

3 Programa Experimental

3.1. Considerações iniciais

O estudo experimental desta pesquisa foi realizado no laboratório de estruturas e materiais (LEM) da PUC-Rio com o fim de analisar o comportamento de pilares esbeltos de concreto de alta resistência submetidos à flexão composta reta e oblíqua.

A seção transversal e comprimento do pilar foram escolhidos para que o índice de esbeltez seja maior a esbeltez limite ($\lambda > \lambda_1$) em cada direção e em função da capacidade da máquina de ensaio.

As variáveis estudadas foram: a resistência à compressão do concreto, a taxa geométrica de armadura longitudinal e a excentricidade da força.

Foram ensaiados oito pilares com seção transversal de 25x15 cm e comprimento de 300 cm, compondo duas séries de 4 pilares cada uma. Na primeira série, a resistência do concreto foi de 40 MPa e os pilares foram ensaiados à flexão composta oblíqua. Na segunda série, a resistência do concreto foi de 70 MPa e os pilares foram ensaiados à flexão composta reta. Em cada série, a principal variável foi a taxa geométrica de armadura longitudinal que assumiu os valores 1,3%, 2,1%, 3,2% e 4,3%. A finalidade foi verificar os valores da excentricidade de segunda ordem que devem ser considerados no dimensionamento de pilares de concreto de alta resistência.

3.2. Pilares ensaiados

3.2.1. Características geométricas e nomenclatura

A geometria de cada pilar foi a mesma, com seção transversal de 25 cm x 15 cm e 300 cm de altura.

A nomenclatura dos pilares é baseada na descrição das variáveis estudadas, deste modo, foram divididos em duas séries:

Série I → B40 – ρ (%)

Série II → U70 – ρ (%)

onde: B é pilar à flexo-compressão biaxial (Flexão composta oblíqua);

U é pilar à flexo-compressão uniaxial (Flexão composta reta);

40 ou 70 referem-se à resistência do concreto;

ρ (%) é o valor da taxa geométrica de armadura longitudinal em porcentagem.

A Tabela 3.1 apresenta os valores da altura do pilar (H), da seção transversal (b x h), do comprimento de flambagem (l_e é a distância entre os centros das rótulas dos apoios), das excentricidades de 1ª ordem (e_1), da esbelteza (λ), da esbelteza limite (λ_1) e das taxas geométricas de armaduras longitudinais (ρ).

Tabela 3.1 – Características dos pilares ensaiados

Série	Pilar	H (cm)	b (cm)	h (cm)	l_e (cm)	e_1 (cm)		λ		λ_1		Armadura Longitudinal	
						e_x	e_y	x	y	x	y	A_s	ρ (%)
I	B40 - 1,3	300	25	15	325	3,3	2	45	75	27	27	6 Ø 10	1,30
	B40 - 2,1				329	3,3	2	46	76	27	27	4 Ø 16	2,10
	B40 - 3,2				329	3,3	2	46	76	27	27	6 Ø 16	3,20
	B40 - 4,3				330	3,3	2	46	76	27	27	8 Ø 16	4,30
II	U70 - 1,3	300	25	15	317	0	3	44	73	25	28	6 Ø 10	1,30
	U70 - 2,1				318	0	3	44	73	25	28	4 Ø 16	2,10
	U70 - 3,2				318	0	3	44	73	25	28	6 Ø 16	3,20
	U70 - 4,3				316	0	3	44	73	25	28	8 Ø 16	4,30

3.2.2. Detalhamento das armaduras

As Figuras 3.1 a 3.4 apresentam o detalhamento das armaduras longitudinais e transversais dos pilares ensaiados. A armadura transversal de todos os pilares é a mesma, utilizando barras de diâmetro de 5 mm com espaçamento de 15 cm.

A armadura de fretagem foi disposta nas extremidades dos pilares com a finalidade de evitar uma ruptura prematura localizada nesta região.

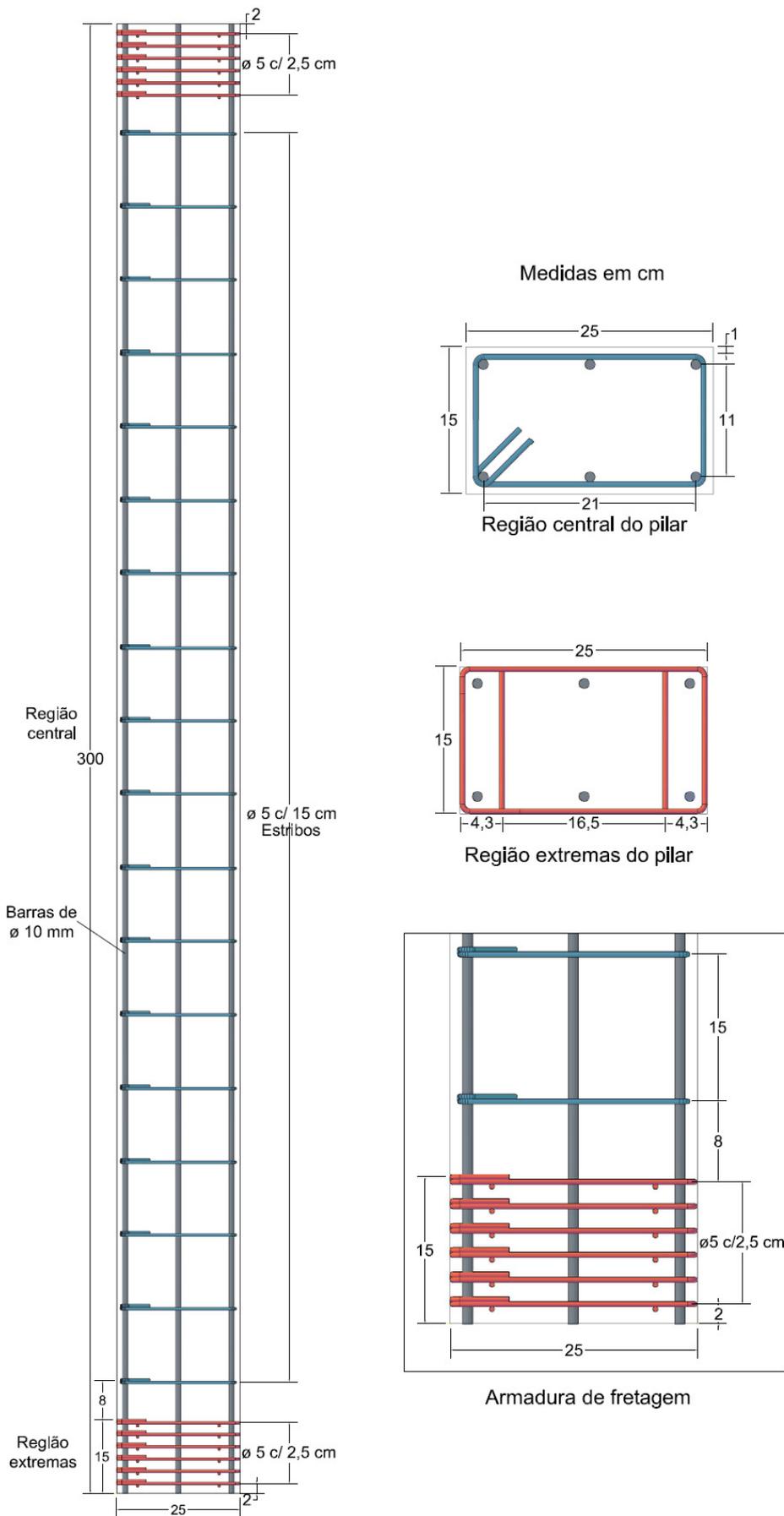


Figura 3.1 – Detalhe das armaduras dos pilares B 40-1,3 e U 70-1,3

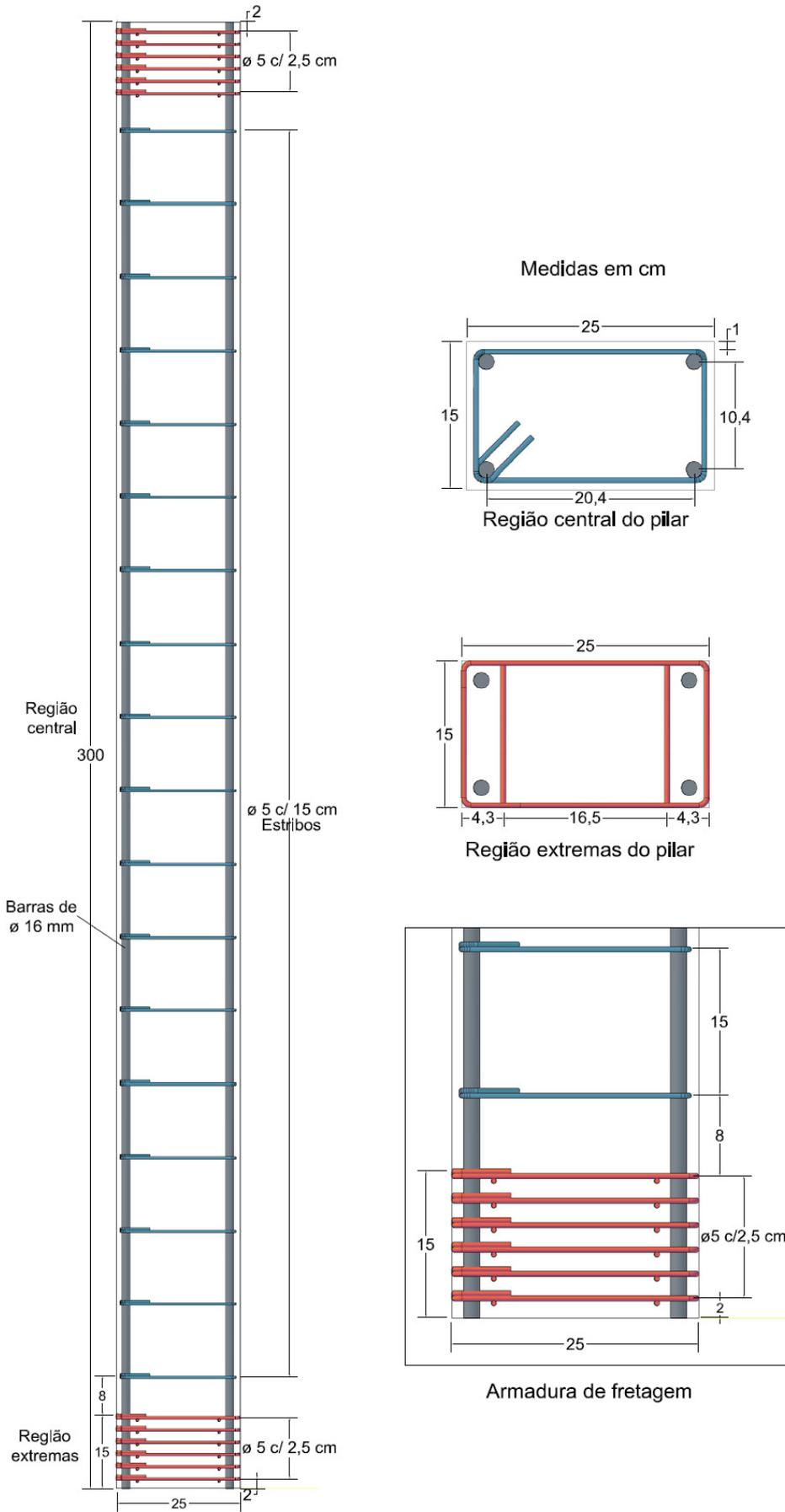


Figura 3.2 – Detalhe das armaduras dos pilares B 40-2,1 e U 70-2,1

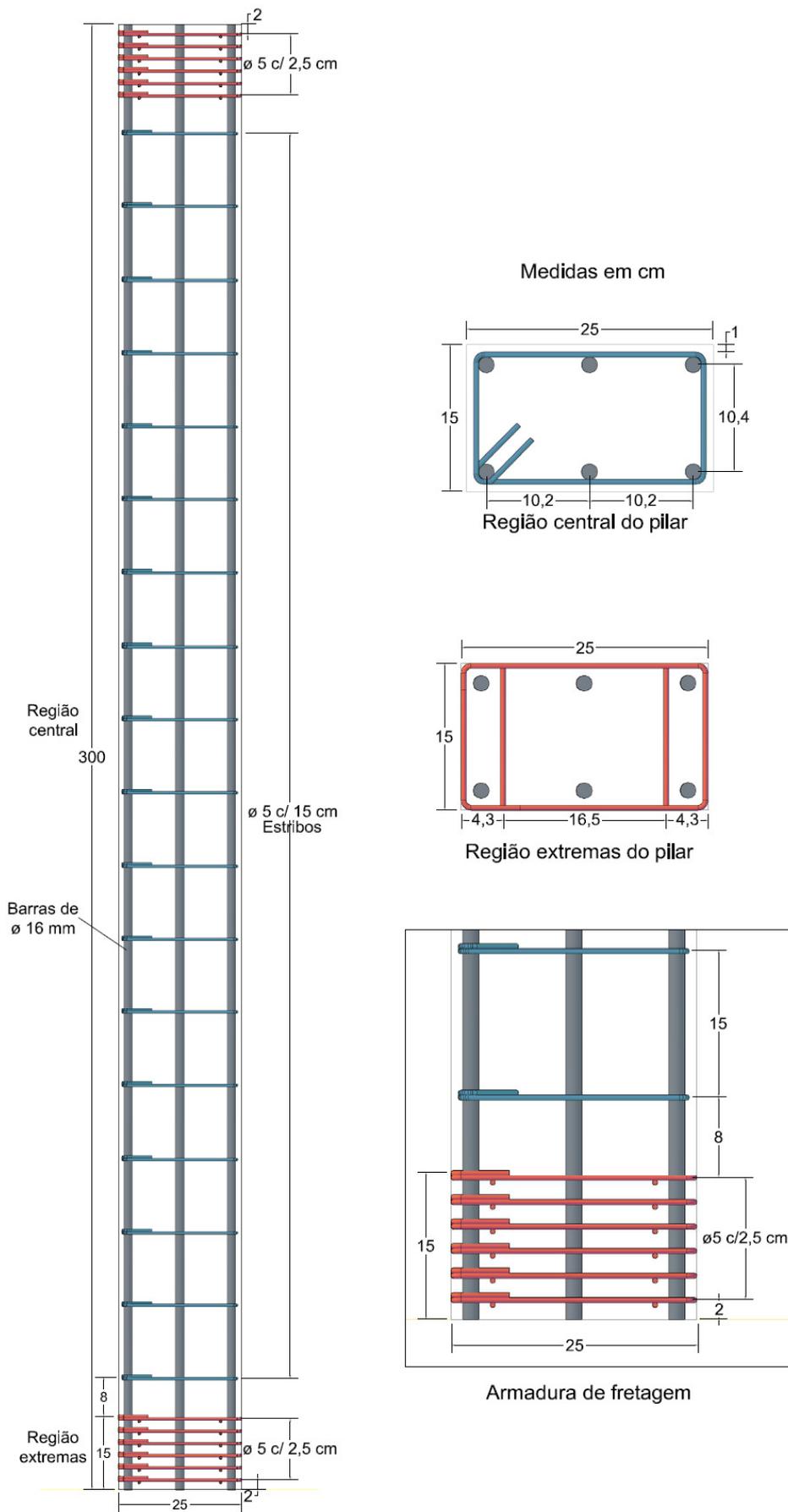


Figura 3.3 – Detalhe das armaduras dos pilares B 40-3,2 e U 70-3,2

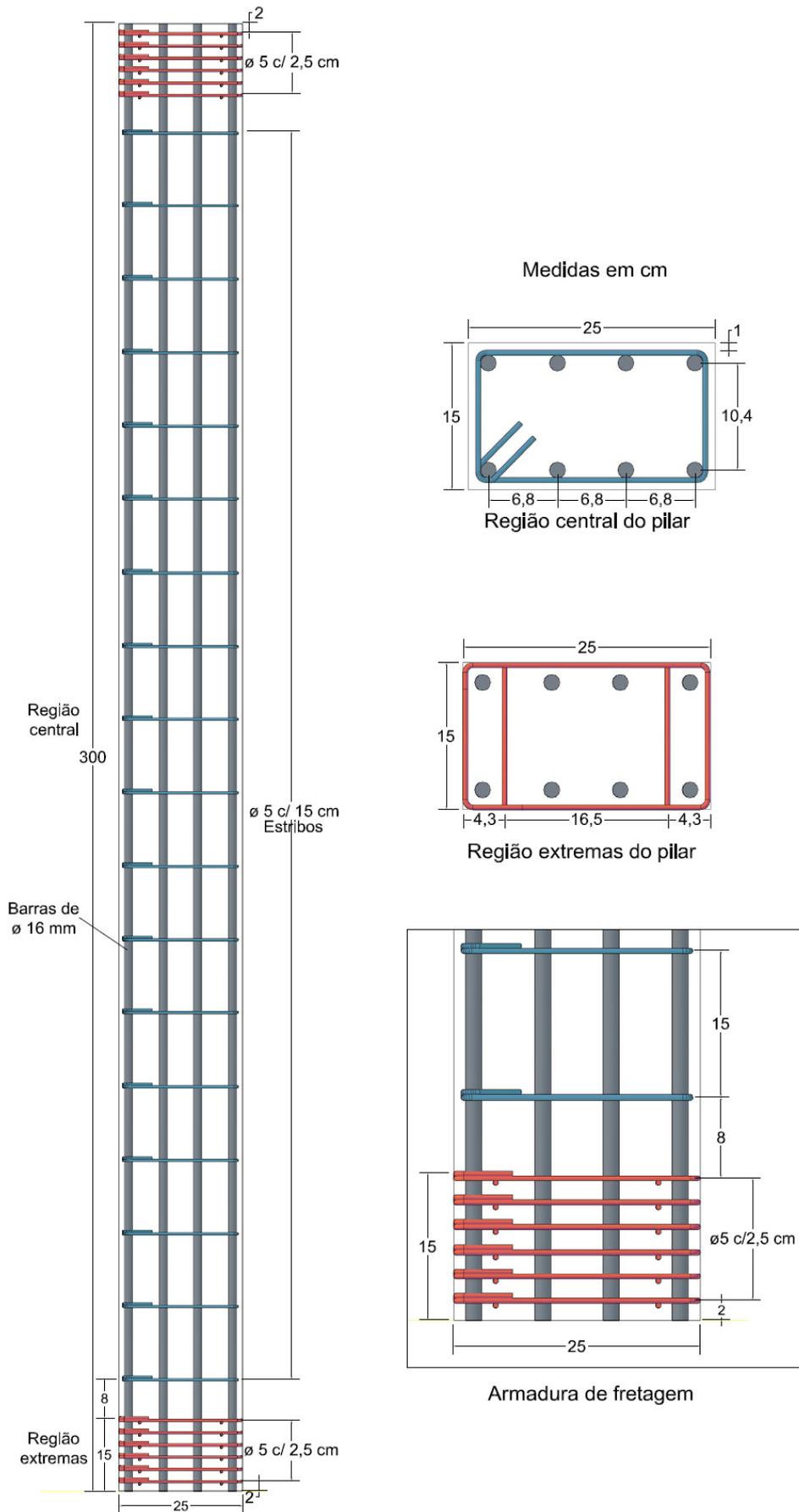


Figura 3.4 – Detalhe das armaduras dos pilares B 40-4,3 e U 70-4,3

3.3. Materiais utilizados

3.3.1. Cimento

O cimento Portland utilizado foi o CP-V-ARI-Fácil (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), fabricado pela Holcim do Brasil S.A., com uma massa específica de $3,12 \text{ g/cm}^3$ segundo a NBR 5733:1991.

3.3.2. Sílica ativa

A sílica ativa empregada foi a Silmix não densificada, com massa específica de $2,2 \text{ g/cm}^3$, determinada pelo fabricante. O produto foi doado pela empresa Tecnosil – Sílica Ativa.

3.3.3. Aditivo Superplastificante

Para a redução da água de amassamento, utilizou-se o aditivo superplastificante Adiment Premium da Vedacit, com densidade de $1,09 \text{ g/cm}^3$.

3.3.4. Agregado miúdo

A areia utilizada foi de rio e o material estava lavado. A análise granulométrica foi realizada no laboratório de estruturas e materiais (LEM) da PUC- Rio, conforme a NBR NM 248:2003. O módulo de finura determinado segundo NBR 7211:2005 foi de 2,70 (areia média). Os resultados são apresentados na Tabela 3.2. A correção da umidade foi de 6,4 %.

A massa específica, segundo a NBR NM 52:2003, foi de $2,61 \text{ g/cm}^3$, também, a massa unitária, conforme a NBR NM 45:2006, foi de $1,37 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 3.2 – Análise granulométrica do agregado miúdo

Peneiras	Malha (mm)	Resíduos		Resíduo Acumulado (%)	
		(g)	(%)	Passado	Retido
3/8	6,35	0,00	0,00	100,00	0,00
4	4,76	39,00	3,90	96,10	3,90
8	2,38	40,00	4,00	92,10	7,90
16	1,19	112,00	11,20	80,90	19,10
30	0,590	324,00	32,40	48,50	51,50
50	0,297	368,00	36,80	11,70	88,30
100	0,149	97,00	9,70	2,00	98,00
Fundo	-	20,00	2,00	0,00	
Totais		1.000,00	100,00		268,70
Dimensão máxima				4,8 mm	
Módulo de Finura				2,70	

3.3.5. Agregado graúdo

Como agregado graúdo foi utilizado pedra britada de origem gnaisse. A análise granulométrica é apresentada na Tabela 3.3 conforme a NBR NM 248:2003. A dimensão máxima característica do agregado foi de 19 mm, classificado como brita 1. A massa específica determinada segundo a NBR NM 52:2003 foi de 2,74 g/cm³ e a massa unitária conforme a NBR NM 45:2006 foi igual a 1,50 g/cm³.

Tabela 3.3 – Análise granulométrica do agregado graúdo

Peneiras	Malha (mm)	Resíduos		Resíduo Acumulado (%)	
		(g)	(%)	Passado	Retido
1	25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4	19,10	1.000,00	10,00	90,00	10,00
3/8	9,52	6.900,00	69,00	21,00	79,00
4	4,76	1.500,00	15,00	6,00	94,00
Fundo	-	600,00	6,00	0,00	
Totais		10.000,00	100,00		183,00
Dimensão máxima				19 mm	
Módulo de Finura				1,83	

3.3.6. Água

Para a preparação do concreto utilizou-se água da rede de abastecimento pública da cidade.

3.4. Propriedades dos materiais

3.4.1. Concreto

Os concretos utilizados na confecção dos pilares foram dosados para atingir uma resistência à compressão de 40 MPa e 70 MPa, pelo método de dosagem do ACI.

Para o traço do concreto de 70 MPa foi empregada o fator água/cimento proposto por AÏTCIN (2000) e GUIMARÃES (2002). O consumo de sílica ativa foi de 10% e o teor do aditivo usado foi de 3% do consumo de cimento. Os traços dos concretos são apresentados na Tabela 3.4, a qual indica a massa de cada material para se obter 1m³ de concreto.

Tabela 3.4 – Traços dos concretos - Quantidades de materiais para 1m³

Material	Quantidades		Unidade
	40 MPa	70 MPa	
Cimento CP-V-ARI Fácil	465	475	kg
Sílica ativa (Silmix)	-	48	kg
Areia media	753	861	kg
Brita 1	939	939	kg
Água	200	145	litros
Aditivo (Adiment Premium)	-	12	litros
Relação água/cimento	0,43	0,31	

Para obter as propriedades mecânicas do concreto foram moldados corpos de prova cilíndricos durante a concretagem de cada pilar, com dimensões de 100 mm x 200 mm, os quais foram submetidos aos seguintes ensaios:

- A resistência à compressão do concreto (f_c), de acordo com a NBR 5739:2007. Utilizaram-se dois corpos de prova para os ensaios aos 7 dias, 28 dias e no dia do ensaio. A Tabela 3.5 apresenta os resultados.
- A resistência à tração por compressão diametral (f_{ct}), segundo a norma NBR 7222:2010.
- Determinação do módulo de elasticidade secante (E_{cs}), item 7.3.3 da norma NBR 8522:2008, determinado através do coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação específica.

Os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas do concreto são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.5 – Resistência à compressão do concreto

Série	Pilar	Resistência à compressão f_c (MPa)			Idade no dia do ensaio (Dias)
		7 dias	28 dias	Dia do ensaio	
I	B40 - 1,3	41,0	42,0	43,7	91
	B40 - 2,1	41,6	43,6	45,4	122
	B40 - 3,2	37,0	39,2	43,4	114
	B40 - 4,3	37,5	44,3	42,4	119
II	U70 - 1,3	46,3	62,1	70,0	120
	U70 - 2,1	49,6	62,3	67,3	124
	U70 - 3,2	49,3	64,4	73,4	121
	U70 - 4,3	51,4	63,7	71,3	126

Tabela 3.6 – Propriedades mecânicas do concreto

Série	Pilar	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	ϵ_{cu} (‰)
I	B40 - 1,3	43,7	3,24	1,83
	B40 - 2,1	45,4	3,20	2,25
	B40 - 3,2	43,4	3,24	2,61
	B40 - 4,3	42,4	3,20	2,60
II	U70 - 1,3	70,0	5,76	2,82
	U70 - 2,1	67,3	5,30	2,99
	U70 - 3,2	73,4	5,76	2,50
	U70 - 4,3	71,3	5,30	2,79

A Figura 3.5 mostra as fotografias dos ensaios de resistência à tração e do módulo de elasticidade.



a) Ensaio de resistência à tração

b) Ensaio do módulo de elasticidade

Figura 3.5 – Ensaio de caracterização do concreto

Tabela 3.7 – Dados do módulo de elasticidade do concreto do pilar B40 - 1,3

Pilar	Carga	σ (MPa)	ϵ (‰)	E_{cs} (MPa)
B40 - 1,3	0,5 MPa	0,71	0,02	0
	0,1 f'c	4,36	0,12	35389
	0,2 f'c	8,71	0,25	35223
	0,3 f'c	13,16	0,37	35035
	0,4 f'c	17,57	0,51	34040
	0,5 f'c	21,88	0,66	33208
	0,6 f'c	26,30	0,80	32722
	0,7 f'c	30,79	0,98	31404
	0,8 f'c	34,87	1,14	30411

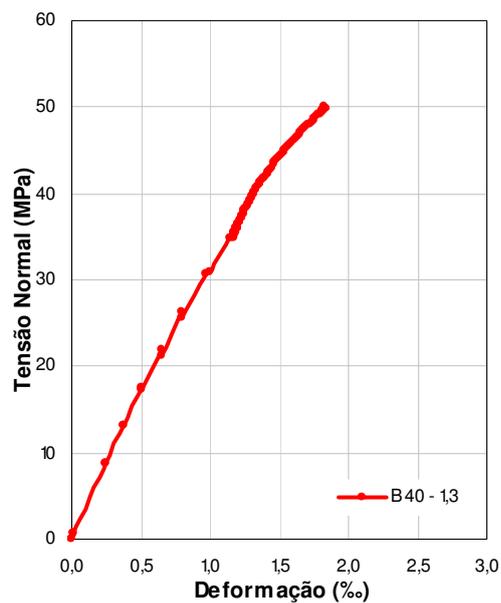


Figura 3.6 – Curva tensão-deformação do corpo de prova do pilar B40 – 1,3

Tabela 3.8 – Dados do módulo de elasticidade do concreto do pilar B40 - 2,1

Pilar	Carga	σ (MPa)	ϵ (‰)	E_{cs} (MPa)
B40 - 2,1	0,5 MPa	0,68	0,02	0
	0,1 f'c	4,68	0,16	27213
	0,2 f'c	9,13	0,32	27474
	0,3 f'c	13,50	0,45	29485
	0,4 f'c	18,21	0,60	30089
	0,5 f'c	22,90	0,77	29373
	0,6 f'c	27,26	0,96	28093
	0,7 f'c	31,84	1,15	27474
	0,8 f'c	36,23	1,36	26490

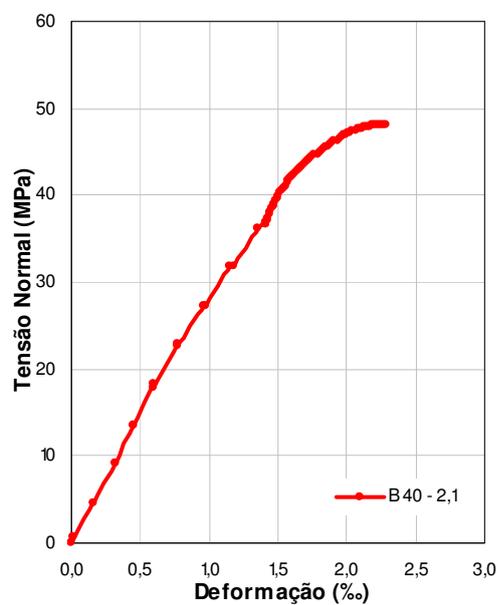


Figura 3.7 – Curva tensão-deformação do corpo de prova do pilar B40 – 2,1

Tabela 3.9 – Dados do módulo de elasticidade do concreto do pilar B40 - 3,2

Pilar	Carga	σ (MPa)	ϵ (‰)	E_{cs} (MPa)
B40 - 3,2	0,5 MPa	0,63	0,07	0
	0,1 f'c	4,33	0,19	30722
	0,2 f'c	8,72	0,35	29237
	0,3 f'c	13,15	0,51	28684
	0,4 f'c	17,39	0,67	28138
	0,5 f'c	21,82	0,87	26386
	0,6 f'c	26,22	1,06	25800
	0,7 f'c	30,58	1,28	24772
	0,8 f'c	34,68	1,51	23585

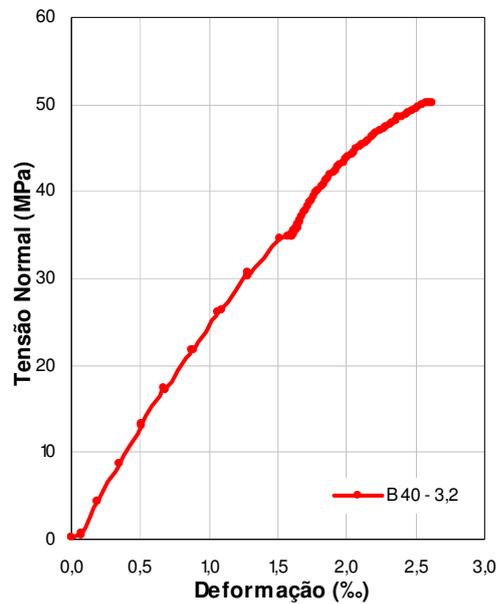


Figura 3.8 – Curva tensão-deformação do corpo de prova do pilar B40 – 3,2

Tabela 3.10 – Dados do módulo de elasticidade do concreto do pilar B40 – 4,3

Pilar	Carga	σ (MPa)	ϵ (‰)	E_{cs} (MPa)
B40 - 4,3	0,5 MPa	0,65	0,02	0
	0,1 f'c	4,28	0,15	28096
	0,2 f'c	8,48	0,30	28336
	0,3 f'c	12,77	0,45	28392
	0,4 f'c	17,23	0,62	27478
	0,5 f'c	21,30	0,81	26292
	0,6 f'c	25,47	0,99	25550
	0,7 f'c	29,90	1,19	25042
	0,8 f'c	34,09	1,42	23894

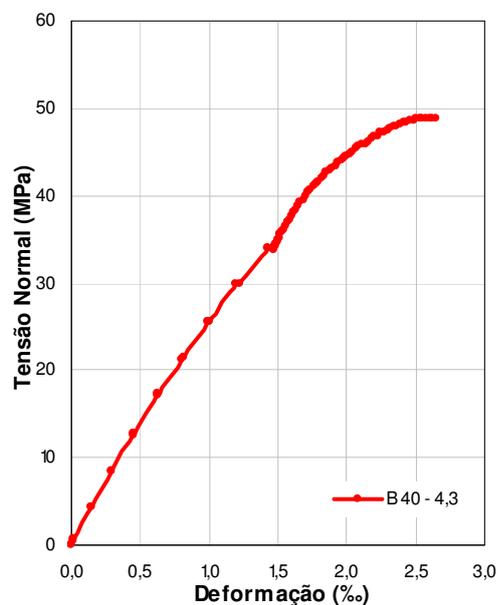


Figura 3.9 – Curva tensão-deformação do corpo de prova do pilar B40 – 4,3

Tabela 3.11 – Dados do módulo de elasticidade do concreto do pilar U70 – 1,3

Pilar	Carga	σ (MPa)	ϵ (‰)	E_{cs} (MPa)
U70 - 1,3	0,5 MPa	0,74	0,16	0
	0,1 f'c	7,36	0,36	32323
	0,2 f'c	14,80	0,59	32912
	0,3 f'c	22,84	0,88	30841
	0,4 f'c	29,63	1,02	33412
	0,5 f'c	36,47	1,21	34114
	0,6 f'c	44,73	1,49	32949
	0,7 f'c	51,50	1,71	32696
	0,8 f'c	58,67	1,92	32873

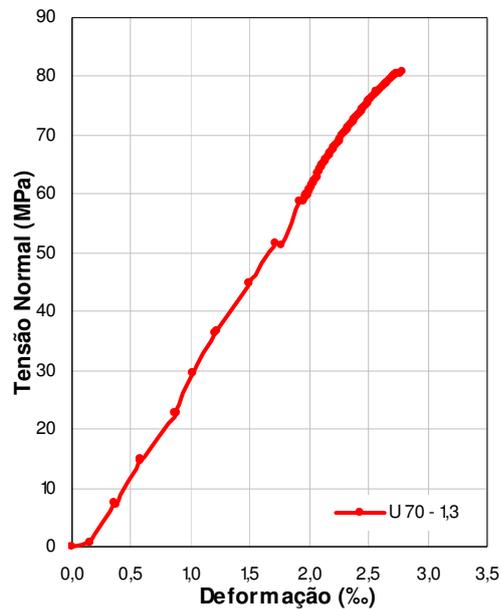


Figura 3.10 – Curva tensão-deformação do corpo de prova do pilar U70 – 1,3

Tabela 3.12 – Dados do módulo de elasticidade do concreto do pilar U70 – 2,1

Pilar	Carga	σ (MPa)	ϵ (‰)	E_{cs} (MPa)
U70 - 2,1	0,5 MPa	0,50	0,05	0
	0,1 f'c	6,53	0,21	38873
	0,2 f'c	13,11	0,40	36097
	0,3 f'c	20,12	0,61	35492
	0,4 f'c	26,66	0,81	34462
	0,5 f'c	32,62	1,03	33064
	0,6 f'c	39,14	1,27	31860
	0,7 f'c	45,93	1,52	31060
	0,8 f'c	52,35	1,86	28777

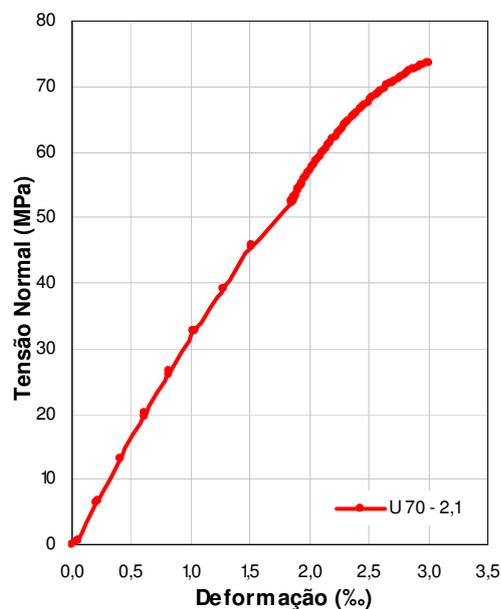


Figura 3.11 – Curva tensão-deformação do corpo de prova do pilar U70 – 2,1

Tabela 3.13 – Dados do módulo de elasticidade do concreto do pilar U70 – 3,2

Pilar	Carga	σ (MPa)	ϵ (%)	E_{cs} (MPa)
U70 - 3,2	0,5 MPa	0,60	0,06	0
	0,1 f'c	7,28	0,23	39282
	0,2 f'c	14,72	0,43	37527
	0,3 f'c	22,07	0,63	37619
	0,4 f'c	29,33	0,82	37774
	0,5 f'c	36,78	1,04	36783
	0,6 f'c	44,70	1,28	35930
	0,7 f'c	51,60	1,51	35135
0,8 f'c	58,63	1,75	34282	

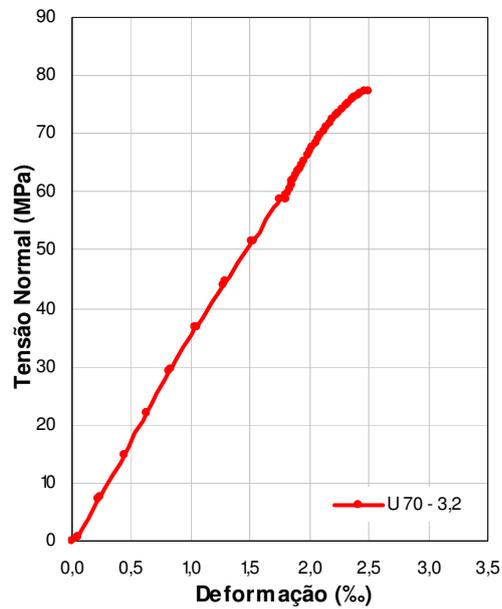


Figura 3.12 – Curva tensão-deformação do corpo de prova do pilar U70 – 3,2

Tabela 3.14 – Dados do módulo de elasticidade do concreto do pilar U70 – 4,3

Pilar	Carga	σ (MPa)	ϵ (%)	E_{cs} (MPa)
U70 – 4,3	0,5 MPa	0,55	0,12	0
	0,1 f'c	7,78	0,33	34587
	0,2 f'c	14,90	0,55	33310
	0,3 f'c	22,08	0,75	33961
	0,4 f'c	29,36	0,97	34031
	0,5 f'c	37,35	1,21	33656
	0,6 f'c	44,56	1,44	33278
	0,7 f'c	51,16	1,69	32209
0,8 f'c	58,67	1,92	32285	

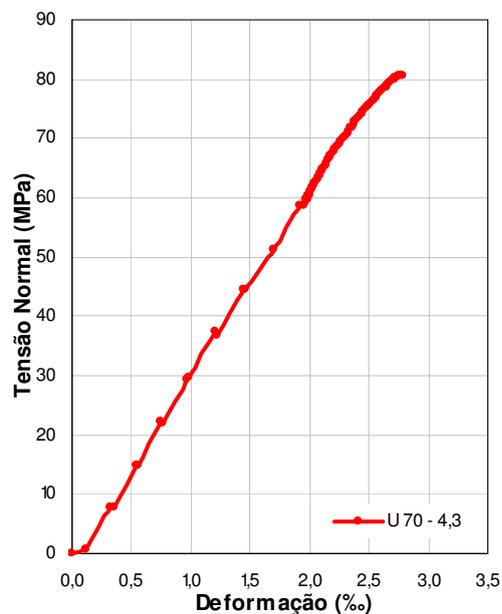


Figura 3.13 – Curva tensão-deformação do corpo de prova do pilar U70 – 4,3

3.4.2. Aço

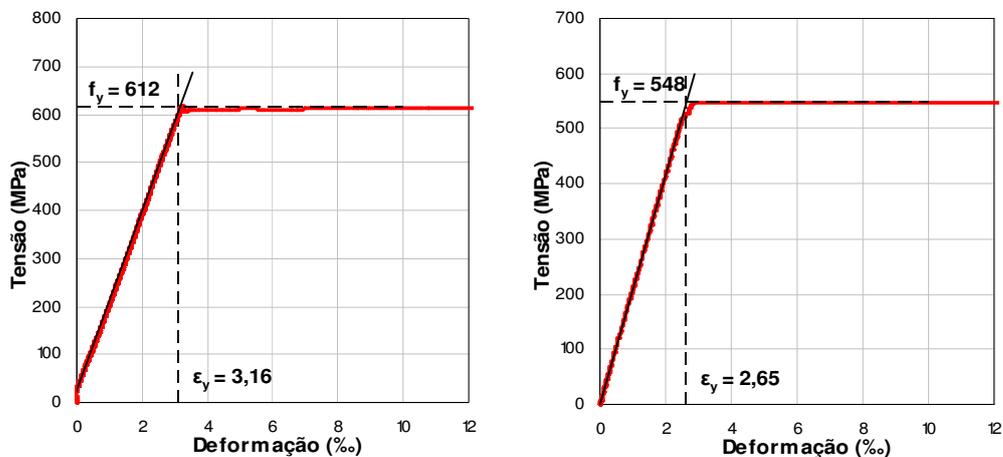
Na armadura longitudinal foram usadas barras de diâmetro nominal de 10 mm e 16 mm e na armadura transversal barras de 5 mm, todas de aço CA-50. Para a caracterização das barras de aço foram ensaiadas duas amostras, segundo a NBR ISO 6892:2002. A Tabela 3.15 apresenta os valores do diâmetro da barra (ϕ), da área da seção transversal da barra (A_s), da tensão de escoamento do aço à tração (f_y), da deformação específica de escoamento do aço (ϵ_y) e do módulo de elasticidade do aço (E_s). Os diagramas tensão-deformação são mostrados na Figura 3.14 e Figura 3.15.

Tabela 3.15 – Propriedades mecânicas do aço

ϕ (mm)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	ϵ_y (‰)	E_s (GPa)
10	78,85	611,6	3,16	193,54
16	199,04	547,5	2,65	206,60



Figura 3.14 – Ensaio de resistência à tração do aço



a) Barra de aço de 10 mm

b) Barra de aço de 16 mm

Figura 3.15 – Diagrama tensão-deformação das barras de aço

3.5. Moldagem dos pilares

3.5.1. Formas

Os pilares foram moldados em uma forma metálica, composta por três perfis C laminados, sendo dois perfis laterais com altura de 20 cm e um perfil na base com 25 cm. A forma metálica tinha comprimento de 6 m, de modo que foi possível fabricar dois pilares em uma concretagem.



Figura 3.16 – Posição da armadura na forma metálica

3.5.2. Concretagem e cura

Os pilares foram concretados horizontalmente, para se evitar uma eventual variação na resistência ao longo do comprimento. Com a forma metálica montada, as armaduras foram colocadas dentro da forma. O posicionamento das armaduras foi garantido com os espaçadores de plástico na parte inferior do pilar.

A mistura dos materiais foi feita na betoneira com capacidade de 400 litros. O concreto foi adensado com um vibrador de agulha com 28 mm de diâmetro. De cada mistura foram moldados nove corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) para obter os valores de resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade.

Os pilares e os corpos de prova foram molhados três vezes por dia. O processo de cura ocorreu durante três dias.



Figura 3.17 – Concretagem dos pilares

3.6. Instrumentação

Foram utilizados extensômetros elétricos de resistência da marca Excel, tipo PA-06-250BA-120-L com 10 mm de comprimento, para medir as deformações específicas da armadura longitudinal. As deformações específicas do concreto foram medidas nas quatro faces do pilar, com extensômetros elétricos de resistência da marca EXCEL do tipo PA-06-201BA-120-L com 60 mm de comprimento.

As Figuras 3.18 a 3.20 apresentam a distribuição dos extensômetros na seção localizada à meia altura do pilar.

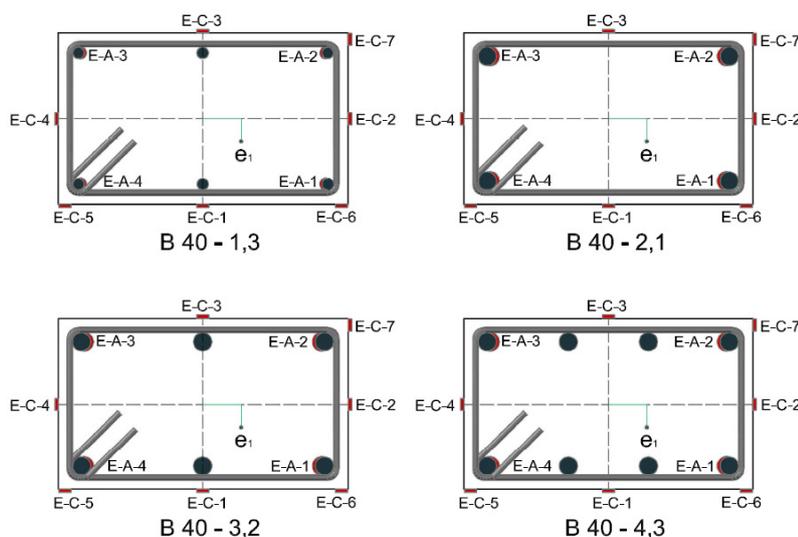


Figura 3.18 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no concreto e aço da

1ª Série

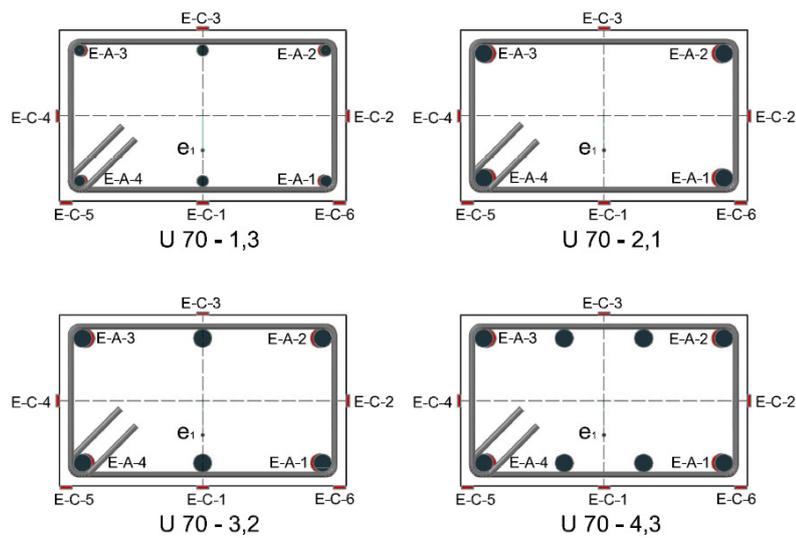


Figura 3.19 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no concreto e aço da 2ª Série



Figura 3.20 – Extensômetros elétricos colados na superfície de concreto e de aço

Os transdutores de deslocamentos foram utilizados para medir os deslocamentos horizontais na região superior, central e inferior dos pilares da 1ª série e 2ª série. Na Figura 3.21 é apresentada as fotografias do posicionamento dos transdutores nos pilares no momento do ensaio.

Os dados obtidos com os extensômetros e com os transdutores de deslocamento e de pressão foram registrados por um sistema de aquisição de dados controlado pelo software LABVIEW 9.0 da National Instrument.

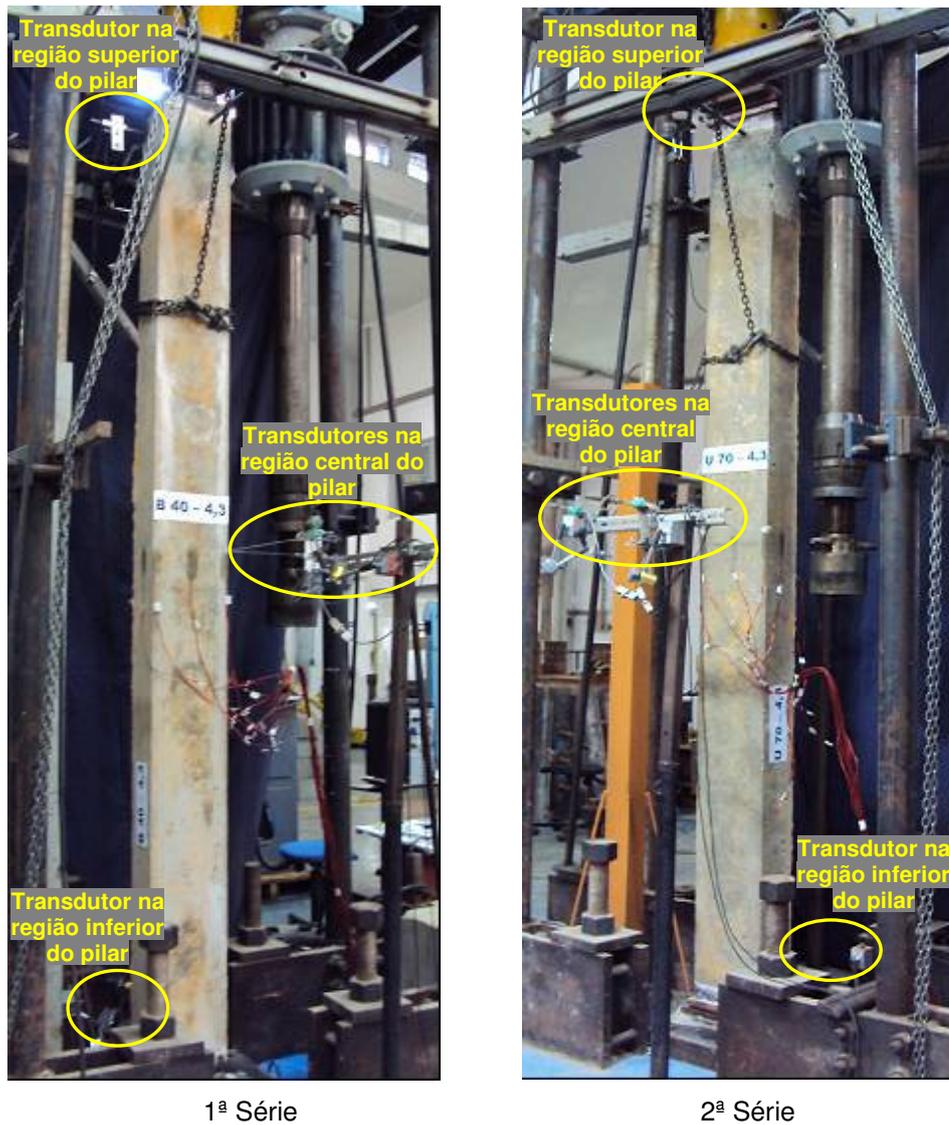


Figura 3.21 – Posicionamento dos transdutores de deslocamento nos pilares

3.7. Procedimento de realização dos ensaios

Os pilares foram ensaiados num pórtico metálico fixado na laje de reação do laboratório. A carga excêntrica foi aplicada por um atuador hidráulico de 2000 kN de capacidade, atuado por uma bomba hidráulica manual.

Para garantir a posição correta do pilar foram utilizados perfis fechados, com barras rosqueadas que atravessavam os perfis na sua altura média, apoiados na parte superior do pórtico.

Na base e no topo do pilar foram fixadas chapas metálicas, com a finalidade de distribuir uniformemente a carga. Vale ressaltar que parte da rótula foi soldada às chapas fixadas no pilar para que no processo de montagem no pórtico houvesse um acoplamento das duas peças da rótula na base e topo do

pilar. As Figuras 3.22 a 3.25 apresentam os desenhos dos ensaios da 1ª série e da 2ª série posicionados no pórtico. Para cada série, os pilares foram alinhados com o eixo da rótula.

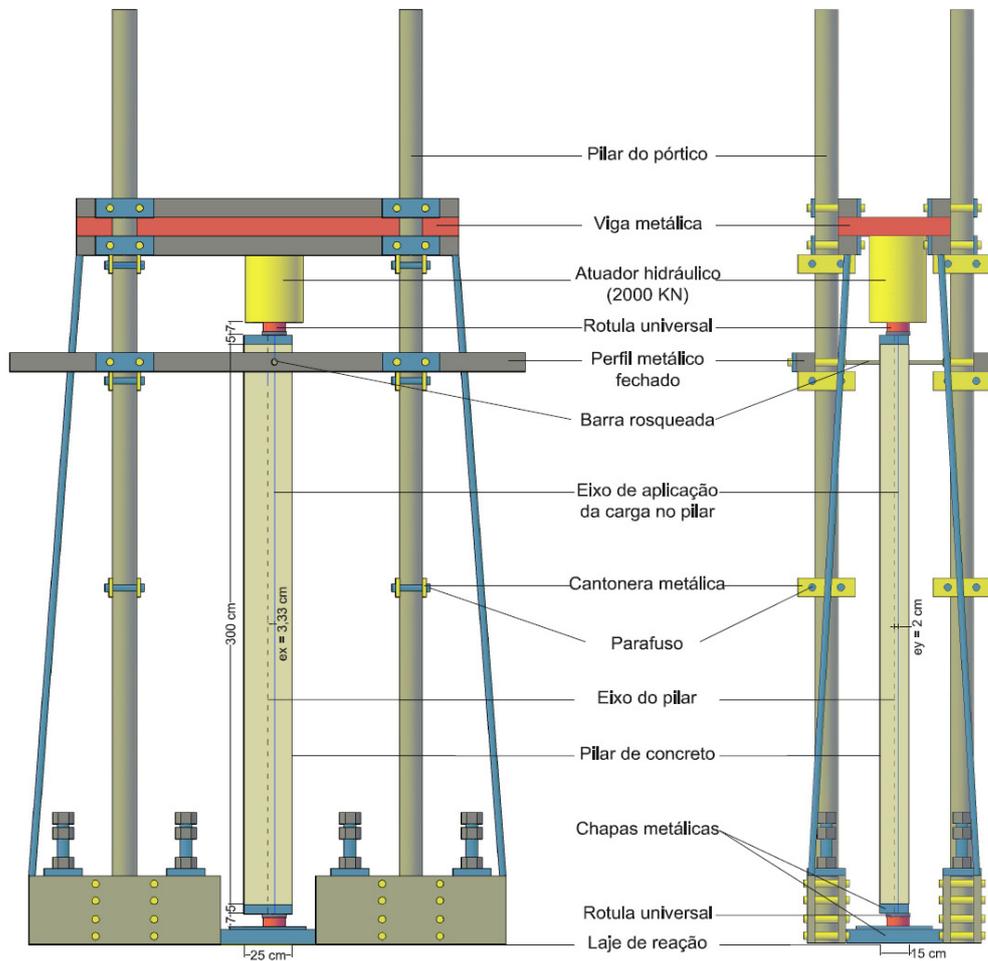


Figura 3.22 – Desenho da montagem do ensaio da 1ª série

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821351/CA



Figura 3.23 – Posicionamento do pilar com a excentricidade inicial e detalhe da rótula universal utilizada na 1ª série

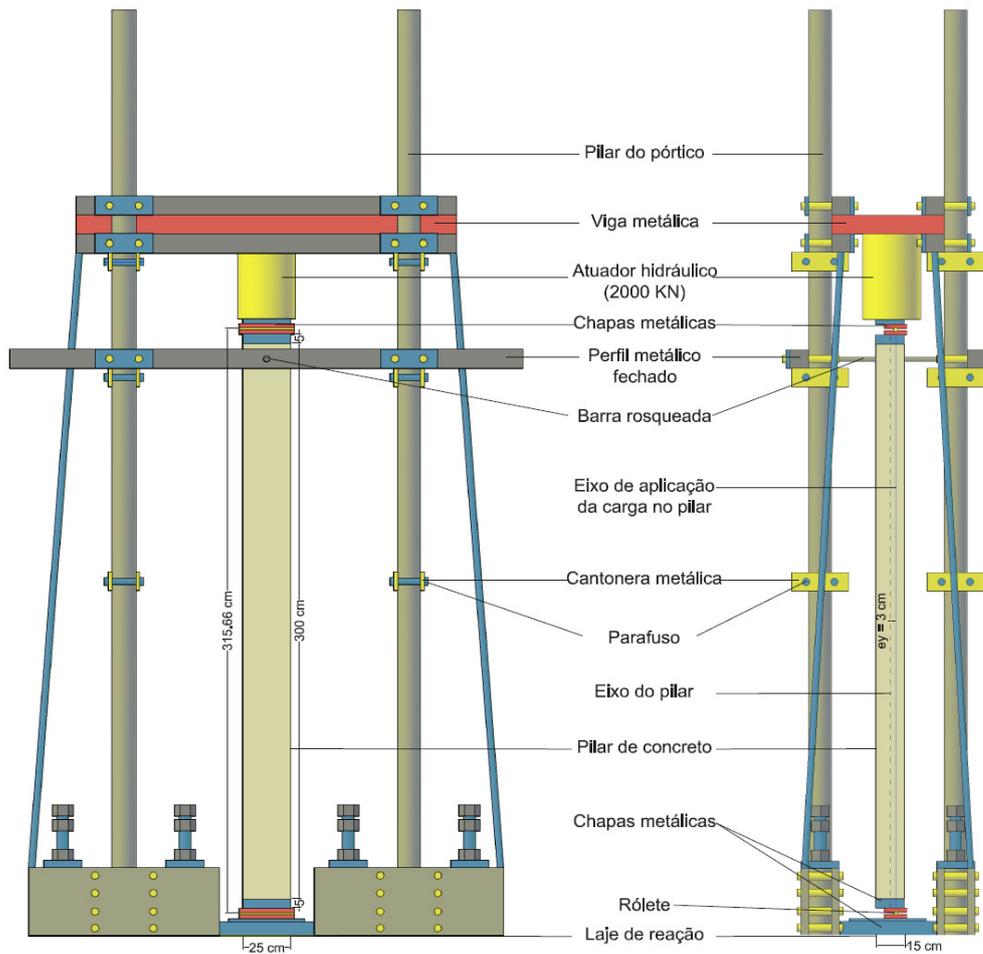


Figura 3.24 – Desenho da montagem do ensaio da 2^a série



Figura 3.25 – Posicionamento do pilar com a excentricidade inicial da 2^a série