

3 Estudo experimental

Neste capítulo são apresentadas as características dos pilares concebidos para permitir a variação do cobrimento das armaduras, o concreto utilizado, a instrumentação, os sistemas de aplicação do carregamento e as demais etapas necessárias para a realização dos ensaios. Também são apresentados os valores de resistências características do aço e do concreto usados na confecção dos pilares.

3.1. Confecção dos Pilares

Para a realização dos ensaios foram confeccionados 18 pilares de concreto armado com seção transversal de 200 mm x 150 mm e comprimento de 110 cm (Figura 3.1 e Figura 3.2).

A principal variável adotada no estudo é a espessura do cobrimento c em uma das faces do pilar conforme indicado na Figura 3.1, sendo avaliado também o efeito da existência de emenda nas armaduras principais. Para a obtenção das diversas espessuras de cobrimento c , a armadura foi deslocada no sentido da Face A (face do pilar em que as armaduras longitudinais das emendas foram instrumentadas com extensômetros), de modo que $c1 = (50 - c)$, com c em mm, conforme indicado na Figura 3.1.

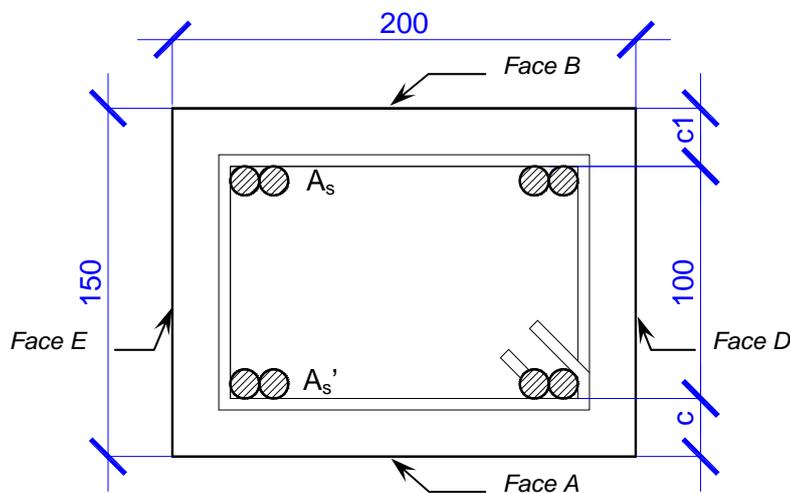


Figura 3.1 – Seção transversal típica dos pilares com emenda: seção $L/2$ (cotas em mm).

Os ensaios consistem na aplicação de uma força de compressão com uma excentricidade de 20 mm com relação ao centro de gravidade da seção, sendo essa excentricidade aplicada apenas na direção da menor dimensão da seção transversal. A utilização da força excêntrica visa definir qual será a região mais comprimida da seção, uma vez que, apenas as emendas por traspasse das barras localizadas nessa região foram instrumentadas com extensômetros elétricos.

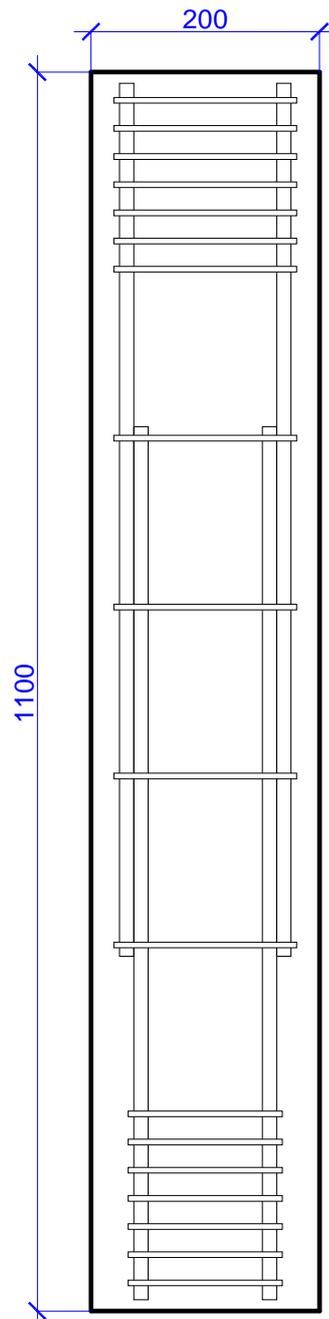


Figura 3.2 – Vista longitudinal do pilar (vista da *Face A* da Figura 3.1).

3.1.1. Armaduras

Todos os pilares foram armados com barras de aço CA-50 com diâmetro nominal de 12,5 mm para a armadura principal (direção longitudinal), e diâmetro nominal 5 mm para os estribos.

O arranjo da armadura longitudinal define as três séries de pilares assim descritas:

a) Pilares da *Série 1*: Pilar de referência onde a armadura longitudinal é composta por barras sem emenda;

b) Pilares da *Série 2*: Armadura longitudinal com emenda por traspasse posicionada na metade da altura do pilar, sendo o comprimento da emenda calculado de acordo com a NBR 6118: 2003. Para os pilares deste estudo o comprimento básico da emenda por traspasse é 47 cm.

c) Pilares da *Série 3*: Os pilares desta série apresentam a mesma configuração dos pilares da *Série 2*, entretanto, o comprimento da emenda por traspasse é igual a 23,5 cm, ou seja, metade do comprimento recomendado pela NBR 6118: 2003.

A Figura 3.3 apresenta o detalhamento dos três tipos de armaduras das séries de pilares, considerando-se uma vista de frente com relação à face de maior dimensão do pilar (*Face A*: lado com 20 cm).

3.1.2. Resistência à compressão da armadura longitudinal

A curva tensão vs. deformação específica do aço da armadura longitudinal foi traçada a partir da deformação específica média fornecida por dois extensômetros elétricos de resistência tipo PA-06-250BA-120-L, de 10 mm de comprimento e fator de calibração de 2,13, colados em duas faces diametralmente opostas do corpo-de-prova retirado das barras utilizadas na confecção das armaduras longitudinais dos pilares (Figura 3.4).

O ensaio foi realizado com um corpo-de-prova de 50 mm de comprimento e 12,5 mm o diâmetro, fornecendo uma relação l/d igual a quatro, adequada para a realização de testes em materiais metálicos sujeitos à compressão na direção longitudinal da peça.

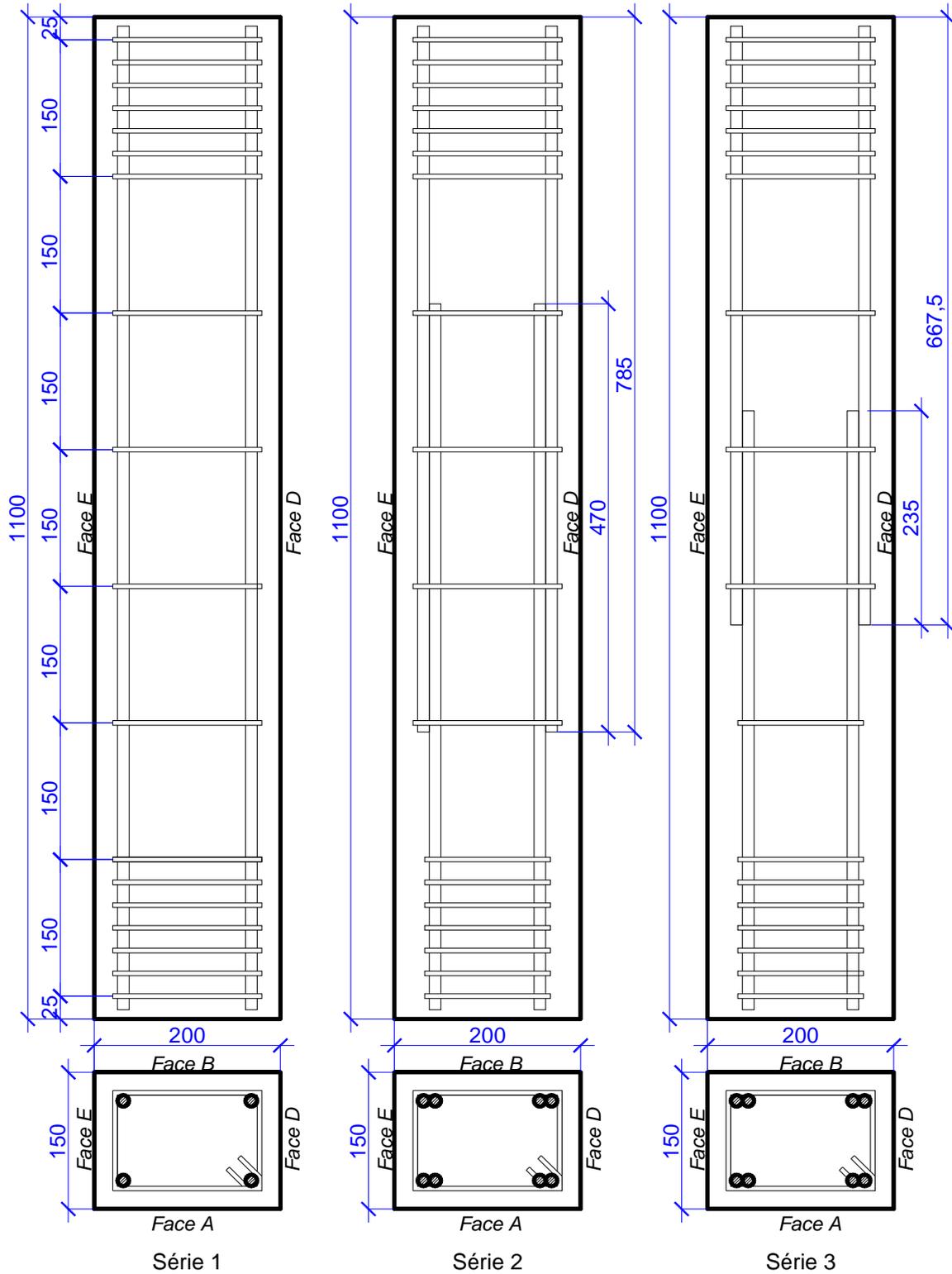


Figura 3.3 – Detalhamento das armaduras utilizadas nas três séries de pilar: *Série 1* – armaduras sem emenda, *Série 2* – emenda por traspasse de 470 mm e *Série 3* – emenda de 235 mm de comprimento (vista da *Face A* da Figura 3.1).

A Figura 3.4 (a) apresenta o corpo-de-prova com as superfícies lixadas e limpas para a colagem dos extensômetros, e a Figura 3.4 (b) mostra como a força de compressão foi aplicada durante a realização do ensaio.

A curva tensão vs. deformação específica obtidas a partir do ensaio de compressão axial da barras de aço são mostradas na Figura 3.5. As deformações específicas utilizadas na construção da curva representam o valor médio das deformações específicas medidas nos dois extensômetros instalados no corpo-de-prova.

O módulo de elasticidade do aço E_s obtido a partir da curva foi de 219,7 GPa e a tensão de escoamento $f_y = 622$ MPa.

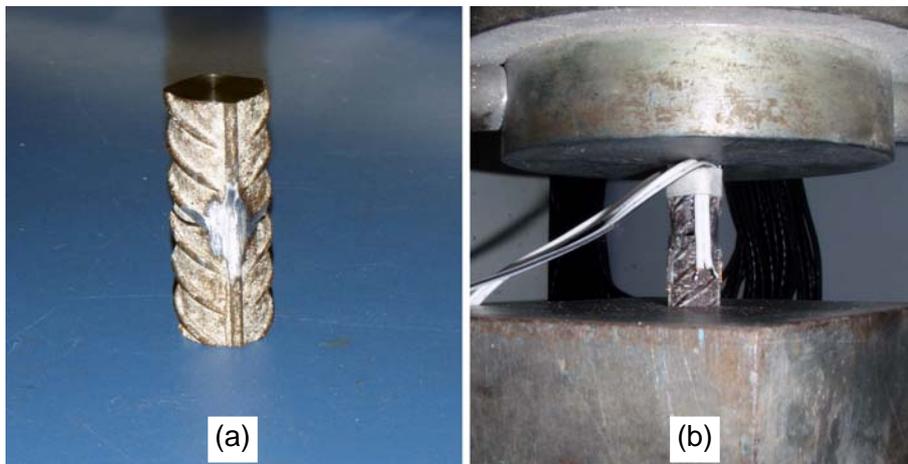


Figura 3.4 – Corpo-de-prova utilizado na determinação da curva tensão vs. deformação específica do aço.

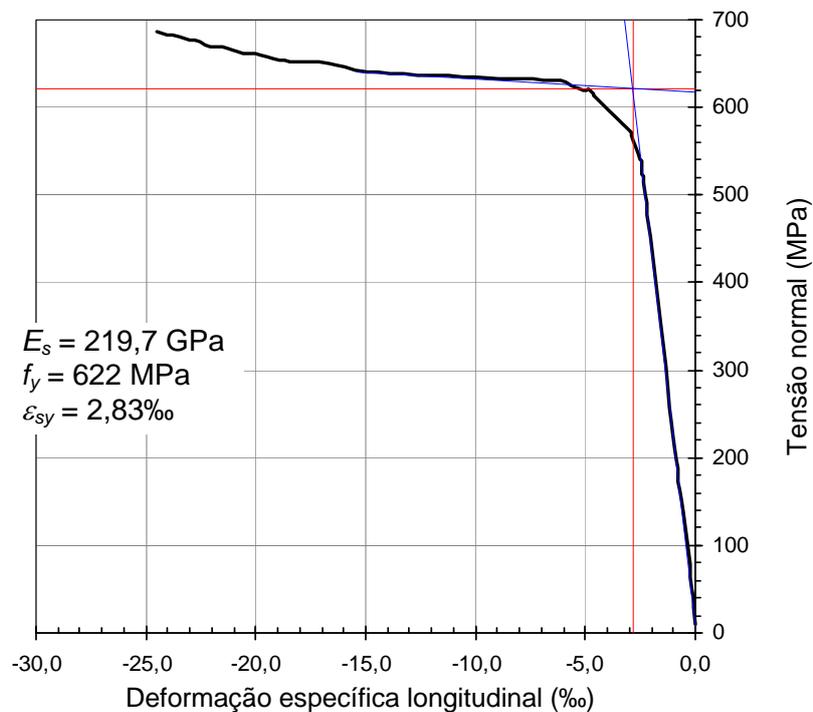


Figura 3.5 – Curva tensão vs. deformação específica longitudinal média do aço sob compressão.

3.1.3. Formas

Os corpo-de-prova foram confeccionados em uma forma constituída por três perfis metálicos arranjados conforme mostra a Figura 3.6.

A forma metálica proporciona um melhor acabamento aos pilares facilitando a fixação dos extensômetros elétricos de concreto. Os perfis utilizados na confecção das formas apresentam o comprimento de 6,00 m. Portanto, cerca de cinco pilares são concretados ao mesmo tempo (Figura 3.7).

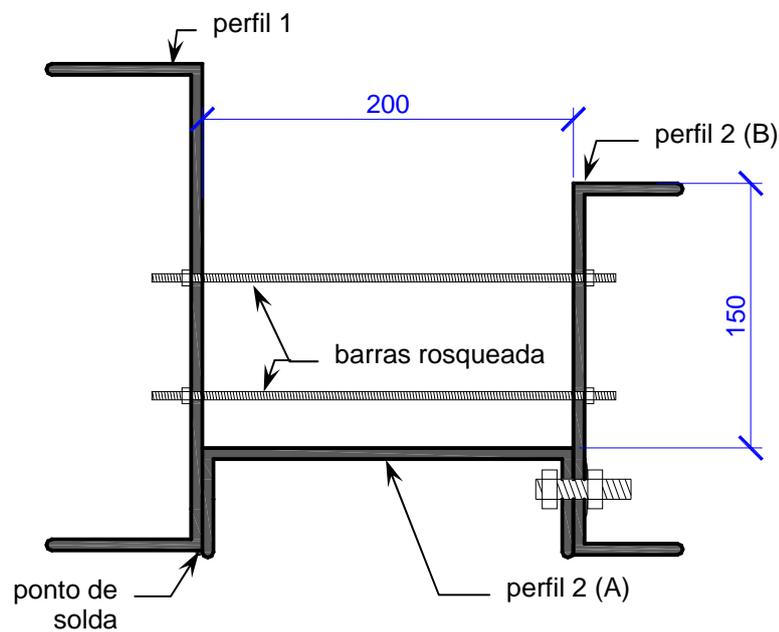


Figura 3.6 – Formas usadas na confecção dos pilares (seção transversal).



Figura 3.7 – Formas usadas na confecção dos pilares (durante a concretagem).

3.1.4.

Posicionamento da armadura na forma e cobrimento

Os 18 pilares confeccionados para os ensaios compreendem seis diferentes espessuras de cobrimentos para cada série de pilar definida pela configuração da armadura longitudinal.

A Tabela 3.1 define as seis espessuras de cobrimento c para cada série, bem como apresenta o código alfa numérico para a identificação de cada pilar do estudo experimental, que foi definido da seguinte forma: P1, P2 e P3 indicam, respectivamente, pilares das séries 1, 2 e 3, já os dois últimos indicadores especificam a espessura do cobrimento em mm, exceto nos casos “AE” usados para indicar o pilar de cada série que foi confeccionado com a metade do diâmetro da armadura exposto (Figura 3.11).

Tabela 3.1 – Espessura do cobrimento para cada série de pilar.

Nomenclatura	Cobrimento c (mm)	Série
P1-25	25,00	Série 1 (sem emenda)
P1-20	20,00	
P1-10	10,00	
P1-05	5,00	
P1-00	0,00	
P1-AE	-6,25*	
P2-25	25,00	Série 2 (emenda de 47 cm)
P2-20	20,00	
P2-10	10,00	
P2-05	5,00	
P2-00	0,00	
P2-AE	-6,25*	
P3-25	25,00	Série 3 (emenda de 23,5 cm)
P3-20	20,00	
P3-10	10,00	
P3-05	5,00	
P3-00	0,00	
P3-AE	-6,25*	

* igual à metade do diâmetro da barra longitudinal exposta

Para a obtenção da variável principal do ensaio, ou seja, a espessura do cobrimento c em uma das faces do pilar (denominada de *Face A*), foram soldados nas armaduras já montadas, pequenos pinos confeccionados de barras de 5 mm de diâmetro na face oposta a qual se pretendia obter a espessura de cobrimento desejada (denominada de *Face B*). O lado onde os pinos foram soldados ficou posicionado sobre a parte inferior da forma no momento da concretagem.

A Figura 3.8 e a Figura 3.9 mostram como foi obtida cada espessura de cobrimento para os pilares, e a Figura 3.10 apresenta um detalhe dos pinos utilizados para a obtenção de uma determinada espessura de cobrimento.

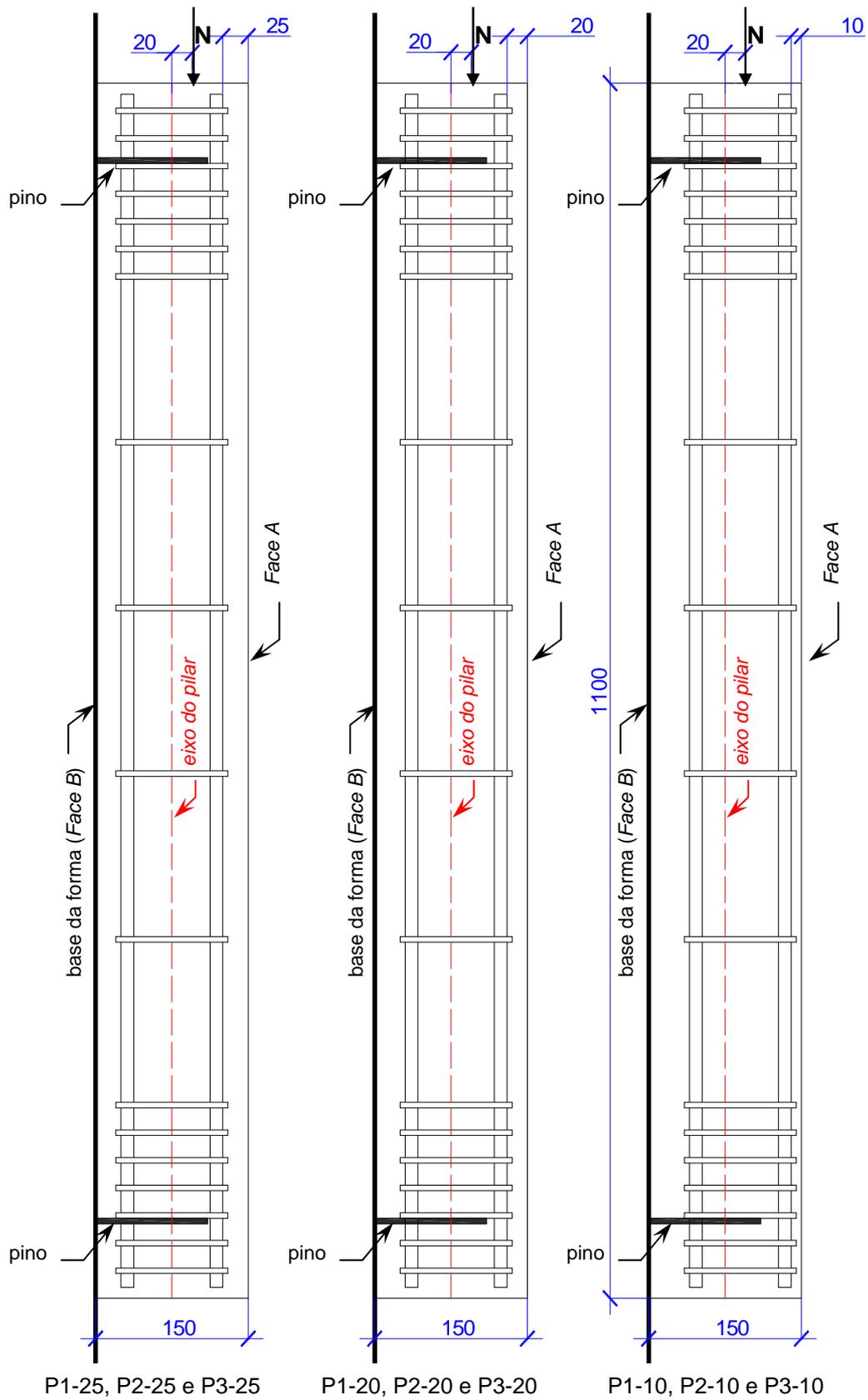


Figura 3.8 – Detalhamento dos pilares com espessura de cobrimento de 25, 20 e 10 mm (vista da Face E da Figura 3.1).

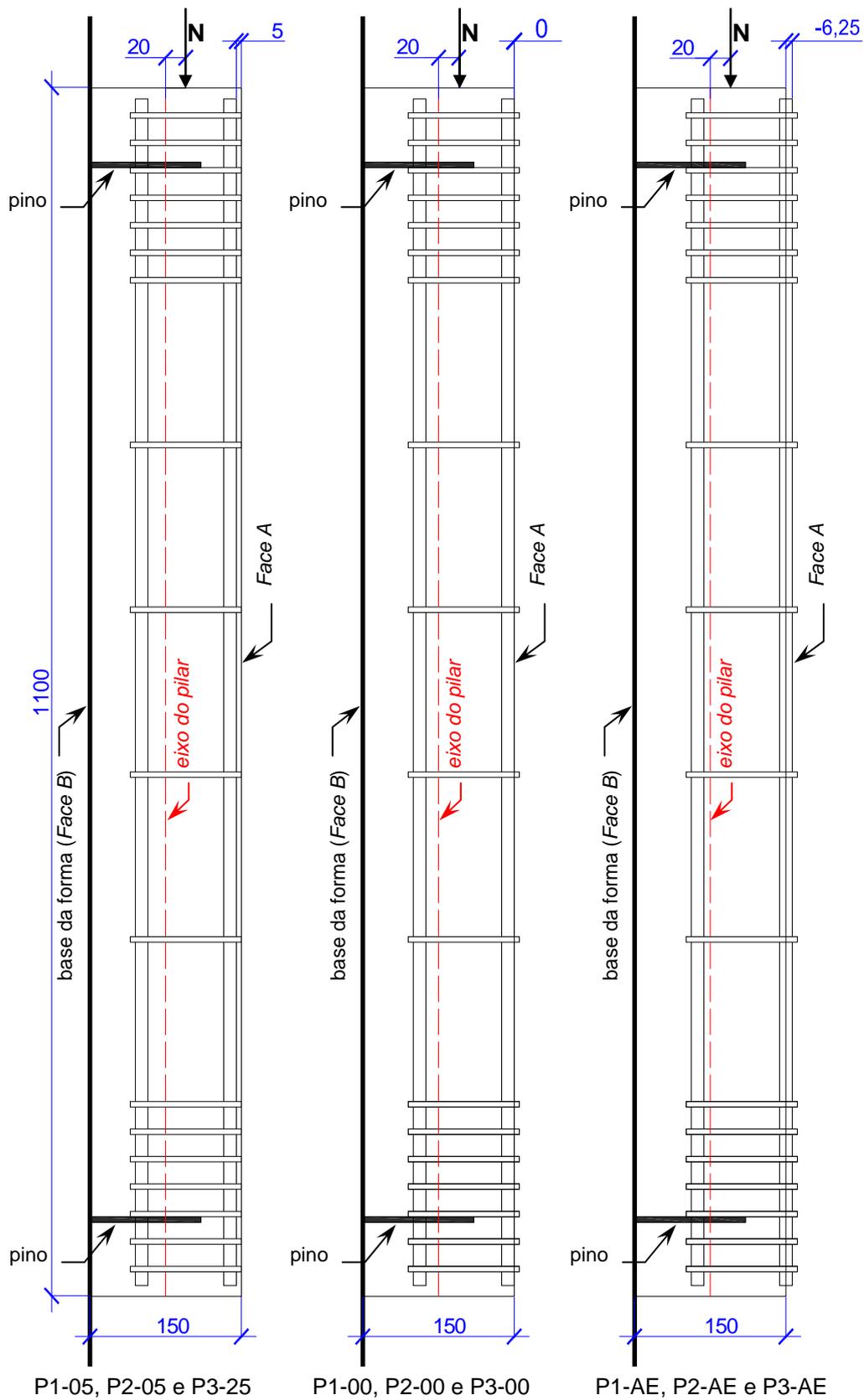


Figura 3.9 – Detalhamento dos pilares com espessura de cobrimento de 5, 0 e -6,25 mm (vista da Face E da Figura 3.1).

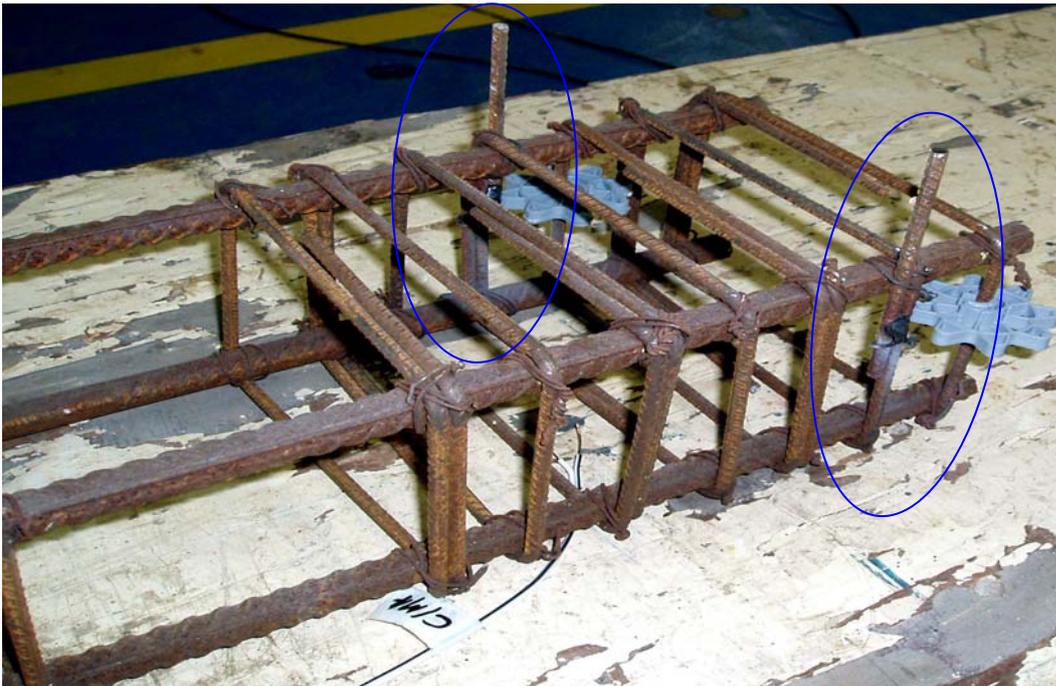


Figura 3.10 – Detalhe dos pinos utilizados para a obtenção de uma determinada espessura de cobertura.

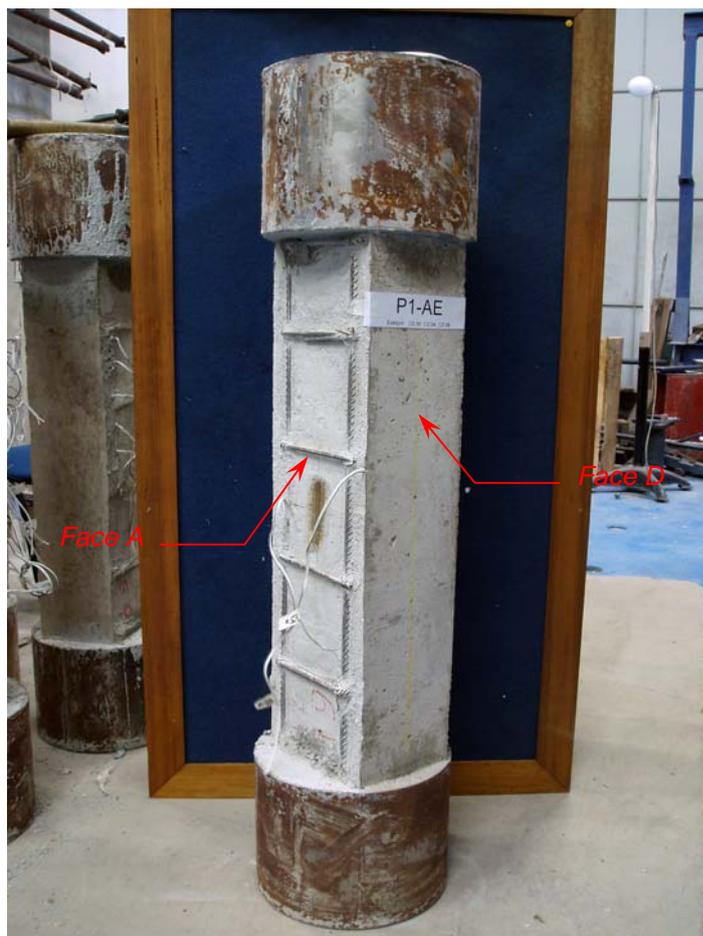


Figura 3.11 – Pilar confeccionado com metade do diâmetro da armadura longitudinal para fora da Face A (P1-AE)

3.1.5. Instrumentação

3.1.5.1. Obtenção de deformações nas armaduras

As armaduras foram instrumentadas com extensômetros elétricos especiais para aço, observando-se as regiões das emendas por traspasse para os pilares que têm tais emendas. Já para os pilares com armadura longitudinal contínua, os extensômetros elétricos foram posicionados na metade do comprimento longitudinal em duas barras diagonalmente opostas, ou seja, o extensômetro denominado *Ext-A* foi colado em uma das barras próximas da *Face A*, e o extensômetro *Ext-B* foi colado na barra diagonalmente oposta próxima da *Face B* (ver Figura 3.13 (a)). Com relação às barras com emendas, os extensômetros foram posicionados apenas nas duas emendas localizadas junto da face mais comprimida do pilar (*Face A*), isto é, no sentido da excentricidade da força (Figura 3.13 (b)).

A barra foi lixada de modo que as nervuras da mesma fossem afetadas o mínimo possível, e em uma área adequada à fixação dos extensômetros, de modo que sua capacidade de aderência não fosse demasiadamente afetada.

A Figura 3.12 mostra as barras sendo lixadas com a utilização de uma lixadeira elétrica de pequeno porte, bem como uma peça onde tal procedimento já havia sido efetuado.

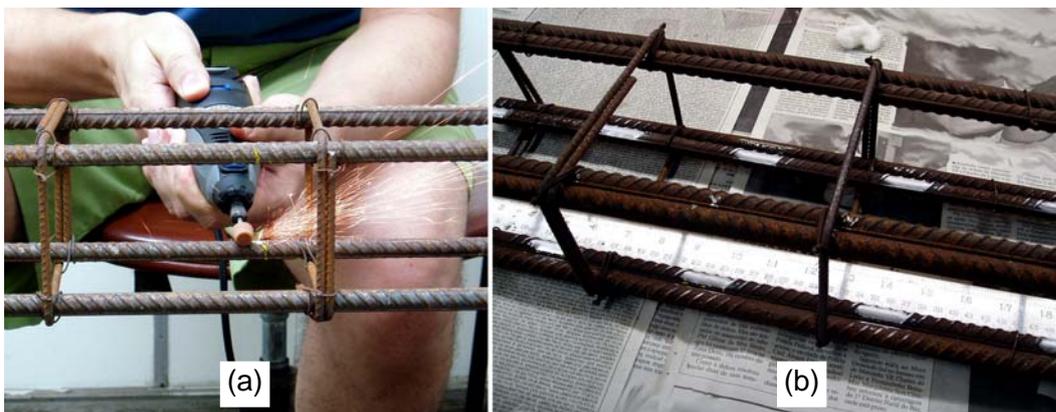


Figura 3.12 – Armaduras sendo lixadas com a utilização de uma lixadeira elétrica (a) e regiões já lixadas para a futura colagem dos extensômetros elétricos (b).

Nas armaduras dos pilares com emenda foram colados seis extensômetros, sendo cinco distribuídos ao longo do comprimento de traspasse e um fora da região da emenda, de modo que para as emendas de 470 mm de comprimento (pilares da *Série 2*) a distância entre eixos dos extensômetros foi

igual a 110 mm e para as emendas de 235 mm de comprimento (pilares da *Série 3*) a distância entre eixos dos extensômetros foi igual a 55 mm. Na Figura 3.13 é mostrada a localização dos extensômetros em relação a seção transversal dos pilares e na Figura 3.15 é mostrada a distribuição dos extensômetros na direção longitudinal dos pilares.

Nos pilares P1-AE, P1-00, P2-AE, P2-00 e P3-AE, P3-00 os extensômetros foram colados nas mesmas barras mostradas na Figura 3.13, entretanto, posicionados na parte externa da barra, isto é, nos lados mais próximos das *Faces A e/ou B*, para evitar uma diminuição da aderência na parte onde havia um maior contato entre o concreto e o aço.

A Figura 3.14 mostra a armadura do pilar da *Série 2* (P2-AE) instantes antes da concretagem, onde vêm-se os extensômetros posicionados na parte externa da barra, já com a camada impermeabilizante de pasta de silicone.

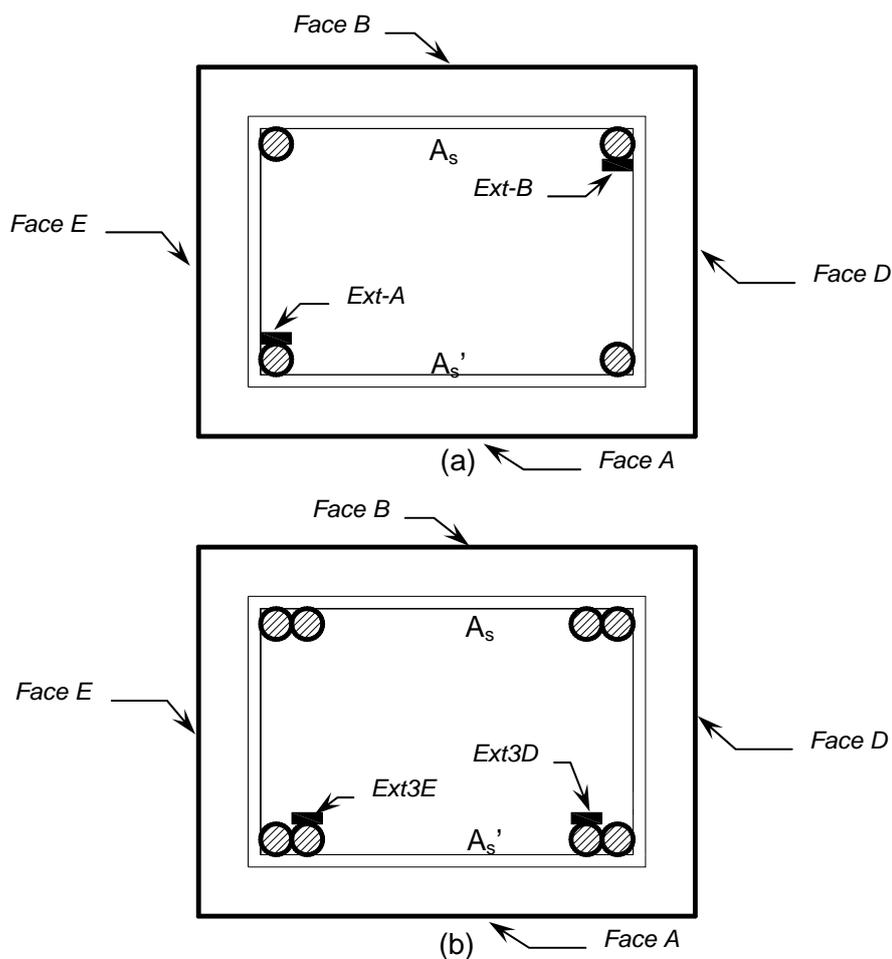


Figura 3.13 – Posicionamento dos extensômetros em relação a seção transversal do pilar: (a) pilares da *Série 1* e (b) pilares das Séries 2 e 3.

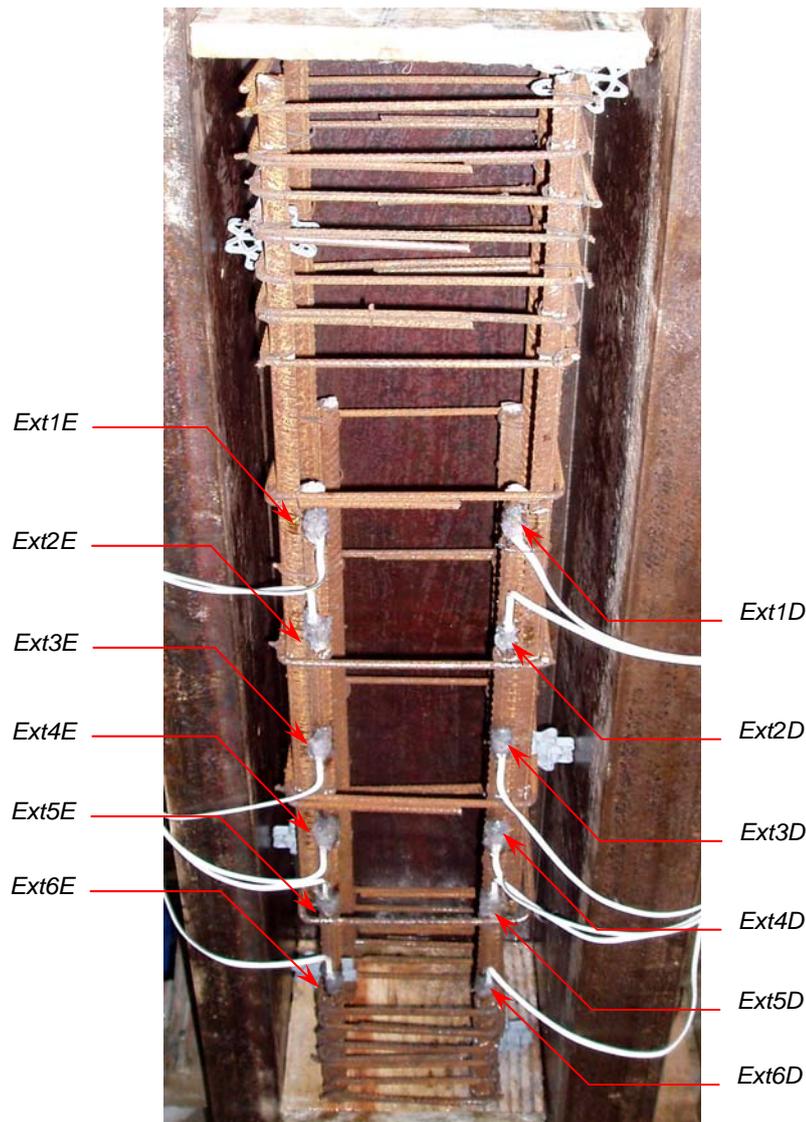


Figura 3.14 – Posicionamento dos extensômetros nas barras dos pilares com emenda (Série 2).

Os extensômetros elétricos de resistência utilizados nas armaduras foram do tipo PA-06-250RB-120-L, com fatores de calibração de 2,04 ou 2,06 e aproximadamente 10 mm de comprimento. Esses extensômetros tiveram que ser cortados e separados para em seguida serem colados (Figura 3.16), uma vez que os extensômetros disponíveis eram do tipo roseta de três direções.

A Figura 3.17 (a-d) ilustra as etapas de colagem desses extensômetros, compreendendo uma primeira etapa de limpeza da superfície (Figura 3.17 (a)), em seguida marcou-se o eixo para o posicionamento adequado de modo que o eixo marcado na armadura fosse sobreposto pelo eixo longitudinal do extensômetro durante a colagem (Figura 3.17 (b)), e uma terceira etapa em que o extensômetro foi colado na barra (Figura 3.17 (c)).

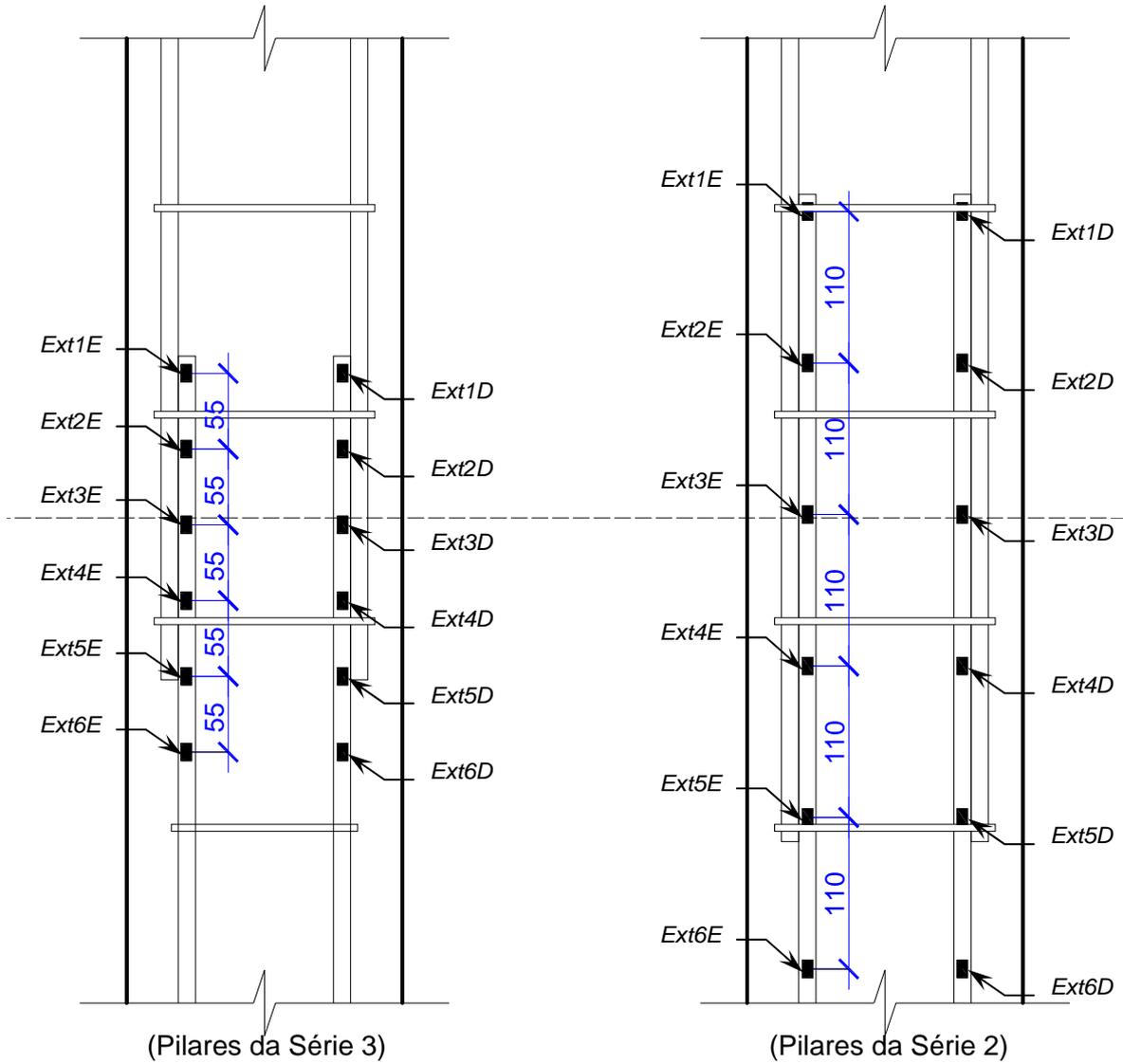


Figura 3.15 – Posicionamento dos extensômetros com relação a direção longitudinal dos pilares das Séries 2 e 3 (dimensões em mm).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321285/CA

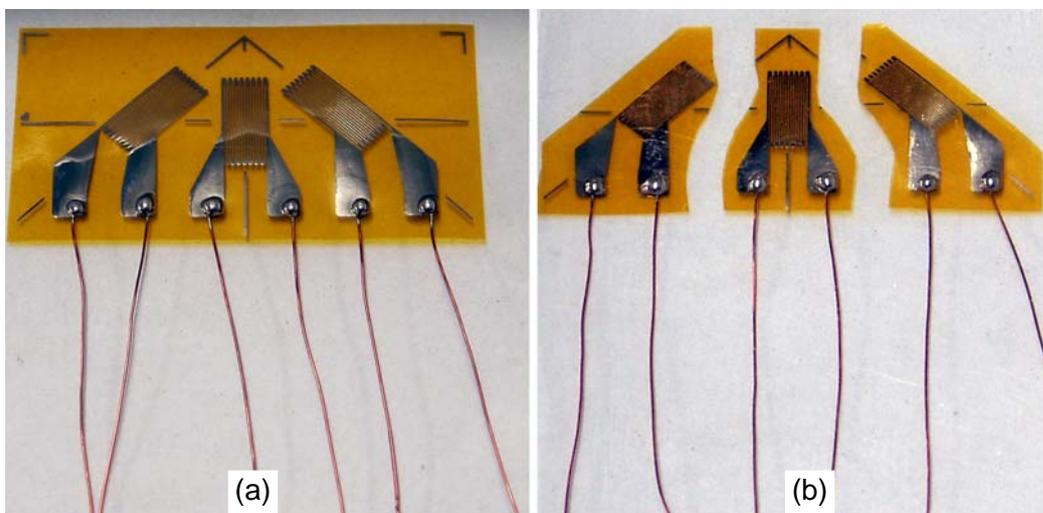


Figura 3.16 – Preparação dos extensômetros elétricos para uso em aço.

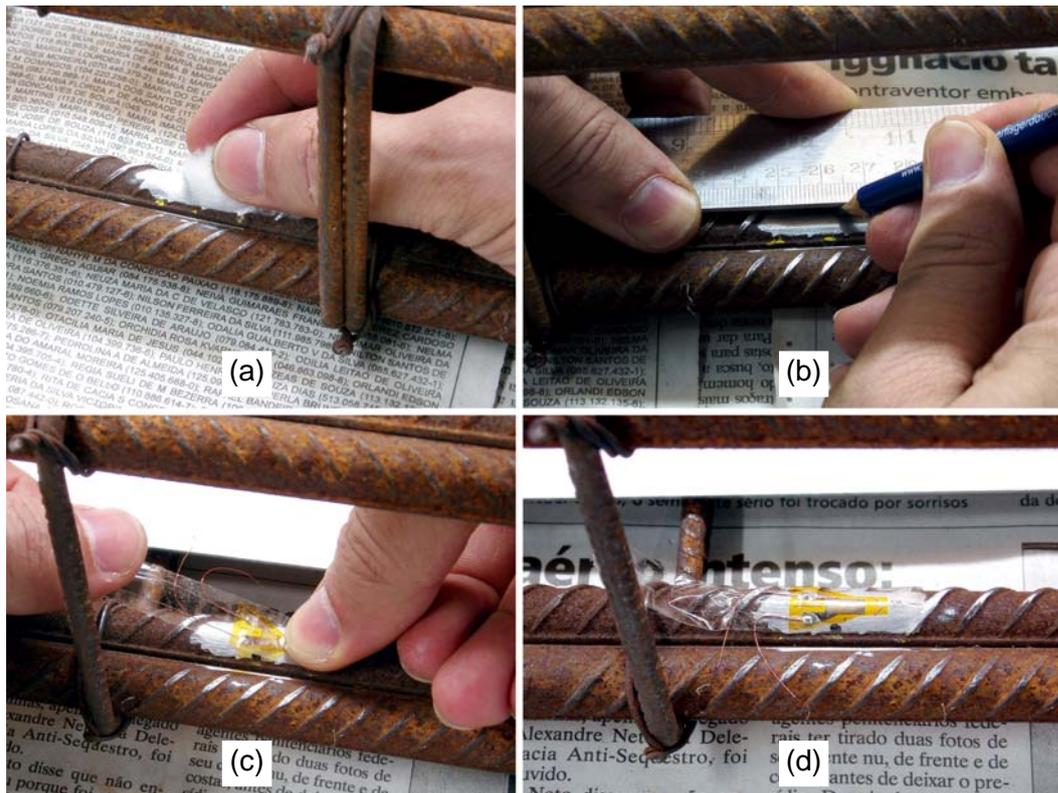


Figura 3.17 – Etapas de colagem dos extensômetros elétricos para uso em aço.

3.1.5.2. Obtenção da força aplicada

A força aplicada nos pilares durante o ensaio foi monitorada por meio de um transdutor de pressão conectado ao sistema hidráulico do atuador (Figura 3.18).

3.1.5.3. Obtenção das deformações específicas no concreto

Para a obtenção das deformações na seção referentes à metade da altura do pilar foram colados dois extensômetros elétricos de resistência com 67 mm de comprimento do tipo KC-70-A1-11, sendo seu fator de calibração igual a 2,12. Os extensômetros foram posicionados no centro geométrico de duas faces opostas e na direção da excentricidade da força, de modo que o extensômetro situado na *Face A* foi denominado *ExtC-A*, e o situado na *Face B* foi denominado *ExtC-B*, conforme mostrado na Figura 3.19.

3.1.5.4. Obtenção de deslocamentos do pilar

Os deslocamentos horizontais dos pilares foram medidos em dois pontos ao longo da *Face A* do pilar, sendo um ponto próximo ao topo e ou outro ponto na seção média do pilar. Esses deslocamentos foram monitorados por meio de duas régulas de deslocamento linear (RDL) com capacidade máxima de medição de 100 mm. Na Figura 3.20 são mostradas as duas régulas de deslocamento linear posicionadas nos dois pontos descritos.



Figura 3.18 – Transdutor de pressão conectado ao sistema hidráulico do atuador.

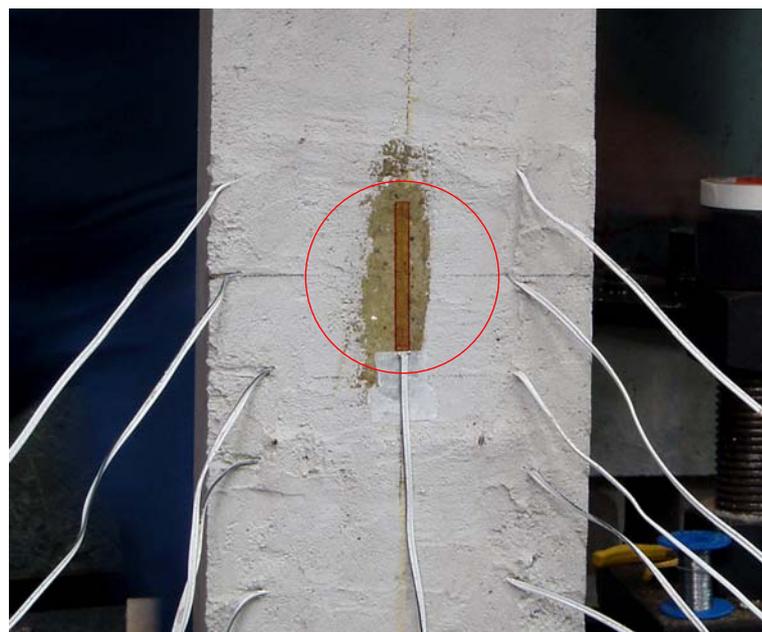


Figura 3.19 – Extensômetros elétricos para medição das deformações específicas no concreto.

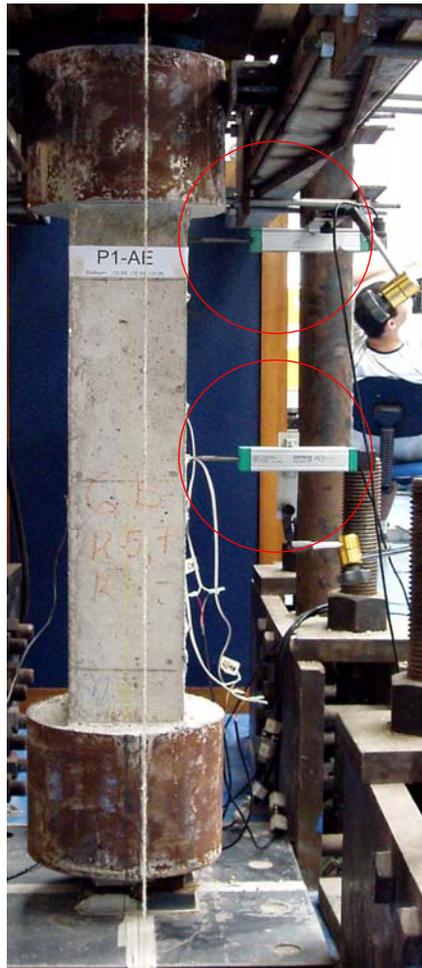


Figura 3.20 – Régua de deslocamento linear para medição dos deslocamento laterais.

3.1.6. Concreto

O traço utilizado para o concreto foi calculado de modo que este apresentasse uma resistência característica f_{cm} de aproximadamente 25 MPa.

Os dezoito pilares usados nos ensaios foram confeccionados em seis betonadas distintas, sendo que para cada betonada eram confeccionados três pilares.

Foram moldados, por betonada, 18 corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 100 mm x 200 mm, totalizando 108, sendo que metade deles foi usada para determinar a resistência à compressão do concreto, e a outra metade usada para a determinação da resistência à tração por compressão diametral. Os corpos-de-prova foram moldados segundo a NBR 5738: 1984.

A quantidade de materiais utilizados por metro cúbico de concreto, e os valores de abatimento no tronco de cone para cada betonada são apresentados

na Tabela 3.2 e Tabela 3.3, respectivamente. A Figura 3.22 apresenta moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos da 5ª betonada.

Tabela 3.2 – Consumo de materiais por metro cúbico de concreto.

Consumo de Materiais /m ³	
Cimento	302 kg
Agregado Miúdo	831 kg
Agregado Graúdo	886 kg
Fator (a/c)	0,7
Água	211 l
TOTAL	2.180 kg

Tabela 3.3 – Valores de abatimento no tronco de cone para cada betonada.

Abatimento do Tronco de Cone (cm)	Betonada					
	1ª (B1)	2ª (B2)	3ª (B3)	4ª (B4)	5ª (B5)	6ª (B6)
	8,0	9,0	8,5	8,5	6,0	7,5

3.1.7. Resistência do concreto

A Tabela 3.4 apresenta a resistência à compressão simples do concreto e a idade correspondente à realização do ensaio. A avaliação da resistência foi feita preferencialmente no dia do ensaio do pilar correspondente. Quando tal avaliação não ocorria no mesmo dia do ensaio do pilar, o prazo máximo para a obtenção da resistência não ultrapassou o período de oito dias, com relação ao dia de realização do ensaio do pilar. Cada valor de f_{cm} representa a média do número de corpos-de-prova indicados na Tabela 3.4.

Nos dias em que eram realizados os testes de resistência à compressão simples também eram realizados os testes para a avaliação da resistência à tração do concreto.

Os valores de resistência à tração do concreto foram obtidos de acordo com a norma NBR 7222: 1994 que descreve a determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Os valores obtidos nos ensaios foram convertidos em valores de resistência à tração direta do concreto pela relação fornecida na norma NBR 6118: 2003, que indica a relação entre a resistência à tração medida em diferentes ensaios. A Tabela 3.5 apresenta os valores obtidos nos ensaios já convertidos em valores de resistência à tração direta.

Segundo a norma NBR 6118: 2003, a resistência à tração direta f_{ct} pode ser considerada igual a $0,9f_{ct,sp}$, onde $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração indireta,

medida no ensaio de tração por compressão diametral definido pela NBR 7222: 1994.

Tabela 3.4 – Resultado da resistência à compressão de acordo com a idade do concreto.

Betonada	Pilar	Quantidade de corpo-de-prova	Idade (dias)	Resist. à compressão f_{cm} (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1 ^a (B1)	P1-20	6	83 - 84	27,0	1,46
	P2-20				
	P3-20				
2 ^a (B2)	P1-25	7	90 - 95	28,8	0,91
	P2-25				
	P3-25				
3 ^a (B3)	P1-10	8	83 - 84	27,8	0,95
	P2-10				
	P3-10				
4 ^a (B4)	P1-05	8	84 - 92	25,7	0,83
	P2-05				
	P3-05				
5 ^a (B5)	P1-00	3	84	27,8	0,22
	P2-00				
	P3-00				
6 ^a (B6)	P1-AE	4	81 - 84	26,0	1,39
	P2-AE				
	P3-AE				

Tabela 3.5 – Resultado da resistência à tração de acordo com a idade do concreto.

Betonada	Pilar	Quantidade de corpo-de-prova	Idade (dias)	Resist. à tração (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1 ^a (B1)	P1-20	6	83 - 84	2,69	0,09
	P2-20				
	P3-20				
2 ^a (B2)	P1-25	8	90 - 95	2,77	0,23
	P2-25				
	P3-25				
3 ^a (B3)	P1-10	9	83 - 84	2,94	0,13
	P2-10				
	P3-10				
4 ^a (B4)	P1-05	6	84 - 92	2,77	0,83
	P2-05				
	P3-05				
5 ^a (B5)	P1-00	3	84	2,74	0,07
	P2-00				
	P3-00				
6 ^a (B6)	P1-AE	6	81 - 84	2,59	0,21
	P2-AE				
	P3-AE				

A Figura 3.21 apresenta o modo de ruptura dos corpos-de-prova no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Figura 3.21 – Modo de ruptura do corpos-de-prova na determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de concreto.

3.1.8. Sistema de aquisição de dados

Para aquisição simultânea dos sinais oriundos dos diversos extensômetros de resistência elétrica, das régua de deslocamento linear e do transdutor de pressão foi utilizado o sistema de aquisição de dados modelo NI-PXI 1052 - Combo (PXI-SCXI), com velocidade de leitura de 330k amostras por segundo, do fabricante NATIONAL INSTRUMENTS S/A, interligado a um computador PC. Para interface com o usuário foi usado o software LABVIEW 6.0 do mesmo fabricante (Figura 3.23).



Figura 3.22 – Moldagem de corpo corpos-de-prova cilíndricos da 5ª betonada.

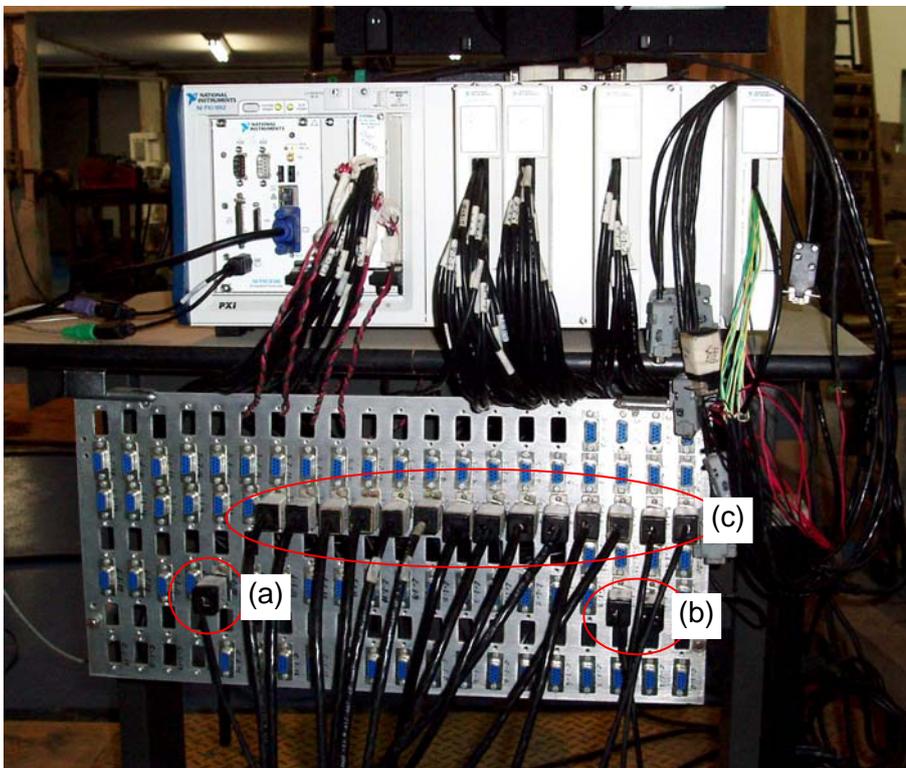


Figura 3.23 – Vista do sistema de aquisição de dados, (a) conexão do transdutor de pressão, (b) conexão das RDL e (c) conexão dos extensômetros.

3.1.9. Sistema de aplicação de forças

Para aplicação de forças nos pilares foi utilizado um pórtico metálico (1) montado na laje de reação (2), de modo que os atuadores hidráulicos (3) pressionam o pilar (4) contra a laje de reação (2).

Conforme mostrado na Figura 3.24 e na Figura 3.25, na extremidade superior do pilar (4) foram colocadas duas placas metálicas (5) e um cilindro de aço (8), entre essas e os atuadores hidráulicos (3) foi colocado um perfil “tipo I” (6) para distribuir a força dos dois atuadores (3) para o pilar (4). Na base do pilar (4) foi usado um cilindro de aço (8) entre duas placas metálicas (7), de modo a simular um apoio tipo segundo gênero. As placas metálicas (7) se apóiam em uma terceira placa (9) que transmite a força para a laje de reação (2).

O eixo do perfil (6) e eixo do cilindro de aço (8) foram posicionados no mesmo alinhamento do eixo de aplicação da força (11), de modo que o eixo de aplicação de força (11) ficou com a excentricidade de 20 mm, com relação ao eixo de simetria (14) do pilar (4), no sentido da *Face A*, (Figura 3.24).

O movimento do pilar, na extremidade superior foi travado na direção *x* do *Plano XY* por meio dos perfis vazados (12) e de parafusos (13).

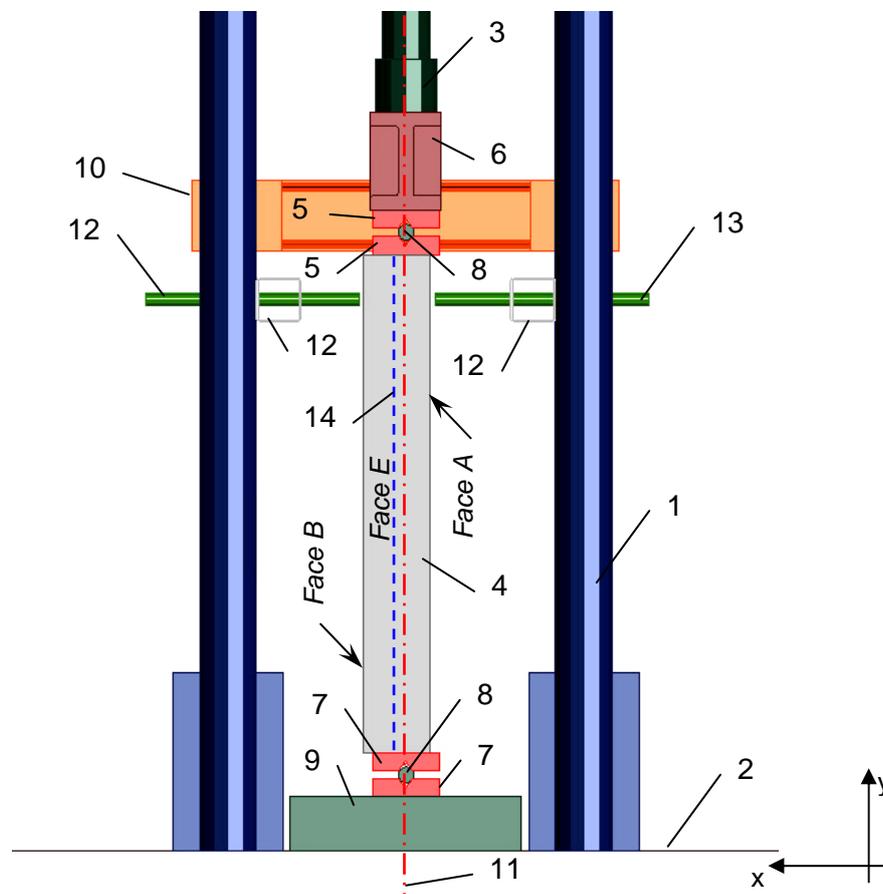


Figura 3.24 – Sistema de aplicação de força nos pilares (*plano XY*).

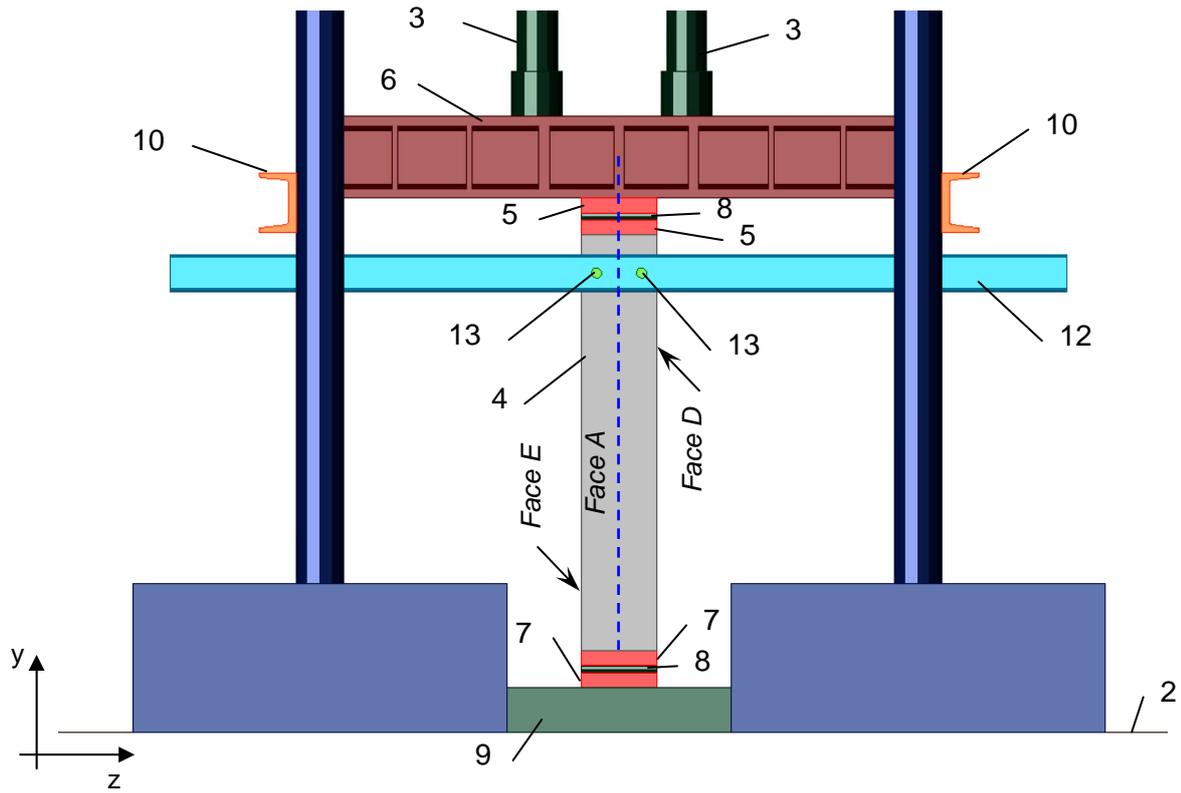


Figura 3.25 – Sistema de aplicação de força nos pilares (*plano YZ*).

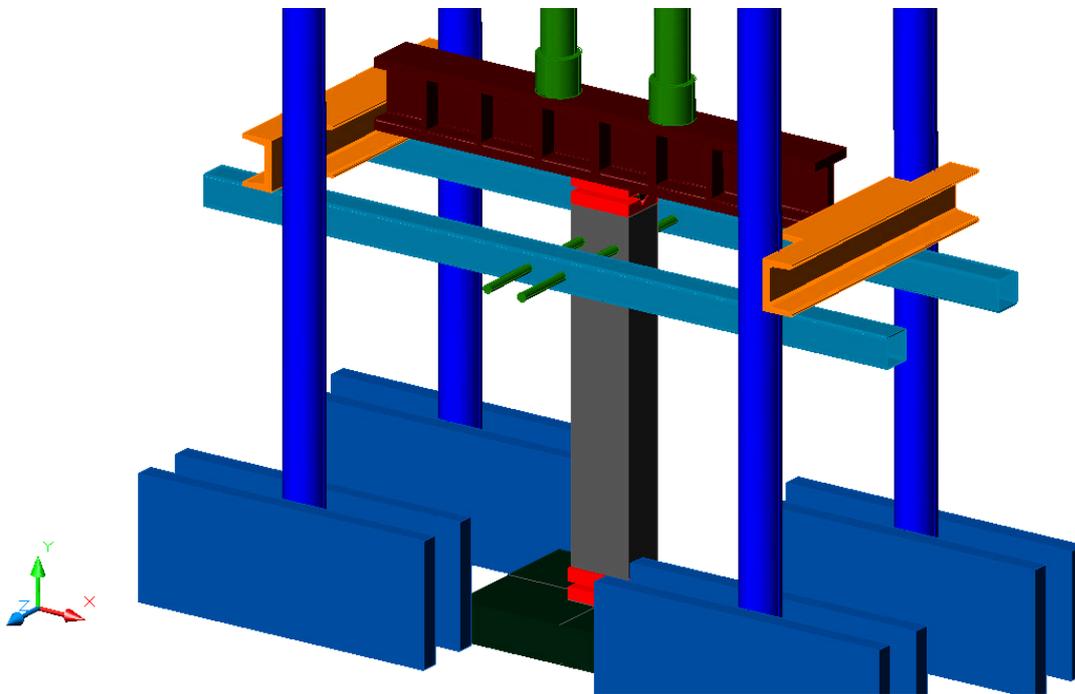


Figura 3.26 – Sistema de aplicação de força nos pilares (perspectiva).

O movimento do perfil “tipo I” (6), na porção superior do pórtico de aplicação de força foi travado na direção z do *Plano YZ* por meio dos perfis “tipo C” (10), conforme pode ser visto na Figura 3.25.



Figura 3.27 – Montagem do sistema de aplicação de força nos pilares.

Na realização do primeiro ensaio (pilar P2-25) as extremidades superior e inferior romperam prematuramente (Figura 3.28). O ensaio foi interrompido e as extremidades do pilar foram recuperadas, reforçando-as como indicado na Figura 3.29. Esse reforço foi feito em todos os pilares.

Para a realização do reforço das extremidades dos pilares foram utilizados 36 anéis metálicos confeccionados com chapas de aço com 2,0 mm de espessura. A altura dos anéis foi de 200 mm. O reforço foi realizado da seguinte forma: os pilares foram posicionados e nivelados sobre a laje de reação do laboratório e os anéis foram posicionados em uma das extremidades; em seguida, o espaço compreendido entre o anel metálico e o pilar foi preenchido com *grout*; no dia seguinte foi realizado o reforço da outra extremidade.



Figura 3.28 – Ruptura prematura das extremidades do pilar P2-25 durante o primeiro ensaio.



Figura 3.29 – Etapa de reforço das extremidades dos pilares.