

3 Programa Experimental

3.1. Características dos Pilares

Foram ensaiados seis pilares com as características mostradas na Figura 3.1. Os pilares têm seção transversal retangular de 12,5 cm x 15 cm e altura de 2,10 m. As variáveis consideradas são a taxa de armadura longitudinal ρ e a excentricidade e da carga aplicada em cada pilar (Tabela 3.1). O índice de esbeltez dos pilares, expresso como $\lambda = l_e / i$, onde l_e representa o comprimento de flambagem e i o raio de giração, foi igual a 58.

Tabela 3.1 – Nomenclatura dos pilares.

Pilares	Excentricidade (cm)	Área de aço (cm ²)
$E1,5 - \rho0,4\%$	1,5	0,76
$E2,0 - \rho0,4\%$	2,0	0,76
$E2,5 - \rho0,4\%$	2,5	0,76
$E1,5 - \rho4\%$	1,5	7,50
$E2,0 - \rho4\%$	2,0	7,50
$E2,5 - \rho4\%$	2,5	7,50

3.2. Forma e Concretagem

As formas foram feitas com chapas de compensado de 15 mm de espessura, e sarrafos a cada 50 cm para a contenção de aberturas durante a concretagem, como mostra o esquema das Figuras 3.1 e 3.2. Para um melhor acabamento, no topo dos pilares foram colocadas placas de vidro de 0,4 mm de espessura para se obter uma superfície plana, visando uma melhor distribuição da carga.

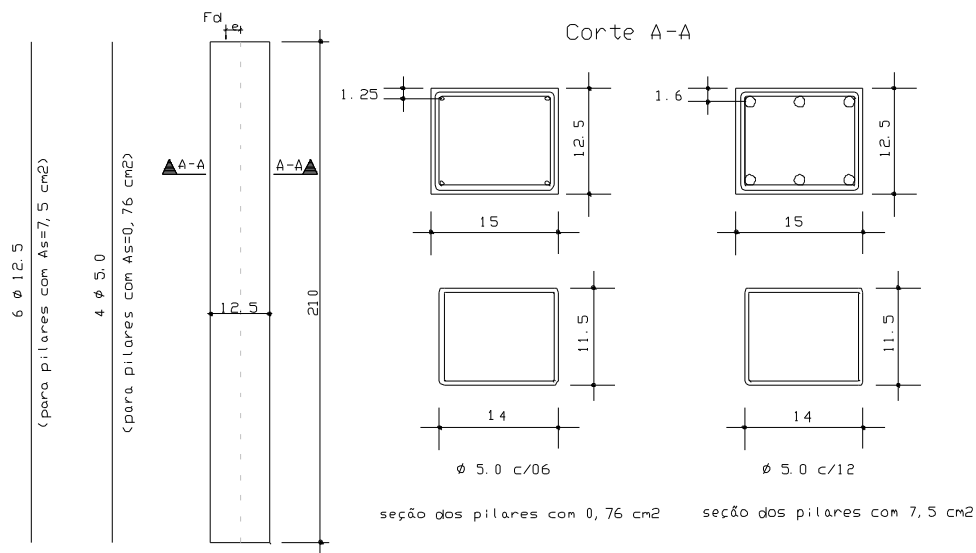


Figura 3.1 – Características dos pilares (cotas em centímetros).

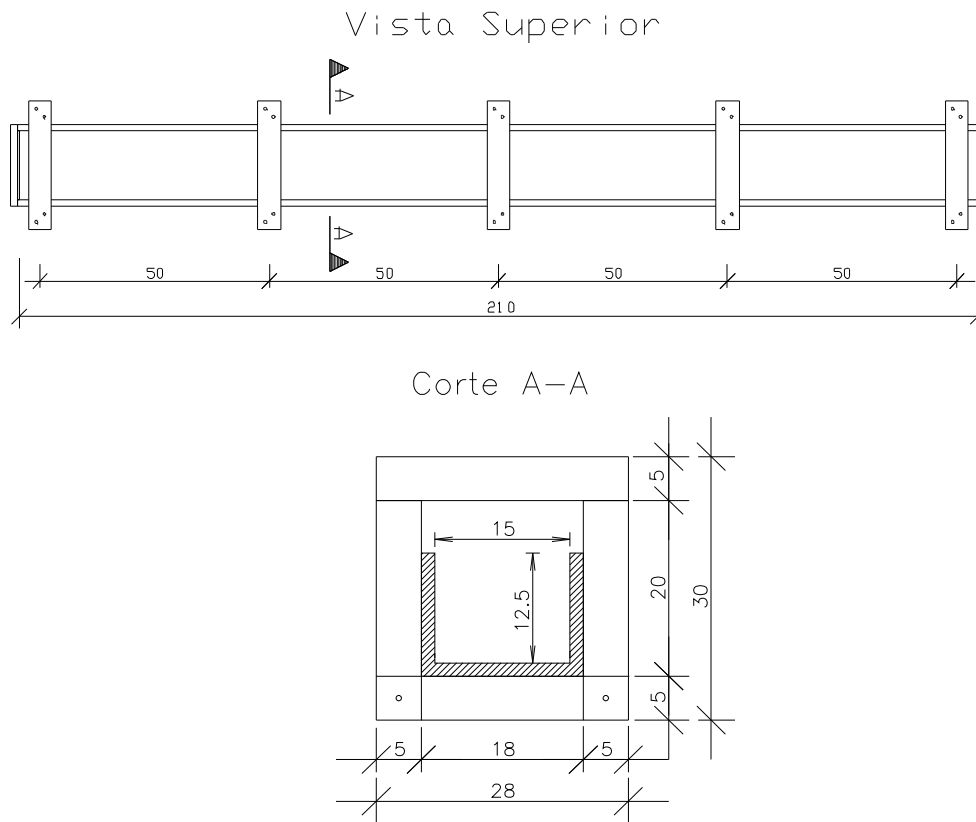


Figura 3.2 – Detalhe das formas.

O traço em peso do concreto utilizado foi 1:1,54:1,41 (cimento: areia: brita), e o fator água/cimento foi de 0,48. O cimento empregado foi do tipo CII-E-32 Mauá. A areia era de rio lavada, e o agregado graúdo era do tipo gnaiss britado com dimensão máxima de 9,5 mm. O consumo de materiais foi o mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Quantidade de material por m³ de concreto.

Consumo de materiais (kg/m ³ de concreto)	
Cimento	500
Areia	768
Brita	704
Água	240

O concreto foi misturado mecanicamente em uma betoneira de 250 litros, e foram moldados 18 corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm, sendo seis corpos-de-prova para cada betonada.

3.3. Propriedades do Concreto

a) Resistência à Compressão

A resistência do concreto foi obtida em corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm. Os corpos-de-prova e os pilares foram desformados aos sete dias de idade e permaneceram expostos ao ar livre. As resistências dos corpos-de-prova foram determinadas aos 7, 28 e 174 dias por meio de ensaios de compressão simples. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 3.3 e na Figura 3.3. Aos 28 dias foram realizados testes para determinação do diagrama tensão-deformação específica do concreto, segundo recomendações da NBR 8522/84 [29].

Tabela 3.3 – Resultados dos teste de compressão simples com corpos-de-prova.

Idades (dias)	1ª Bet.		2ª Bet.		3ª Bet	
	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Carga (kN)	Resistência (MPa)
7	22,9	26,2	23,4	29,8	25,7	32,7
28	28,2	35,9	28,1	35,7	29,2	37,2
174	30,7	39,1	32,9	41,9	36,2	46,1
Média de Resistência MPa (idade 7 dias)				29,6		
Média de Resistência MPa (idade 28 dias)				36,3		
Média de Resistência MPa (idade 174 dias)				42,4		

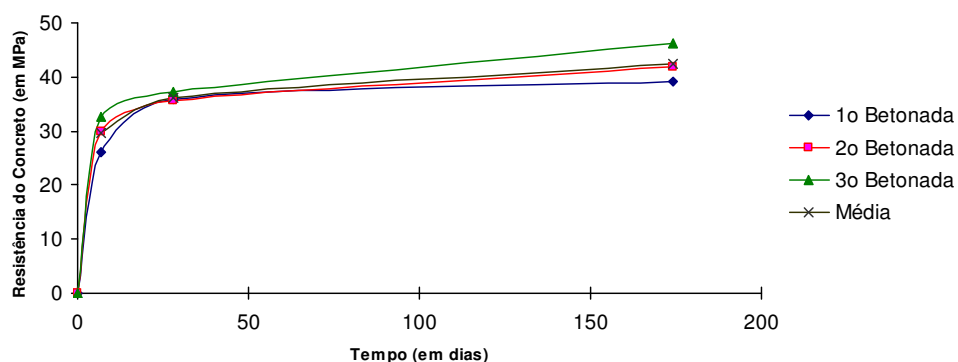


Figura 3.3 – Diagrama Tensão x Idade do concreto.

b) Diagrama Tensão-Deformação Específica

Para a obtenção deste diagrama, três corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm, instrumentados com dois extensômetros elétricos de 67 mm cada (Fig. 3.5), foram ensaiados de acordo com as recomendações da NBR 8522/84 [29] com plano de carga III. Neste ensaio as leituras das deformações são feitas da seguinte maneira:

- leitura l_0 à tensão $\sigma_{inf} = 0,5 MPa$
- leitura $l_{0,1}$ à tensão $0,1 f_c$
- leitura $l_{0,2}$ à tensão $0,2 f_c$

- leitura $l_{0,3}$ à tensão $0,3f_c$
- leitura $l_{0,4}$ à tensão $0,4f_c$
- leitura $l_{0,5}$ à tensão $0,5f_c$
- leitura $l_{0,6}$ à tensão $0,6f_c$
- leitura $l_{0,7}$ à tensão $0,7f_c$
- leitura $l_{0,8}$ à tensão $0,8f_c$

e a partir da leitura ($l_{0,8}$) prossegue-se o carregamento até a ruptura.

Os resultados obtidos estão mostrados na Figura 3.4 e na Tabela 3.4.

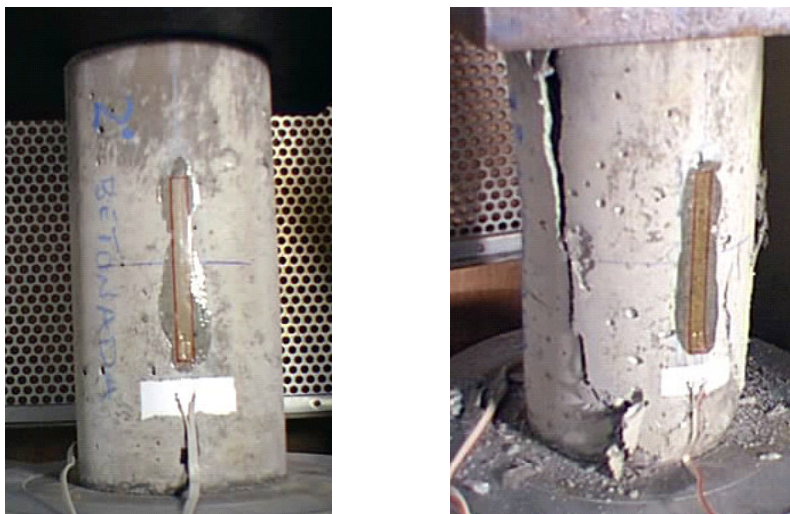


Figura 3.4 – Detalhe da instrumentação dos corpos-de-prova nos ensaios para obtenção do diagrama tensão-deformação específica do concreto.

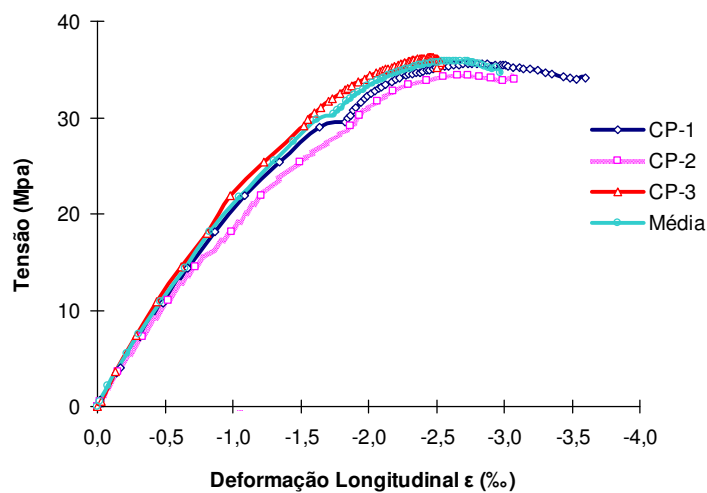


Figura 3.5 – Diagrama tensão-deformação específica do concreto.

c) Cálculo do Módulo de Elasticidade (Secante) pela NBR 8522 [29]

O módulo de deformação secante é calculado pela equação 3.17:

$$E_{\text{sec},n} = \frac{\sigma_n - \sigma_{\text{inf}}}{\varepsilon_n - \varepsilon_o} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde:

$E_{\text{sec},n}$ = módulo de deformação secante correspondente à inclinação da reta unindo os pontos do diagrama tensão-deformação específica relativos às tensões σ_n e $\sigma_{\text{inf}} = 0,5 \text{ MPa}$;

σ_n = tensão considerada para o cálculo do módulo secante;

ε_n = deformação específica correspondente a tensão σ_n ;

ε_o = deformação específica correspondente a leitura l_0 ;

$n = 0,1, 0,2, \dots, 0,7$ ou $0,8$.

Tabela 3.4 – Módulo de elasticidade secante do concreto aos 28 dias.

	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>
0,1 f_c	25,74
0,2 f_c	24,23
0,3 f_c	22,80
0,4 f_c	21,81
0,5 f_c	20,60
0,6 f_c	20,36
0,7 f_c	19,14
0,8 f_c	17,80

3.4.

Propriedades Mecânicas do Aço

As curvas tensão-deformação específica, e os valores da tensão de escoamento e do módulo de elasticidade das barras de aço empregadas nos pilares foram determinados por meio de ensaios de tração simples. Os resultados encontram-se nas Figuras 3.6 a 3.11 e na Tabela 3.5.

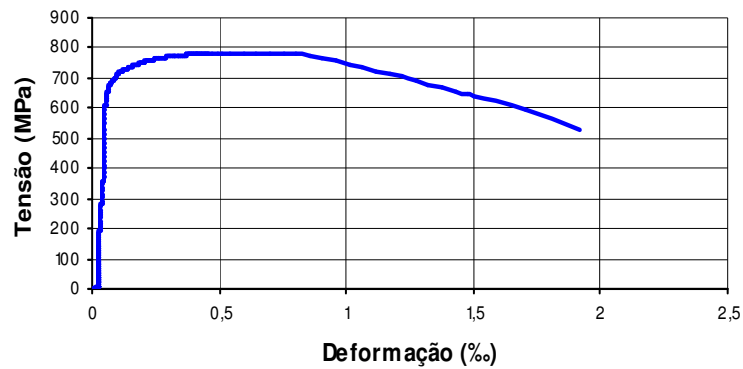


Figura 3.6 – Diagrama tensão x deformação específica da primeira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 5 mm.

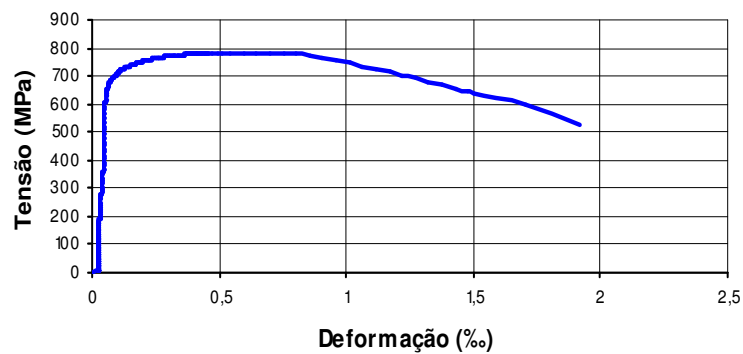


Figura 3.7 – Diagrama tensão x deformação específica da segunda barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 5 mm.

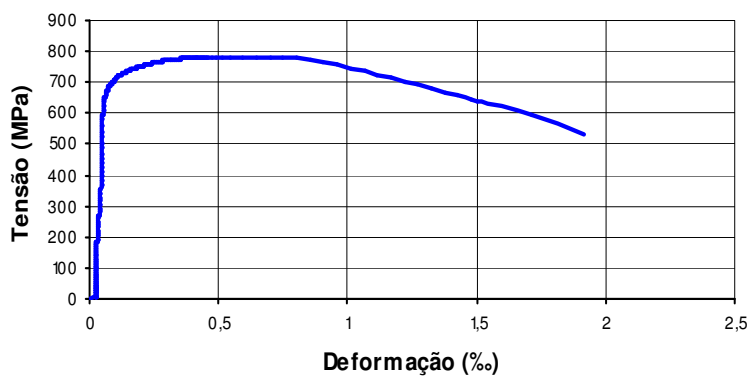


Figura 3.8 – Diagrama tensão x deformação específica da terceira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 5 mm.

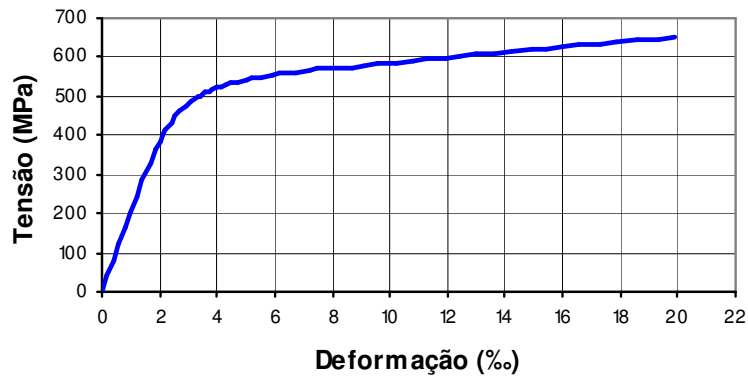


Figura 3.9 – Diagrama tensão x deformação específica da primeira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 12,5mm.

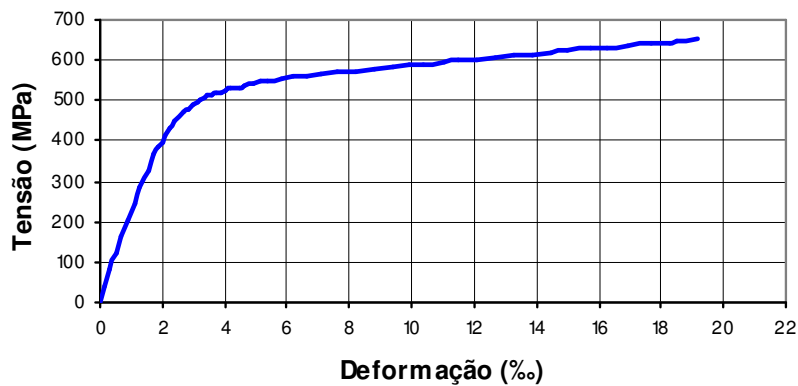


Figura 3.10 – Diagrama tensão x deformação específica da segunda barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 12,5mm.

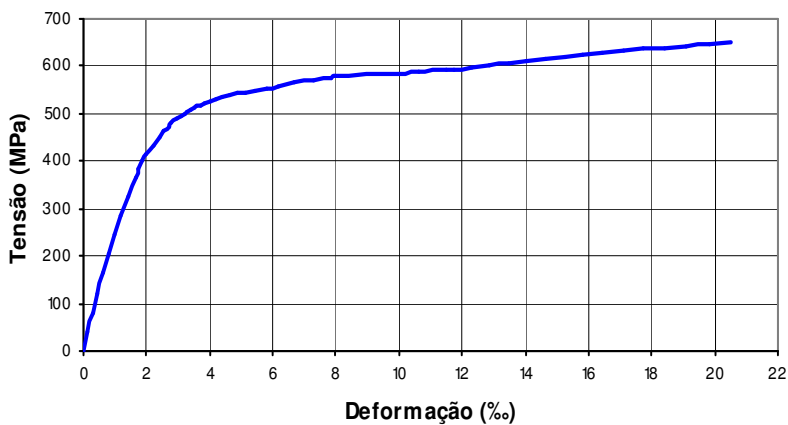


Figura 3.11 – Diagrama tensão x deformação específica da terceira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 12,5mm.

Tabela 3.5 – Resultados dos teste de tração nas amostras de aço.

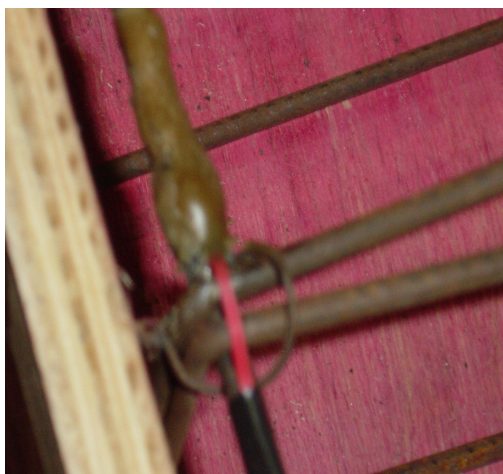
	Amostra	Tipo de aço	Diâmetro (mm)		Área (cm ²)	Carga (kN)		Tensão (MPa)		E _s (GPa)
			Nominal	Real		Escoamento	Ruptura	Escoamento	Ruptura	
$\phi 5mm$	1	CA-60	5,0	5,0	0,196	13,94	14,62	709,99	744,31	187,14
	2	CA-60	5,0	5,10	0,204	14,13	15,69	691,58	768,27	211,73
	3	CA-60	5,0	5,10	0,204	14,06	15,35	688,49	751,31	243,75
Média				5,06	0,201	14,04	15,22	696,69	754,63	214,20
$\phi 12,5mm$	1	CA-50	12,5	12,40	1,207	64,62	100	533,74	828,5	214,14
	2	CA-50	12,5	12,40	1,207	64,62	99	535,77	820,21	203,72
	3	CA-50	12,5	12,30	1,188	63,41	98	533,74	824,92	217,06
Média				12,37	1,201	64,17	99	534,41	824,54	211,71

3.5.

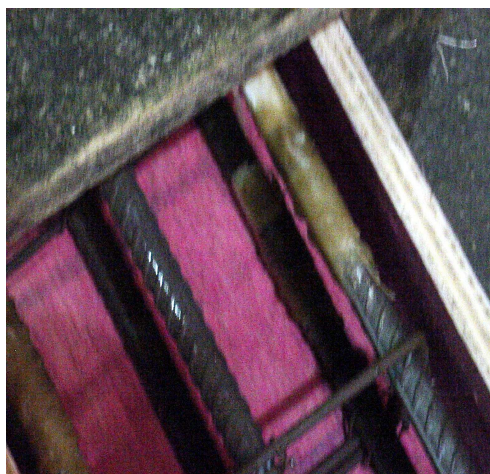
Instrumentação dos Pilares

a) Deformações nas armaduras

Em todos os pilares foram colocados quatro extensômetros elétricos com base de medição de 5 mm. Eles foram posicionados na seção média dos pilares, sendo um em cada barra da armadura longitudinal do pilar com $A_s = 0,76 \text{ cm}^2$ (4 ϕ 5mm), e no caso dos pilares com $A_s = 7,5 \text{ cm}^2$ (6 ϕ 12,5mm), um em cada uma das quatro barras dos cantos.



(a)



(b)

Figura 3.12 – (a) Detalhe dos extensômetros elétricos de resistência nos pilares com $A_s = 0,75 \text{ cm}^2$ (4 ϕ 5mm), (b) Detalhe do extensômetros elétricos de resistência nos pilares com $A_s = 7,5 \text{ cm}^2$ (6 ϕ 12,5mm).

b) Deformações no concreto

Os seis pilares foram instrumentados com dois extensômetros elétricos com 67 mm de comprimento, ambos na seção média do pilar, localizados em faces opostas (Figuras 3.13 e 3.14).

c) Deslocamento transversal

Os deslocamentos transversais foram medidos na seção média dos pilares por meio de relógios comparadores (Figuras. 3.13 e 3.14)

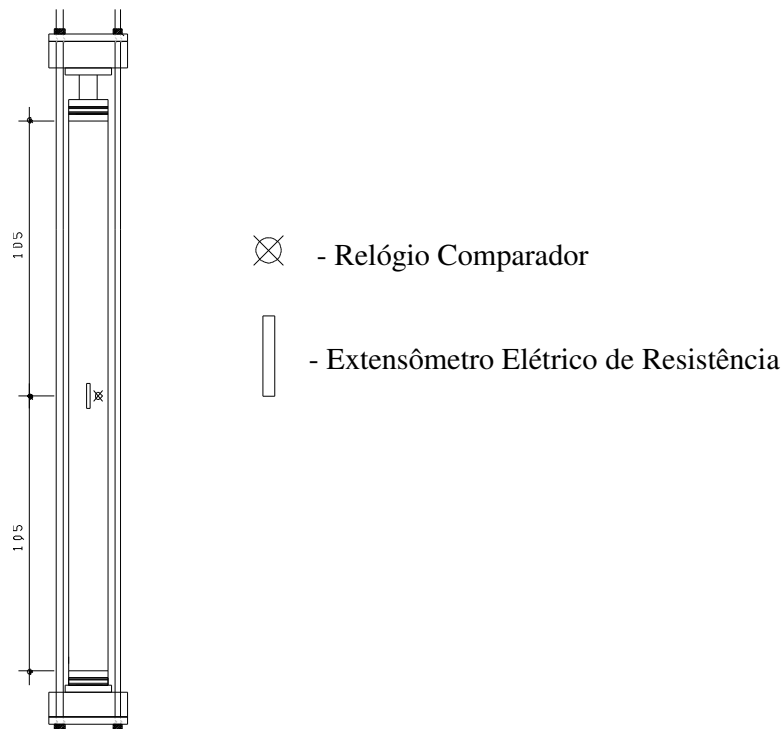


Figura 3.13 – Instrumentação dos pilares.

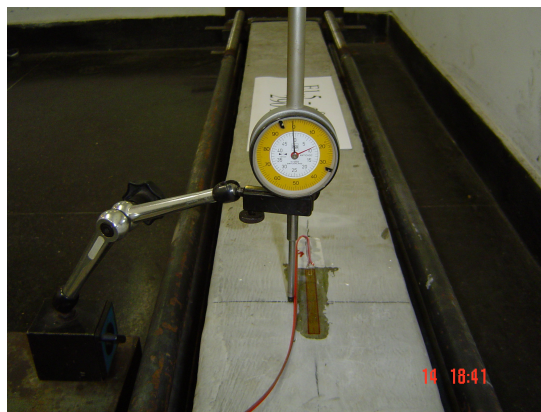


Figura 3.14 – Instrumentação do pilar E1,5-p0,4%.

3.6.

Sistema de aplicação de carga

A aplicação e manutenção da carga em cada pilar foram feitas por meio de um aparato formado por barras e apoios metálicos colocados nas extremidades dos pilares (Figs. 3.15 e 3.16). O pilar de concreto, posicionado entre esses apoios, era comprimido apertando-se as porcas das extremidades de cada barra do sistema. O monitoramento da carga aplicada era feito com a célula de carga colocada entre um dos apoios e o pilar (Figs. 3.15, 3.16, 3.17a e 3.17b).

O sistema de aplicação de carga permite a rotação num plano nas duas extremidades dos pilares.

3.7.

Aquisição de dados

A leitura das deformações, cargas aplicadas e deslocamento transversal foram feitas por meio de um indicador de deformação portátil, modelo P-350A, marca Vishay, de um multímetro e de um relógio comparador, respectivamente (Fig. 3.18 e 3.19).

3.8.

Procedimento de ensaio

Os ensaios foram executados com os pilares na posição horizontal. A carga foi aplicada através de porcas nas extremidades das barras que formavam o pórtico de reação. Uma vez atingido o valor desejado da carga, iniciavam-se as leituras das deformações e dos deslocamentos transversais em intervalos de tempo adequados. Para manter constante o valor da carga aplicada, esta tinha de ser ajustada periodicamente (apertando-se as porcas) devido à perda causada pela fluência do concreto. Esse ajuste era feito sempre que a perda atingia 3% do valor da carga.

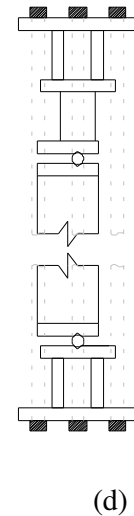
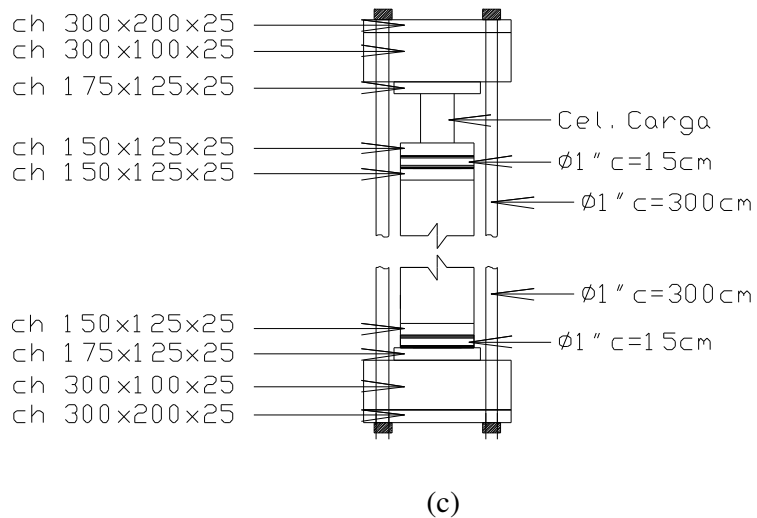
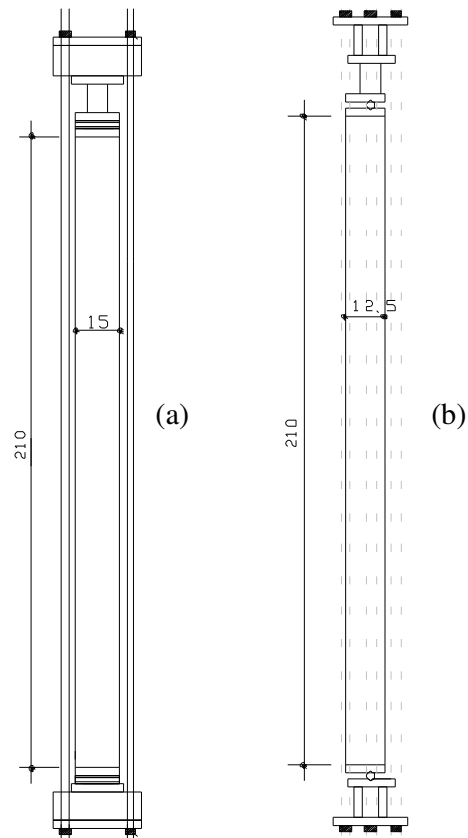


Figura 3.15 – (a) Vista frontal dos pórticos de reação para pilares com $p=0.4\%$; (b) Vista lateral dos pórticos de reação; (c) Detalhe das extremidades superior e inferior, vista frontal; (d) Detalhe das extremidades superior e inferior, vista lateral.

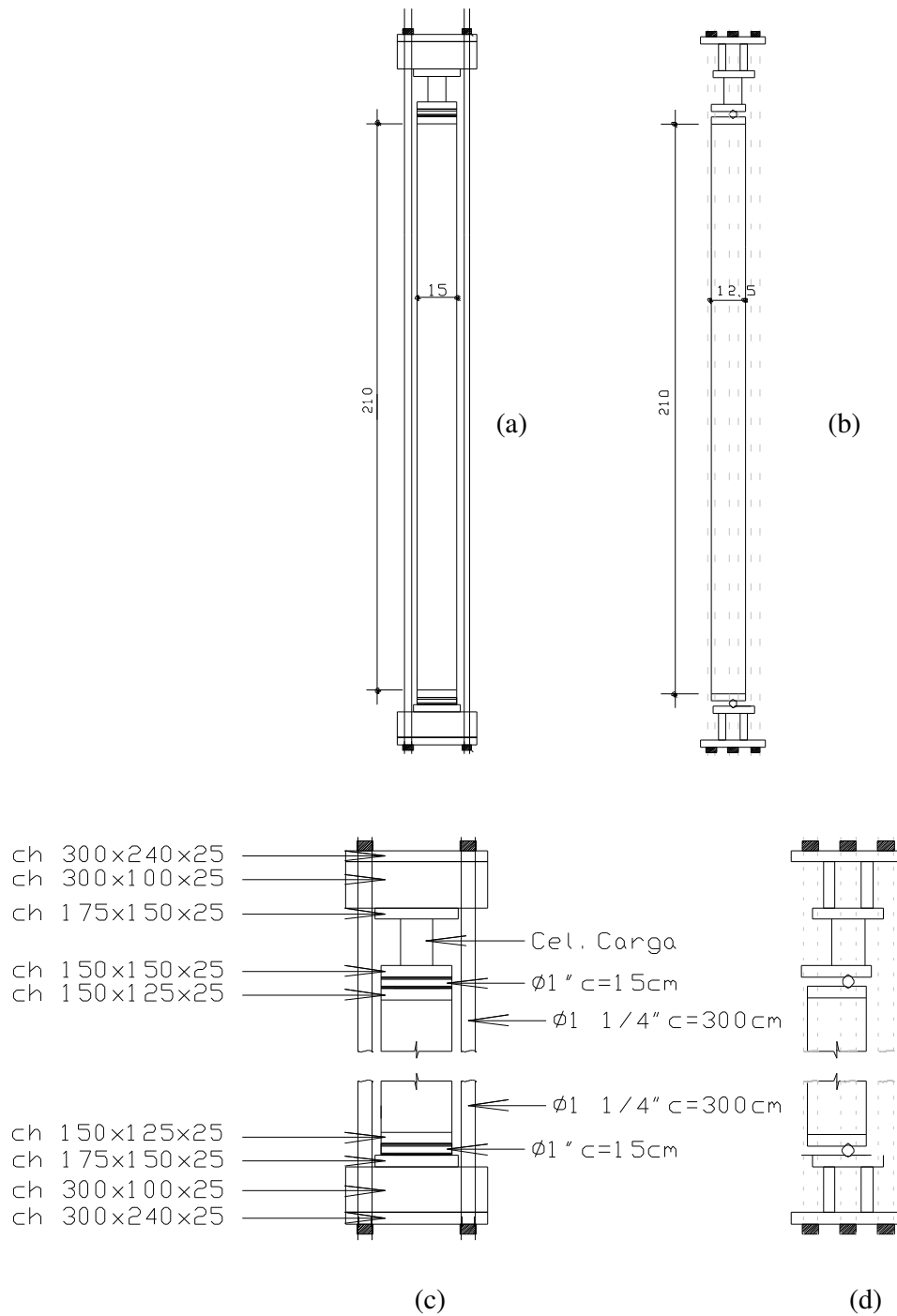
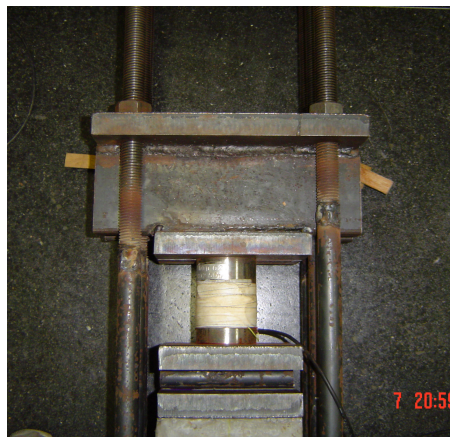
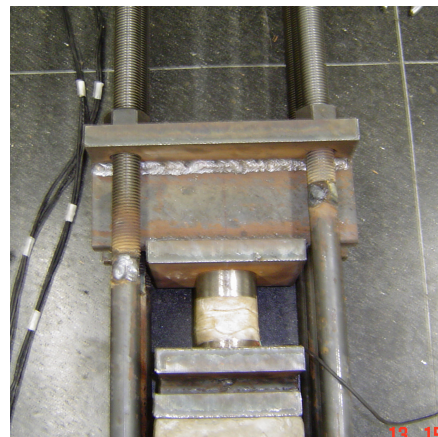


Figura 3.16 – (a) Vista frontal dos pórticos de reação para pilares com $p=4\%$; (b) Vista lateral dos pórticos de reação; (c) Detalhe das extremidades superior e inferior, vista frontal; (d) Detalhe das extremidades superior e inferior, vista lateral.



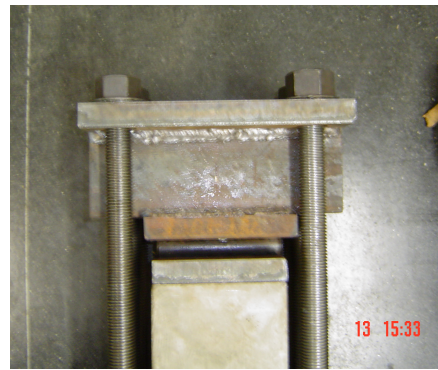
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.17 – Detalhe das extremidades superiores e inferior dos pórticos, (a) e (c) pórticos para os pilares com $\rho=0,4\%$, (b) e (d) pórticos para os pilares com $\rho=4\%$.



Figura 3.18 - Indicador de deformação portátil e multímetro.

Os valores das cargas aplicadas nos pilares foram as indicadas na Tabela 3.6. Os valores da carga última P_u foram calculados com base nas prescrições da NBR6118, adotando-se o diagrama parábola-retângulo para as tensões de compressão no concreto. Neste cálculo a fluência do concreto não foi considerada, os coeficientes de minoração das resistências do concreto e do aço foram tomados iguais a 1, e a excentricidade de segunda ordem foi calculada pela expressão da NBR 6118 [27].

Tabela 3.6 – Valores das cargas aplicadas nos pilares.

Pilares	Carga Aplicada (kN)	P/P_u
E1,5- ρ 0,4%	290	0,80
E2,0- ρ 0,4%	260	0,80
E2,5- ρ 0,4%	240	0,80
E1,5- ρ 4%	530	0,80
E2,0- ρ 4%	490	0,80
E2,5- ρ 4%	460	0,80

P = carga aplicada no pilar; P_u = carga última do pilar.

Os ensaios foram realizados em uma sala com ar-condicionado (Figura 3.20), com temperatura variando entre 18,5 °C e 20,1 °C e umidade relativa do ar variando entre 65% e 84% (Figuras 3.20 e 3.21).



Figura 3.19 – Vista geral do local onde foram realizados os ensaios.

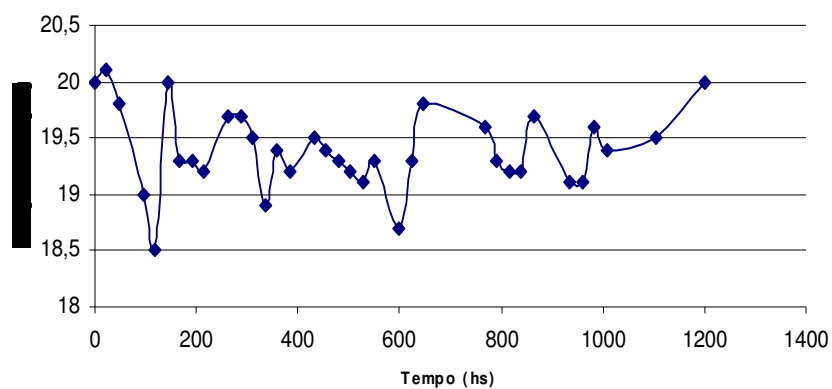


Figura 3.20 – Variação da temperatura durante o período dos ensaios.

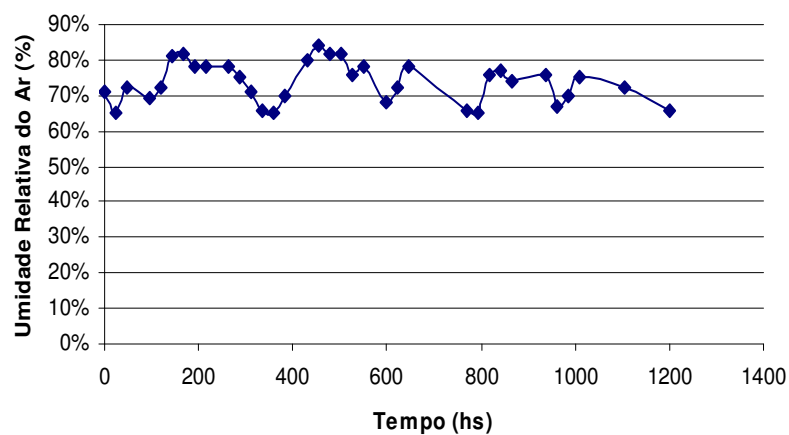


Figura 3.21 – Variação da umidade relativa do ar durante o período dos ensaios.