO-22, ocorreu flambagem na alma do perfil metálico, Figura 5.71, devido à modificação da placa de distribuição de carga, que se localizava entre o atuador hidráulico e a base de aplicação de carga do perfil metálico principal, chegando a uma carga de 522,02kN.

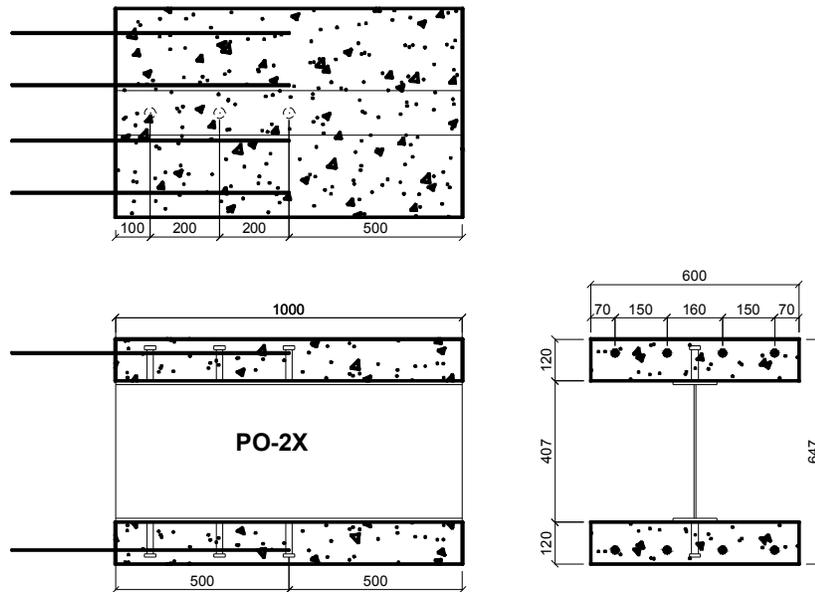


Figura 5.70 – Padrão de ensaios da série PO-2X

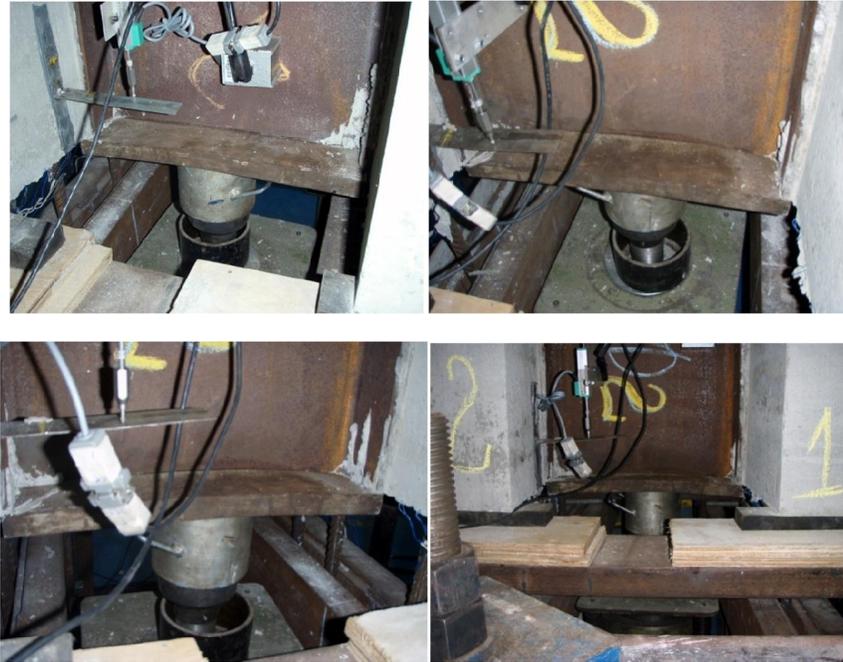


Figura 5.71 – Colapso na alma do perfil do ensaio PO-22

Na serie de ensaios PO-7X, Figura 5.72, nos ensaios PO-71 e PO-73 ocorreu a ruptura pela fragilidade da solda dos conectores. No ensaio PO-72, ocorreu o arrancamento da barra de armadura, Figura 5.73, devido a ruptura da ancoragem entre a barra e o concreto, modo de ruptura previsto, atingindo uma carga final de 448,56kN, sendo que a carga de ruptura prevista era de 480,95kN.

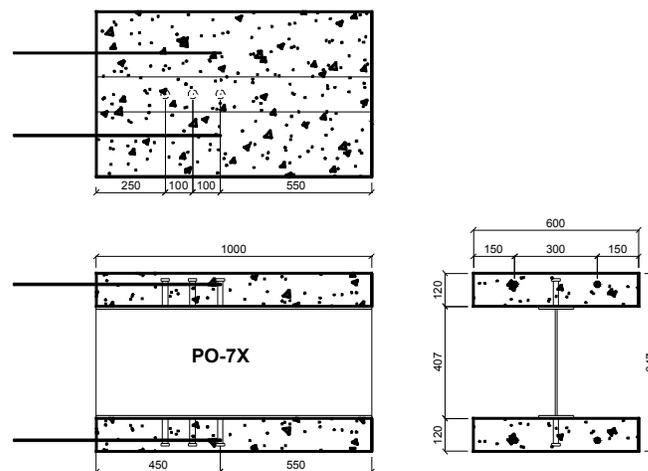


Figura 5.72 – Padrão de ensaios da série PO-7X



Figura 5.73 – Ruptura da ancoragem da barra de armadura do ensaio PO-72

Na série de ensaios PO-8X, Figura 5.74, no ensaio PO-81 ocorreu a ruptura pela fragilidade da solda dos conectores.

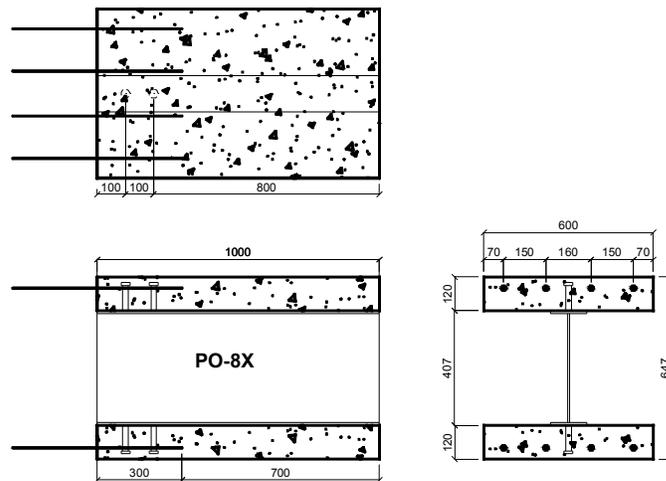


Figura 5.74 – Padrão de ensaios da série PO-8X

Os ensaios PO-82, Figura 5.75 e PO-83, Figura 5.76, foram modificados de forma que não ocorresse a ruptura na solda do conector de cisalhamento, as modificações foram semelhantes as realizadas no ensaio PO-13, Figura 5.68.



Figura 5.75 – Modificação na estrutura do ensaio PO-82



Figura 5.76 – Modificação na estrutura do ensaio PO-83

Ocorreu o arrancamento da barra de armadura, devido a ruptura da ancoragem entre a barra e o concreto, modo de ruptura previsto, atingindo uma carga final de 474,28kN para o PO-82, Figura 5.77 e 445,91kN para o PO-83, Figura 5.78, sendo que a carga de ruptura prevista era de 475,63kN.



Figura 5.77 – Ruptura da ancoragem da barra de armadura do ensaio PO-82



Figura 5.78 – Ruptura da ancoragem da barra de armadura do ensaio PO-83