

3. Programa Experimental

3.1. Considerações Iniciais

Este estudo experimental foi desenvolvido no laboratório de estruturas e materiais (LEM) da PUC- Rio e teve o propósito de estudar o comportamento de pilares esbeltos de concreto de alta resistencia sujeitos à flexão composta reta.

O programa experimental foi composto por oito pilares de concreto armado, sendo as variáveis consideradas a resistência à compressão do concreto e a taxa de armadura longitudinal. A taxa de armadura transversal e as dimensões das peças foram mantidas constantes.

3.2. Materiais Utilizados

3.2.1. Cimento

O cimento utilizado foi Portland de alta resistência inicial, da Ciminias (CP-V-ARI-Fácil da Holcim). O cimento empregado foi cedido pela empresa Holcim, fabricado segundo a NBR 5733:1991, com uma massa específica de 3120 kg/m^3 .

3.2.2. Silica ativa

A sílica ativa utilizada foi a Silmix não densificada, doação da própria empresa. Conforme especificações do fabricante, a massa específica é de $2,2 \text{ g/cm}^3$.

3.2.3. Aditivo hiperplastificante

Foi empregado o aditivo hiperplastificante Adiment Premium da Vedacit, com densidade de $1,09 \text{ g/cm}^3$.

3.2.4. Agregado miúdo

Foi utilizada a areia de rio lavada, cuja caracterização foi feita no laboratório de estruturas e materiais (LEM) da PUC- Rio. A análise granulométrica pode ser vista na tabela 3.1 realizada de acordo com a NBR 7217:1987. O módulo de finura determinado segundo NBR 7211:1983, foi de 2,80 (areia média).

A massa específica foi de $2,61 \text{ g/cm}^3$ de acordo com NBR 9776:1987; enquanto a massa unitária conforme a NBR 7251:1982 com valor de $1,37 \text{ g/cm}^3$. O teor da umidade foi de 7,3%.

Tabela 3.1 – Análise granulométrica do agregado miúdo

Peneiras	Malha	Resíduo		Resíduo Acumulado (%)	
	(mm)	gr	(%)	Passado	Retido
1½ "	38,10				
¾ "	19,10				
½ "	12,70				
⅜ "	9,52				
¼ "	6,35			100,00	0,00
4	4,76	27,58	2,78	97,22	2,78
8	2,38	59,34	5,98	91,25	8,75
16	1,19	182,82	18,41	72,84	27,16
30	0,60	309,10	31,13	41,71	58,29
50	0,30	276,27	27,82	13,89	86,11
100	0,15	107,30	10,81	3,08	96,92
Fundo	-	30,63	3,08	0,00	-
Totais		993,04	100,00		280,01
Dimensão máxima característica				4,8 mm	
Modulo de Finura				2,80	

3.2.5. Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi de origem gnaiss e cuja granulometria pode ser vista na tabela 3.2 conforme a NBR 7217:1987, é classificado como brita 1, a dimensão máxima do agregado foi de 19 mm.

A massa específica determinada segundo a NBR 9776:1987 foi de 2,74 g/cm³ e a massa unitária de acordo a 7251:1982 foi igual a 1,35 g/cm³.

Tabela 3.2 – Análise granulométrica do agregado graúdo

Peneiras	Malha	Resíduo		Resíduo Acumulado (%)	
	(mm)	gr	(%)	Passado	Retido
1½ "	38,10			100,00	0,00
¾ "	19,10	10,63	1,05	98,95	1,05
½ "	12,70	555,74	54,87	44,08	55,92
⅜ "	9,52	328,53	32,44	11,64	88,36
¼ "	6,35	97,26	9,60	2,04	97,96
4	4,76	10,15	1,00	1,04	98,96
8	2,38				98,96
16	1,19				98,96
30	0,60				98,96
50	0,30				98,96
100	0,15				98,96
Fundo	-	10,50	1,04	0,00	-
Totais		1012,81	100,00		683,19
Dimensão máxima característica				19 mm	
Modulo de Finura				6,83	

3.2.6. Água

A água para o amassamento do concreto foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade.

3.3. Concreto

Foram feitos dois traços de concreto para atingir uma resistência média à compressão de 40 MPa e 80 MPa, tomando-se por base o método de dosagem do ACI.

Para o traço do concreto de 80 MPa foi empregada a relação entre o fator água/cimento proposta por (AİTCIN, 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 utilizados são apresentados na tabela 3.3 indicando o peso de cada material para 1m³ de concreto.

Tabela 3.3 – Traço dos concretos utilizados para 1m³

Materias	Und	40 MPa	80 MPa
Cimento CP-V-Ari (Ciminas)	kg	465	483
Sílica ativa (Silmix)	kg	-	48
Aditivo (Adiment Premium)	litros	-	12
Areia media	kg	768	828
Brita 1	kg	924	924
Agua	litros	200	145
Relação água/cimento		0,43	0,30

A resistência à compressão do concreto foi obtida por meio de ensaios de corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm aos 7 dias, 28 dias e no dia do ensaio dos respectivos pilares, de acordo com a NBR 5739:1994. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.4.

A resistência à tração foi determinada pelo ensaio de compressão diametral dos corpos de prova cilíndricos moldado para cada pilar. Segundo a NBR 7222:1994.

Para obter o módulo de elasticidade foram colados dois extensômetros eléctricos de resistência da marca EXCEL do tipo PA-06-201BA-120-L, nas geratrizes diametralmente opostas dos corpos de prova. Adotou-se o plano de carga 7.3.3 da NBR 8522:2003, que simula a estrutura em seu primeiro carregamento, fornece o módulo de deformação secante, e permite também traçar a curva tensão-deformação específica, apresentadas nas figuras 3.2 a 3.9.

Na tabela 3.5, mostram-se os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas do concreto. Na figura 3.1, apresentam-se as fotografias dos ensaios de resistência à tração e do módulo de elasticidade.

Tabela 3.4 – Resistência à compressão do concreto

Série	Pilar	Idade dias	Nº CP	f _c (MPa)
Serie I	C40 - 1.3	7	2	48,1
		28	2	52,8
		41*	2	53,6
	C40 - 2.1	7	2	37,5
		28	2	46,0
		42*	2	49,1
	C40 - 3.2	7	2	41,1
		28	2	45,0
		72*	2	46,9
	C40 - 4.3	7	2	44,6
		28	2	46,1
		70*	2	48,7
Serie II	C80 - 1.3	7	2	65,4
		28	2	88,7
		72*	2	89,7
	C80 - 2.1	7	2	56,5
		28	2	80,6
		67*	2	83,2
	C80 - 3.2	7	2	72,2
		28	2	79,4
		76*	2	82,5
	C80 - 4.3	7	2	72,7
		28	2	75,8
		75*	2	79,0

* dia do ensaio do pilar

Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas do concreto

Série	Pilar	f _c (MPa)	f _{ct} (MPa)	ε _{cu} (‰)	E _{cs} (MPa)
I	C40 - 1.3	53,6	3,54	3,16	23669
	C40 - 2.1	49,1	3,62	3,04	20730
	C40 - 3.2	46,9	3,61	2,44	21526
	C40 - 4.3	48,7	3,95	2,57	25266
II	C80 - 1.3	89,7	6,97	2,99	36525
	C80 - 2.1	83,2	5,29	3,02	36347
	C80 - 3.2	82,5	6,06	1,90	37120
	C80 - 4.3	79,0	5,01	2,71	37187



a) Ensaio de resistência à tração



b) Ensaio do módulo de elasticidade

Figura 3.1 – Ensaio de caracterização do concreto

Tabela 3.6 – Valores do módulo de elasticidade do concreto do Pilar C40-1.3

Pilar	Leitura	σ (Mpa)	ε (‰)	E_{cs} (MPa)
C40 - 1.3	0,5 Mpa	0,6	0,06	0
	0,1 f_c	5,4	0,21	32129
	0,2 f_c	10,7	0,38	31643
	0,3 f_c	16,2	0,56	31055
	0,4 f_c	21,5	0,76	30111
	0,5 f_c	26,8	0,97	28743
	0,6 f_c	32,2	1,20	27651
	0,7 f_c	37,4	1,45	26441
	0,8 f_c	42,9	1,85	23669

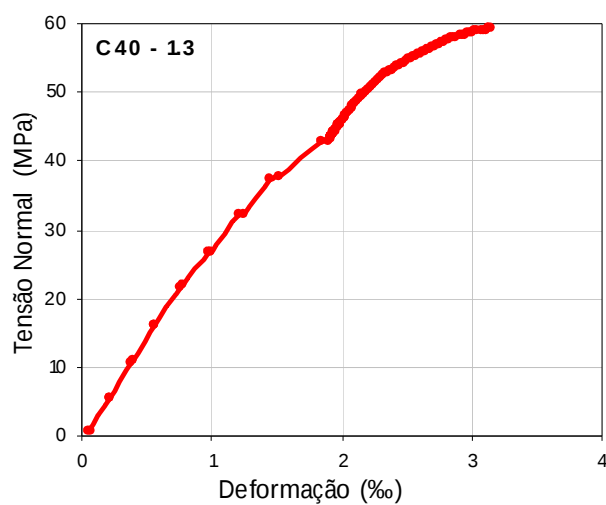


Figura 3.2 – Diagrama tensão-deformação do corpo de prova do Pilar C40-1.3

Tabela 3.7 – Valores do módulo de elasticidade do concreto do Pilar C40-2.1

Pilar	Leitura	σ (Mpa)	ε (‰)	E_{cs} (MPa)
C40 - 2.1	0,5 Mpa	0.7	0.05	0
	0,1 f_c	4.9	0.23	23557
	0,2 f_c	9.9	0.44	23811
	0,3 f_c	14.7	0.63	24366
	0,4 f_c	19.6	0.82	24514
	0,5 f_c	24.6	1.05	23845
	0,6 f_c	29.7	1.32	22924
	0,7 f_c	34.4	1.60	21795
	0,8 f_c	39.5	1.92	20730

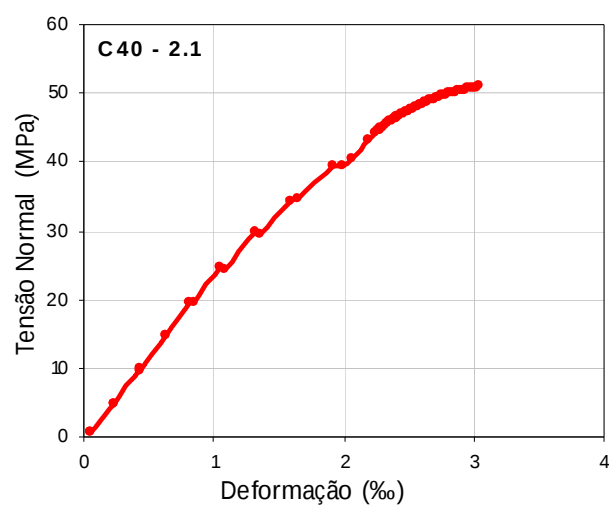


Figura 3.3 – Diagrama tensão-deformação do corpo de prova do Pilar C40-2.1

Tabela 3.8 – Valores do módulo de elasticidade do concreto do Pilar C40-3.2

Pilar	Leitura	σ (Mpa)	ε (‰)	E_{cs} (MPa)
C40 - 3.2	0,5 Mpa	0,6	0,09	0
	0,1 fc	4,7	0,23	28515
	0,2 fc	9,5	0,39	28760
	0,3 fc	13,9	0,55	28839
	0,4 fc	19,1	0,72	29068
	0,5 fc	23,6	0,91	27679
	0,6 fc	28,2	1,15	25888
	0,7 fc	33,2	1,42	24395
	0,8 fc	37,6	1,80	21526

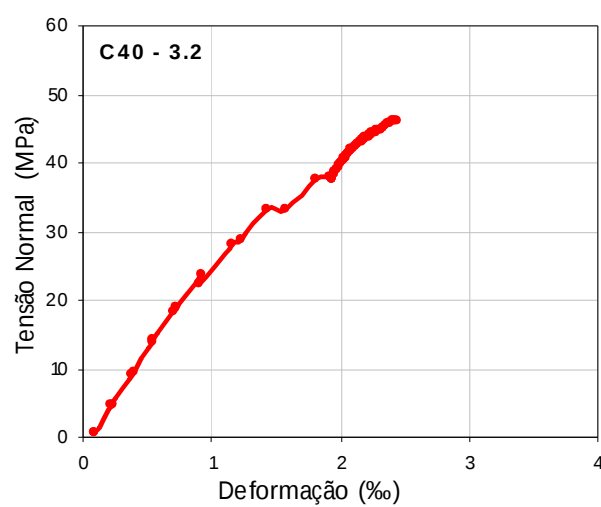


Figura 3.4 – Diagrama tensão-deformação do corpo de prova do Pilar C40-3.2

Tabela 3.9 – Valores do módulo de elasticidade do concreto do Pilar C40-4.3

Pilar	Leitura	σ (Mpa)	ε (‰)	E_{cs} (MPa)
C40 - 4.3	0,5 Mpa	0,6	0,07	0
	0,1 fc	5,0	0,22	29883
	0,2 fc	10,2	0,39	29664
	0,3 fc	15,2	0,55	30202
	0,4 fc	20,6	0,73	29979
	0,5 fc	25,2	0,92	28800
	0,6 fc	30,3	1,12	28133
	0,7 fc	35,3	1,37	26654
	0,8 fc	40,6	1,65	25266

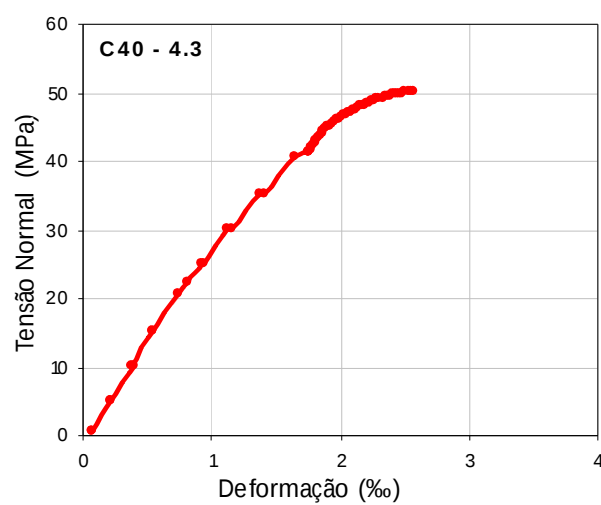


Figura 3.5 – Diagrama tensão-deformação do corpo de prova do Pilar C40-4.3

Tabela 3.10 – Valores do módulo de elasticidade do concreto do Pilar C80-1.3

Pilar	Leitura	σ (Mpa)	ε (‰)	E_{cs} (MPa)
C80 - 1.3	0,5 Mpa	0,5	0,07	0
	0,1 f_c	9,0	0,32	33617
	0,2 f_c	18,0	0,57	34732
	0,3 f_c	26,9	0,80	36103
	0,4 f_c	36,1	1,04	36635
	0,5 f_c	44,8	1,28	36693
	0,6 f_c	53,9	1,52	36768
	0,7 f_c	62,8	1,76	36843
	0,8 f_c	71,7	2,02	36525

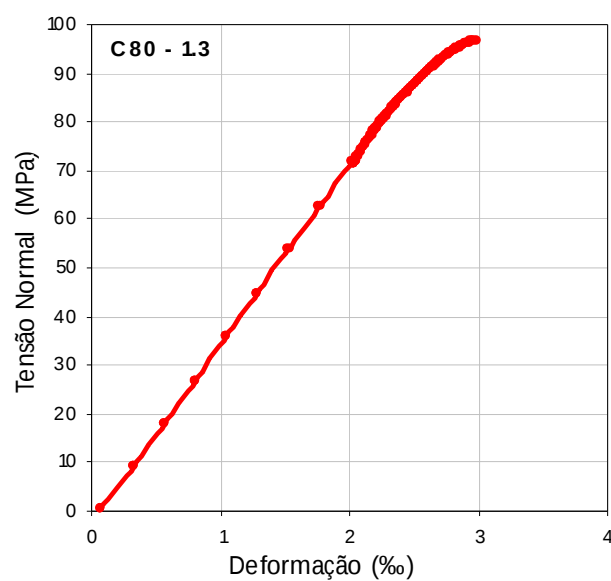


Figura 3.6 – Diagrama tensão-deformação do corpo de prova do Pilar C80-1.3

Tabela 3.11 – Valores do módulo de elasticidade do concreto do Pilar C80-2.1

Pilar	Leitura	σ (Mpa)	ε (‰)	E_{cs} (MPa)
C80 - 2.1	0,5 Mpa	0,5	0,07	0
	0,1 fc	8,3	0,30	33841
	0,2 fc	16,7	0,54	34761
	0,3 fc	25,1	0,75	36104
	0,4 fc	33,4	0,97	36603
	0,5 fc	41,6	1,19	36608
	0,6 fc	50,0	1,42	36598
	0,7 fc	58,2	1,65	36506
	0,8 fc	66,6	1,89	36347

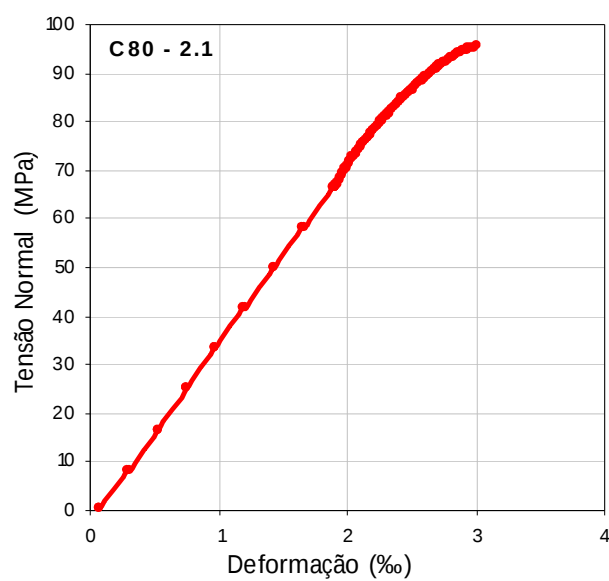


Figura 3.7 – Diagrama tensão-deformação do corpo de prova do Pilar C80-2.1

Tabela 3.12 – Valores do módulo de elasticidade do concreto do Pilar C80-3.2

Pilar	Leitura	σ (Mpa)	ε (‰)	E_{cs} (MPa)
C80 - 3.2	0,5 Mpa	0,6	0,13	0
	0,1 fc	8,3	0,36	33507
	0,2 fc	16,5	0,57	36350
	0,3 fc	24,8	0,77	37675
	0,4 fc	33,1	0,98	38087
	0,5 fc	41,3	1,20	37894
	0,6 fc	49,5	1,41	38219
	0,7 fc	57,9	1,64	37973
	0,8 fc	66,4	1,90	37120

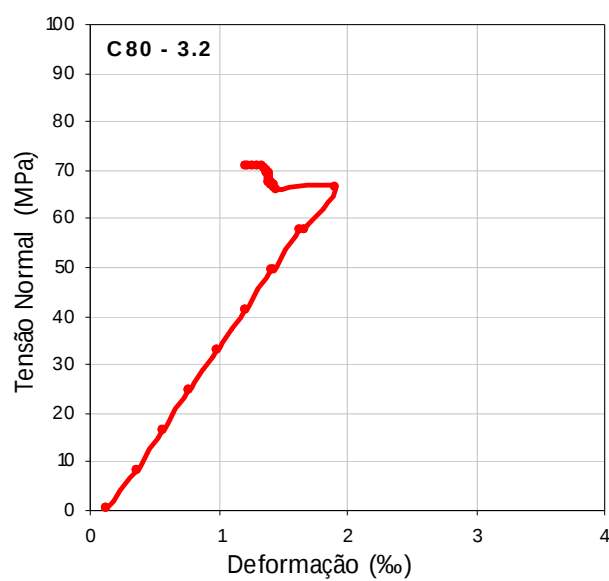


Figura 3.8 – Diagrama tensão-deformação do corpo de prova do Pilar C80-3.2

Tabela 3.13 – Valores do módulo de elasticidade do concreto do Pilar C80-4.3

Pilar	Leitura	σ (Mpa)	ε (‰)	E_{cs} (MPa)
C80 - 4.3	0,5 Mpa	0,6	0,03	0
	0,1 fc	8,0	0,26	33376
	0,2 fc	15,8	0,47	35163
	0,3 fc	23,7	0,67	36606
	0,4 fc	31,7	0,87	37156
	0,5 fc	39,7	1,09	37042
	0,6 fc	47,5	1,30	37013
	0,7 fc	55,3	1,51	37130
	0,8 fc	63,3	1,72	37187

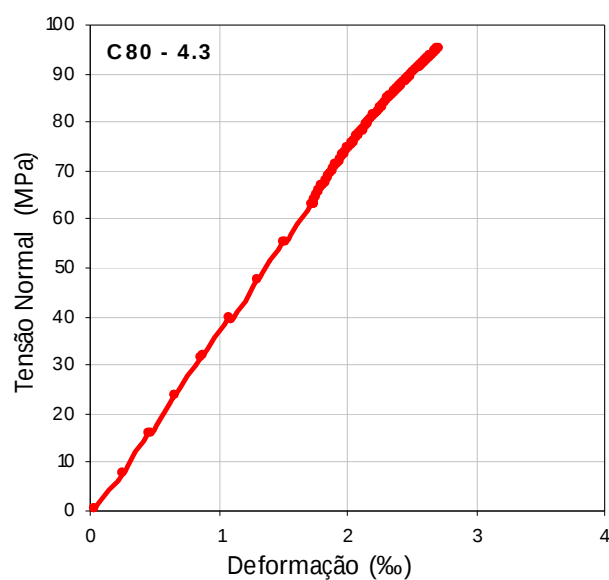


Figura 3.9 – Diagrama tensão-deformação do corpo de prova do Pilar C80-4.3

3.4. Aço

O aço empregado foi o CA-50. Na armadura longitudinal foram usadas barras de diâmetro nominal de 10 mm e 16 mm e na armadura transversal barras de 5 mm. As curvas tensão-deformação das barras foram obtidas em ensaios de tração de acordo com a NBR 6152:1992 são mostradas nas Figuras 3.11 e 3.12.

Tabela 3.14 – Propriedades mecânicas das barras de aço

Φ_{nominal} (mm)	A_s (cm ²)	E_s (MPa)	f_y (MPa)	ϵ_y (‰)
10	0,79	190946	539,10	2,80
16	2,01	188071	546,88	2,90



Figura 3.10 – Ensaio de à tração das barras de aço

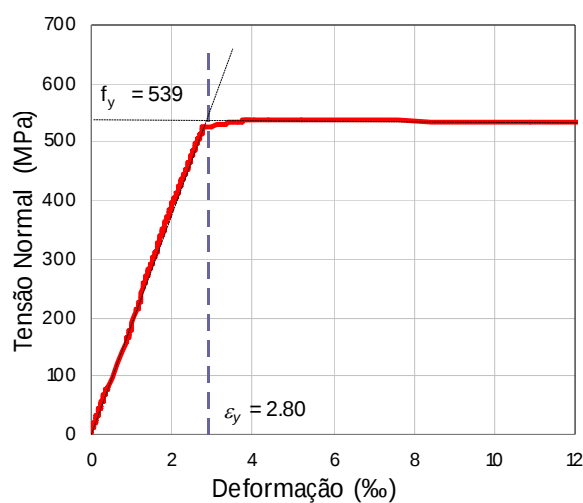


Figura 3.11 – Diagrama tensão-deformação da barra ϕ 10 mm

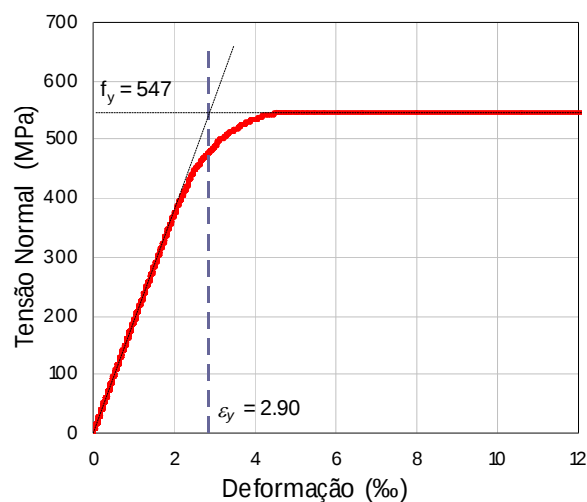


Figura 3.12 – Diagrama tensão-deformação da barra ϕ 16 mm

3.5. Programa experimental

A execução do programa experimental foi dividida nas seguintes etapas:

- Construção das formas.
- Montagem e instrumentação das armaduras.
- Moldagem e cura dos pilares.
- Montagem do pilar no equipamento de ensaio.
- Instrumentação do concreto.
- Execução dos ensaios

3.5.1. Pilares ensaiados

Os pilares ensaiados dividem-se em duas séries, C40 e C80, onde os números 40 e 80 referem-se à resistência do concreto. Os números seguintes (1.3-2.1 - 3.2 e 4.3) referem-se à taxa de armadura longitudinal. As características dos pilares são apresentadas na tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Características dos pilares

Série	Pilar	e_1	f_c	Armadura Longitudinal	
		(cm)	(MPa)	A_s	ρ (%)
I	C40 - 1.3	2,0	53,6	6 Ø 10	1,28
	C40 - 2.1	2,0	49,1	4 Ø 16	2,13
	C40 - 3.2	2,0	46,9	6 Ø 16	3,20
	C40 - 4.3	2,0	48,7	8 Ø 16	4,27
II	C80 - 1.3	2,0	89,7	6 Ø 10	1,28
	C80 - 2.1	2,0	83,2	4 Ø 16	2,13
	C80 - 3.2	3,0	82,5	6 Ø 16	3,20
	C80 - 4.3	3,0	79,0	8 Ø 16	4,27

Foi utilizada uma armadura de fretagem nas extremidades dos pilares para evitar uma ruptura prematura nessas regiões, conforme mostra a figura 3.13

O detalhamento das armaduras dos pilares é apresentado nas figuras 3.14 a 3.17, sendo o espaçamento da armadura transversal igual a menor dimensão do pilar.



Figura 3.13 – Armadura de fretagem

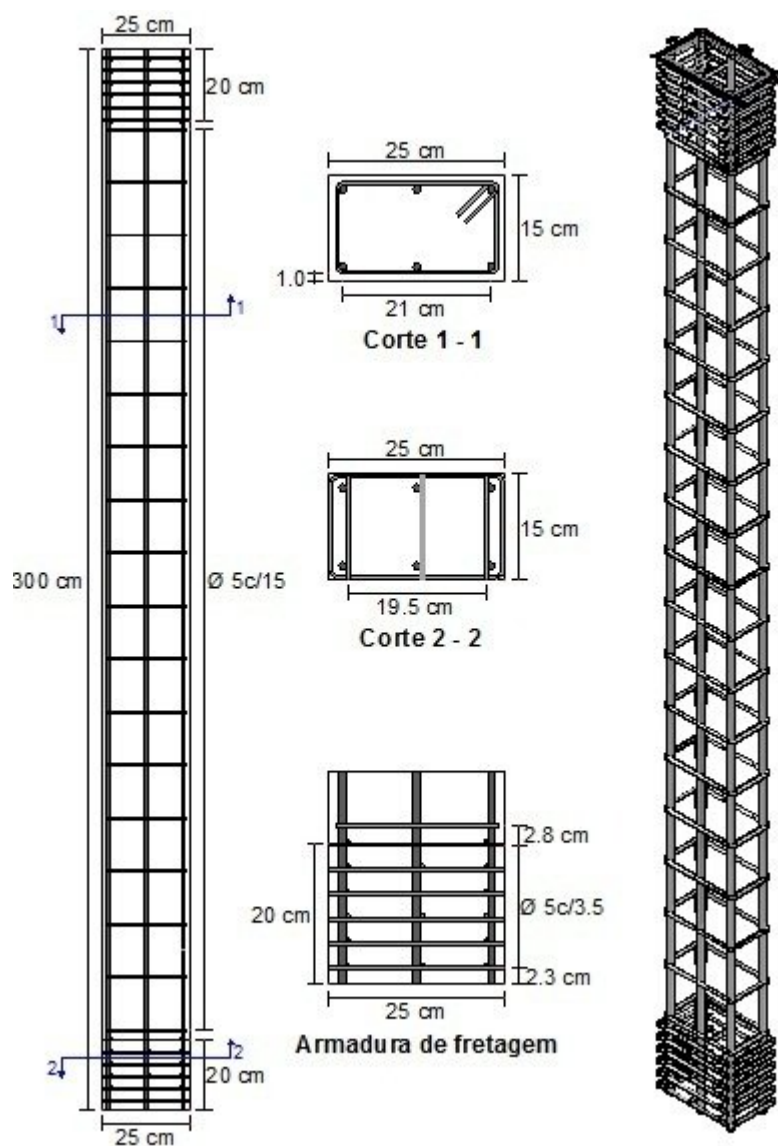


Figura 3.14 – Detalhamento das armaduras dos pilares C40-1.3 e C80-1.3

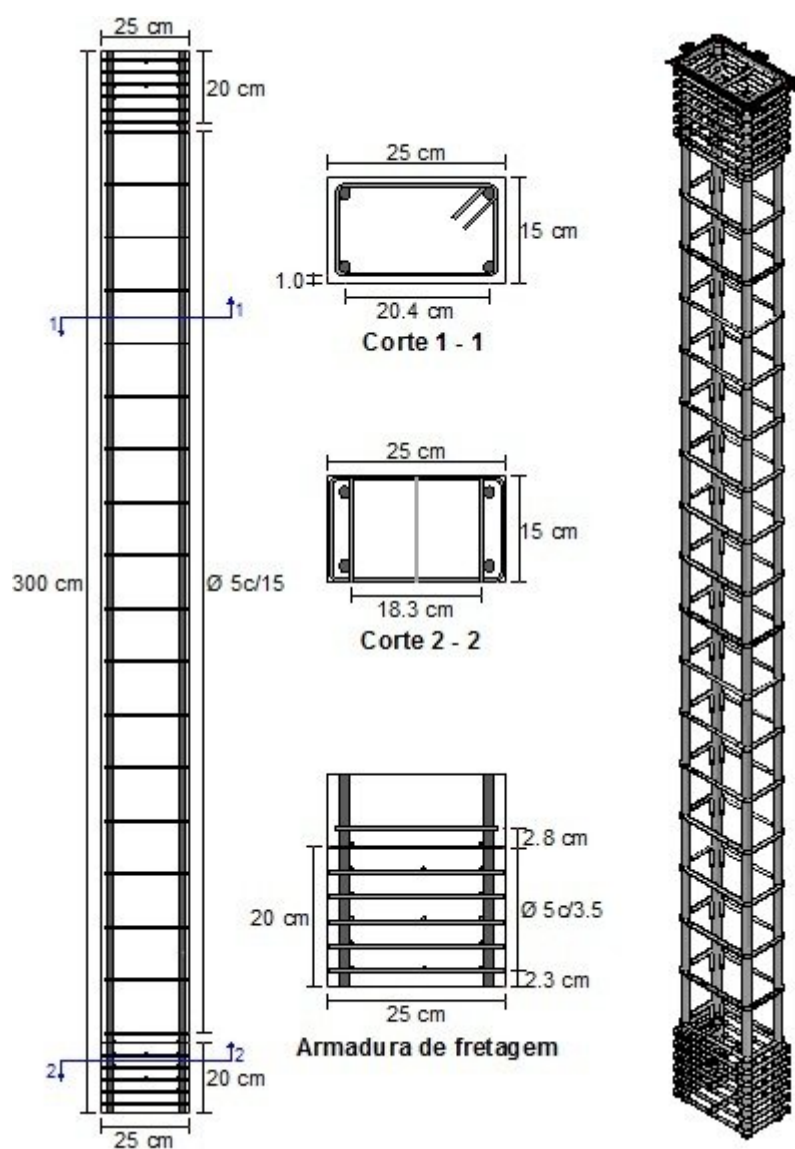


Figura 3.15 - Detalhamento das armaduras dos pilares C40-2.1 e C80-2.1

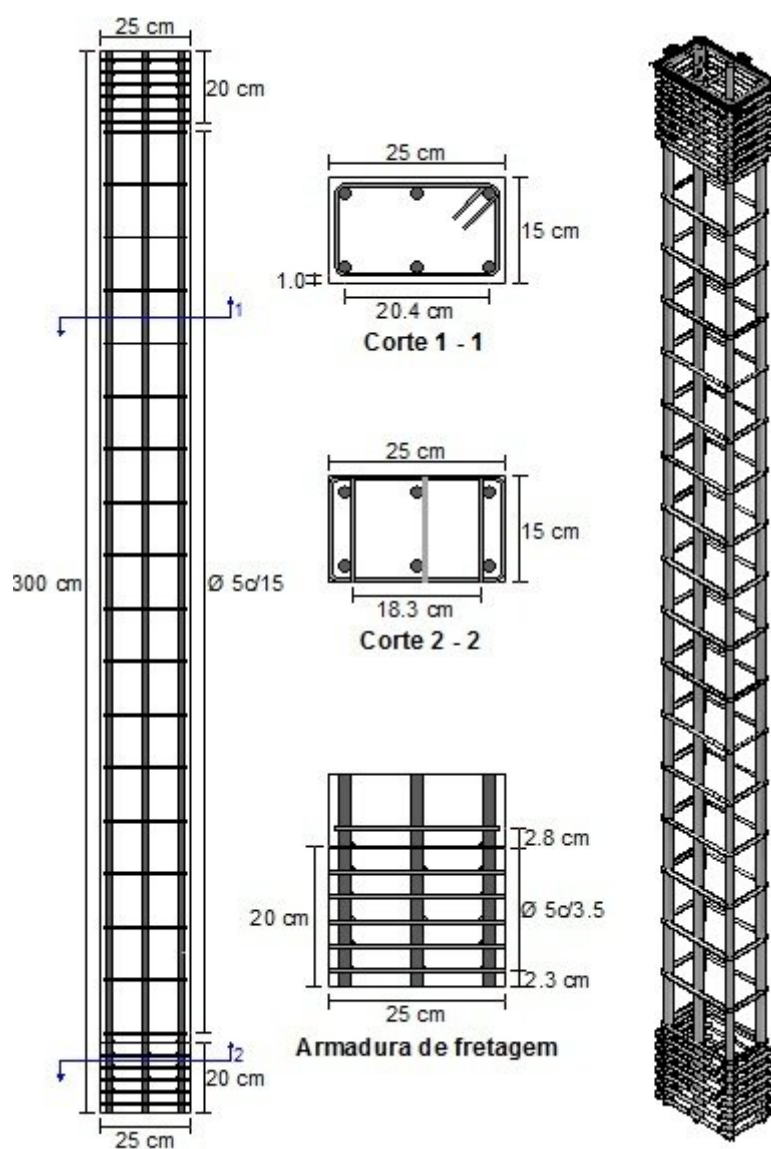


Figura 3.16 - Detalhamento das armaduras dos pilares C40-3.2 e C80-3.2

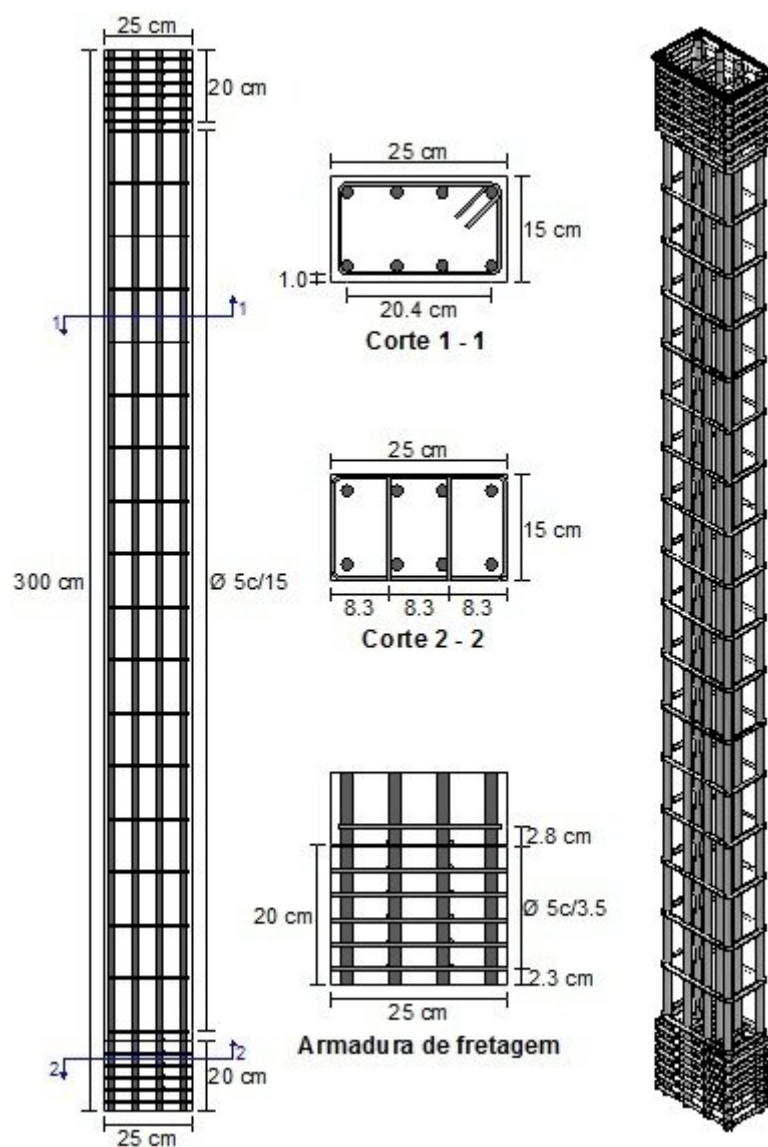


Figura 3.17 - Detalhamento das armaduras dos pilares C40-4.3 e C80-4.3

3.5.2. Fôrmas

Foi utilizada uma fôrma metálica composta por três perfis U laminados: dois perfis laterais com altura de 20 cm e um perfil na base com $h = 25$ cm. Os perfis tinham comprimento de 6.0 m, o que possibilitou a moldagem de dois pilares em uma só operação de concretagem.

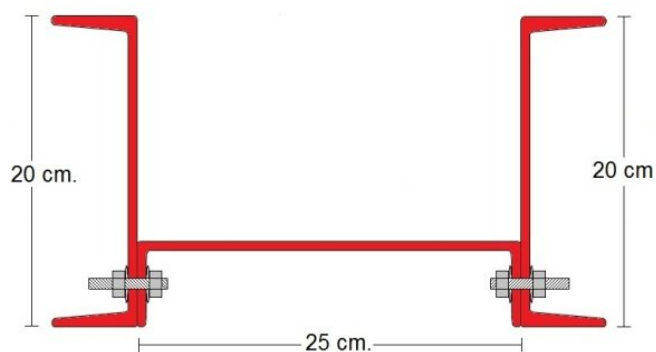


Figura 3.18 - Detalhes da forma metálica



Figura 3.19 – Disposição das armaduras na fôrma metálica

3.5.3. Concretagem, adensamento e cura

Todos os pilares foram concretados horizontalmente. Para o posicionamento das armaduras dentro da fôrma empregaram-se espaçadores de plástico na parte inferior e nas laterais do pilar, garantindo o cobrimento especificado.

Para a mistura dos materiais, utilizou-se uma betoneira com capacidade de 340 litros. Para cada pilar foram moldados oito corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm para obter os valores de resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade.

O adensamento do concreto foi feito com um vibrador de agulha, e a cura dos pilares e os corpos de prova foram feitos através de molhagens sucessivas durante dois dias.



Figura 3.20 – Concretagem do pilar

3.5.4. Instrumentação

Somente a armadura longitudinal foi instrumentada para a medição das deformações com extensômetros elétricos de resistência (Marca EXCEL, tipo PA-06-250BA-120-L) com 10mm de comprimento. A medição das deformações no concreto foi feita também com extensômetros elétricos de resistência da marca EXCEL do tipo PA-06-201BA-120-L com 60mm de comprimento.

Para a medição dos deslocamentos horizontais na região central e superior do pilar, foram utilizados transdutores de deslocamentos.

A figura 3.21 mostra a posição dos extensômetros na seção localizada a meia altura do pilar.

As leituras obtidas com o transdutor de pressão, os extensômetros e transdutores de deslocamentos foram registrados através de um sistema de aquisição de dados controlado pelo software LABVIEW 8.2 da National Instrument.

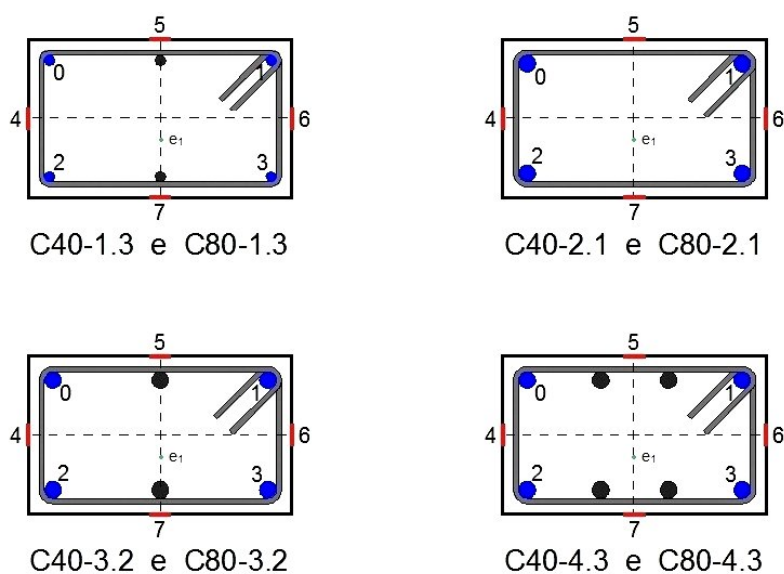


Figura 3.21 - Posicionamento dos extensômetros elétricos no aço e concreto na seção localizada a meia altura do pilar



Figura 3.22 – Extensômetros elétricos colados no aço e no concreto

3.5.5. Procedimento de ensaio

Os ensaios foram realizados num pórtico metálico fixado na laje de reação do laboratório (Figuras 3.23 e 3.24). A carga foi aplicada através de um atuador hidráulico com capacidade de 2000 kN, acionado por bomba hidráulica manual.

Na parte superior do pórtico foram fixados dois perfis vazados de aço onde foram colocadas barras rosqueadas que garantiram o posicionamento do pilar. Para a distribuição de carga na base e no topo do pilar foram usadas chapas metálicas. Os pilares foram posicionados no pórtico, nivelados com ajuda das barras rosqueadas e alinhados com o eixo da rótula.

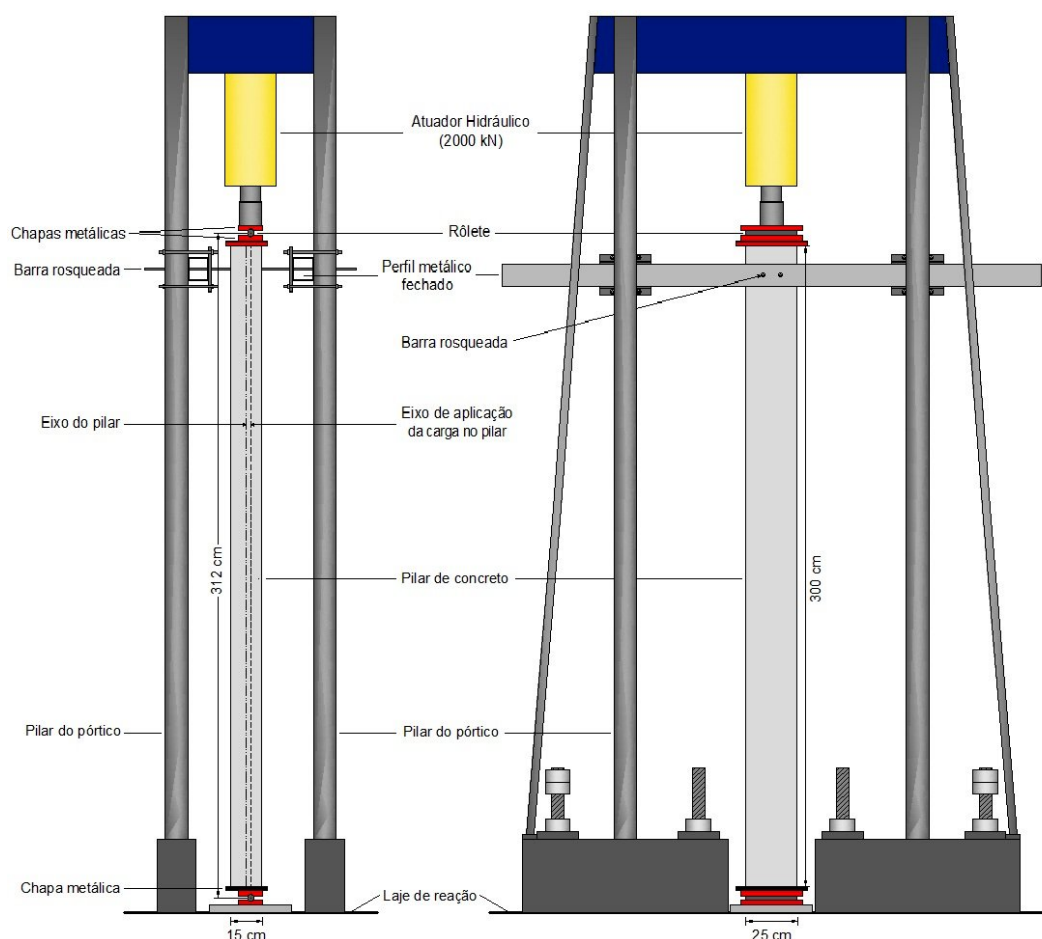


Figura 3.23 – Esquema do equipamento de ensaio e montagem do pilar



Figura 3.24 – Posicionamento do pilar – Excentricidade inicial