

1. INTRODUÇÃO

239421

Estudo experimental de consolos em concreto armado

Cristina Haguenauer Naegeli

RESUMO

Este trabalho faz parte de uma linha de pesquisa desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da PUC-RJ envolvendo a análise computacional e experimental de consolos em concreto armado. São apresentados os resultados da análise experimental de nove peças em verdadeira grandeza, onde as principais variáveis envolvidas foram: a quantidade de armadura principal, a existência de armadura distribuída, a existência de carregamento axial no pilar e a distância do carregamento à face do pilar (a/d).

Cristina Haguenauer Naegeli é Engenheira Civil pela UERJ, Mestre em Estruturas pela PUC-RJ, Professora do Departamento Acadêmico de Construção Civil do CEFET-PR.

1. INTRODUÇÃO

Os consolos são utilizados freqüentemente em estruturas de concreto armado, servindo de apoio para outros elementos estruturais ou para equipamentos pesados, como pontes rolantes.

Vários pesquisadores como Franz e Niedenhoff [1], Kriz e Rath [2], Robinson [3] e outros, têm-se dedicado à análise experimental destes elementos. Apesar disto, encontram-se, na vasta literatura analisada, poucos ensaios de peças com consolos não simétricos (figura 1a), se comparados ao número de ensaios em peças com consolos simétricos (figura 1b).

A diferença de comportamento destes dois modelos distintos pode ser melhor observada através das trajetórias de tensões obtidas de estudos fotoelásticos (figuras 2a e 2b) e nas peças ensaiadas por Franz/Niedenhoff, Kriz/Raths e Robinson (figuras 3a, 3b e 3c).

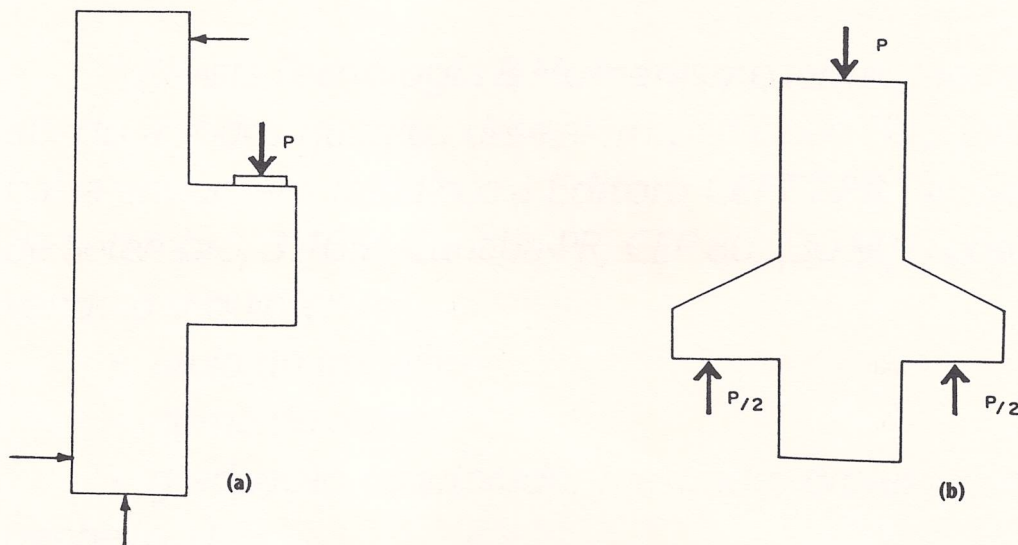


Figura 1: (a) Peça não simétrica, (b) Peça simétrica.

Outro ponto importante a ser ressaltado é o fato de que a existência de carregamento axial no pilar altera, significativamente, o aspecto da fissuração no mesmo, chegando até mesmo a influir na resistência final do consolo (figuras 4a e 4b).

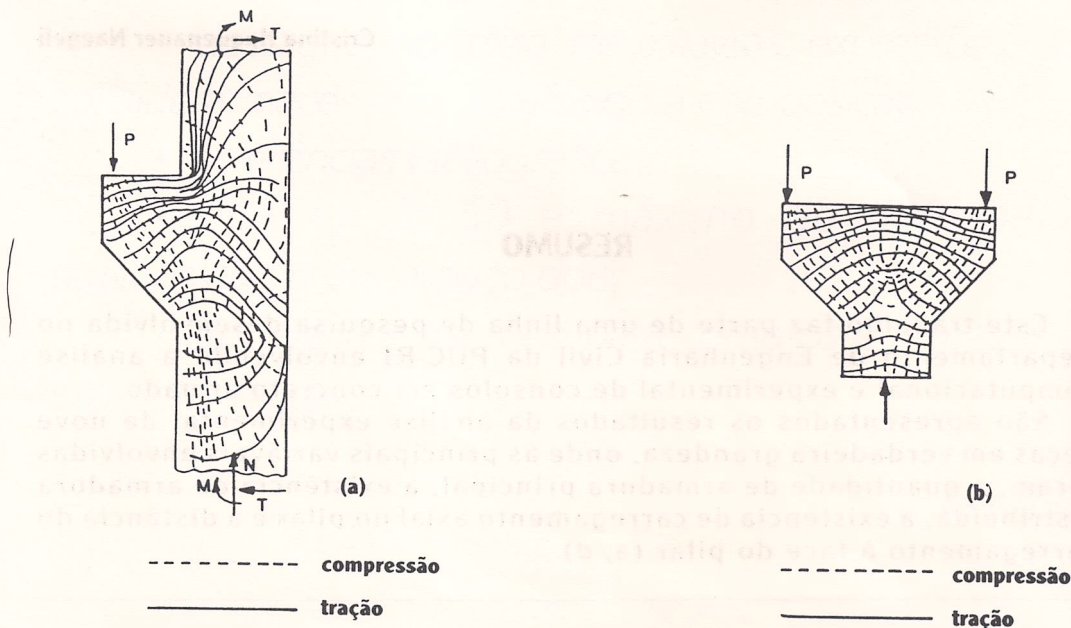


Figura 2: Trajetórias de tensões em consolos. (a) Não simétricos, (b) Simétricos.

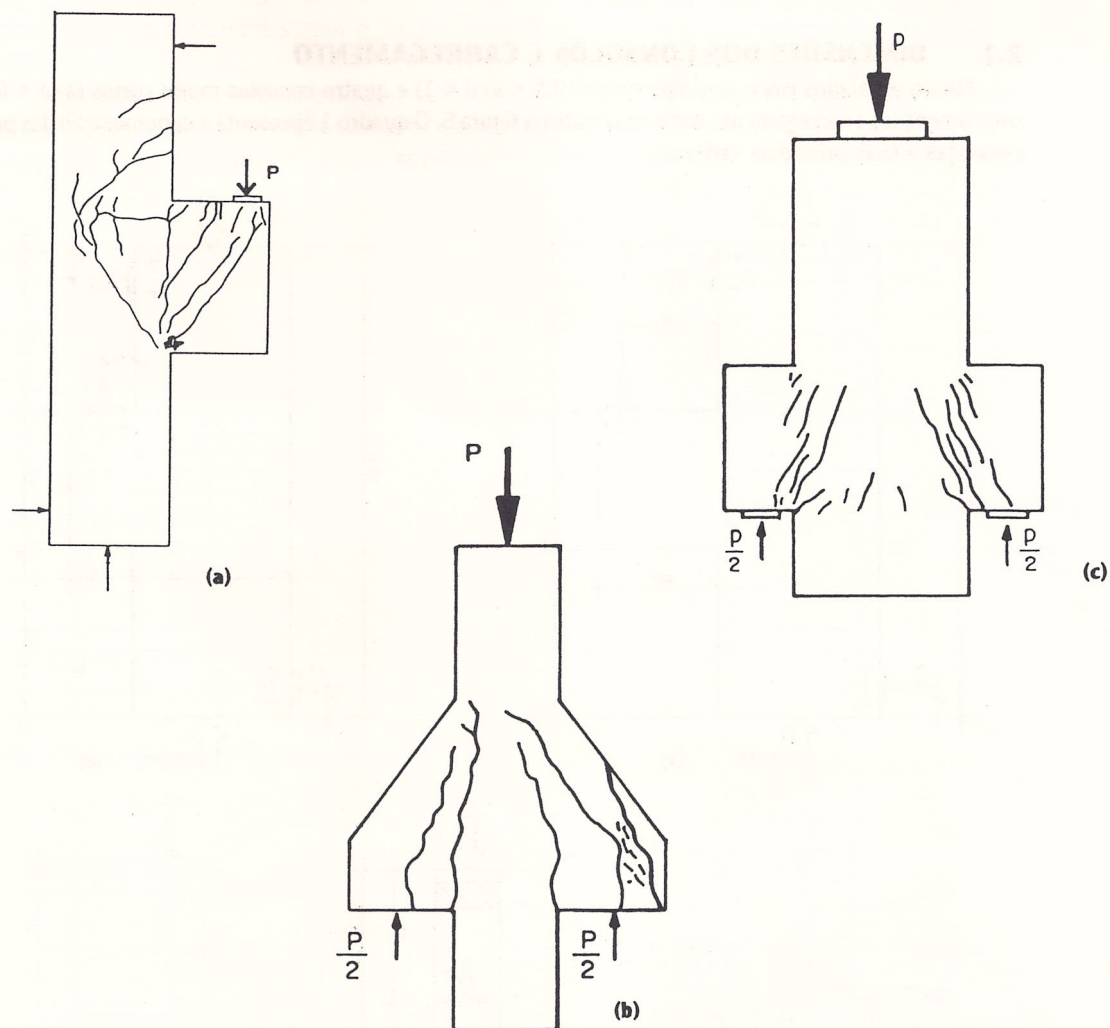


Figura 3: Peças ensaiadas por: (a) Franz e Niedenhoff, (b) Kriz e Rath, (c) Robinson.

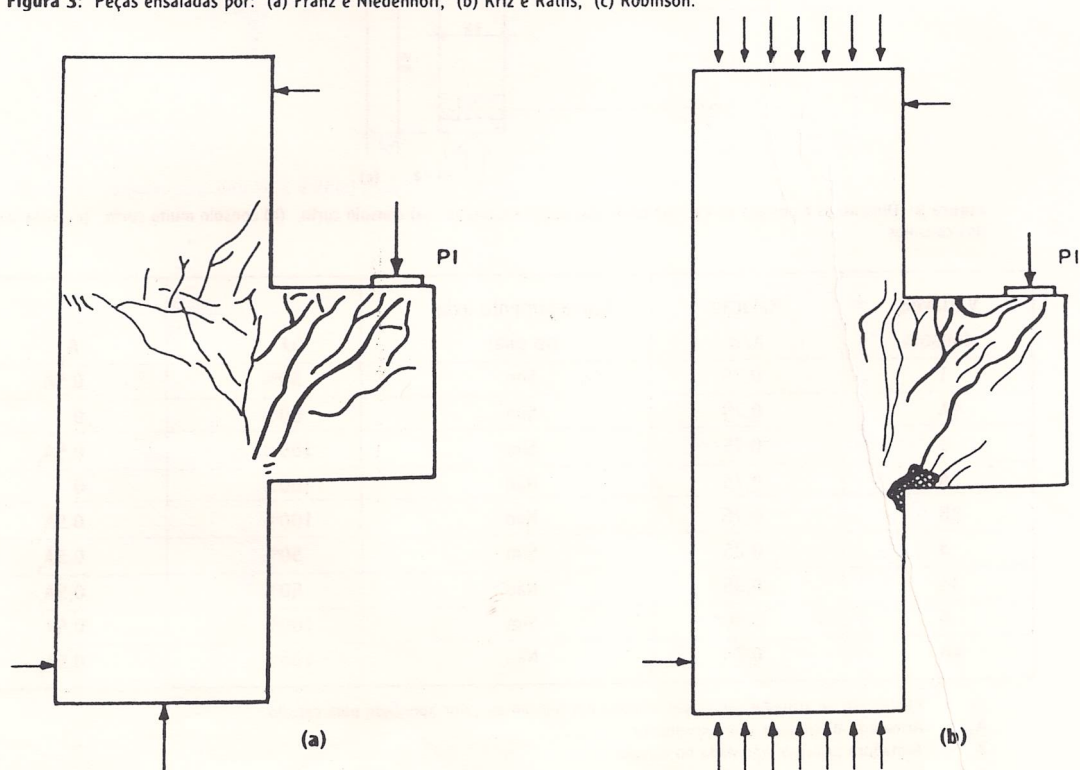


Figura 4: Aspectos da fissuração em consolos: (a) sem carregamento axial no pilar, (b) com carregamento axial no pilar.

2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

2.1. DIMENSÕES DOS CONSOLOS E CARREGAMENTO

Foram ensaiados cinco consolos curtos ($0,5 < a/d < 1$) e quatro consolos muito curtos ($a/d \leq 0,5$), com dimensões e carregamento como mostrado na figura 5. O quadro 1 apresenta a denominação das peças ensaiadas e suas principais variáveis.

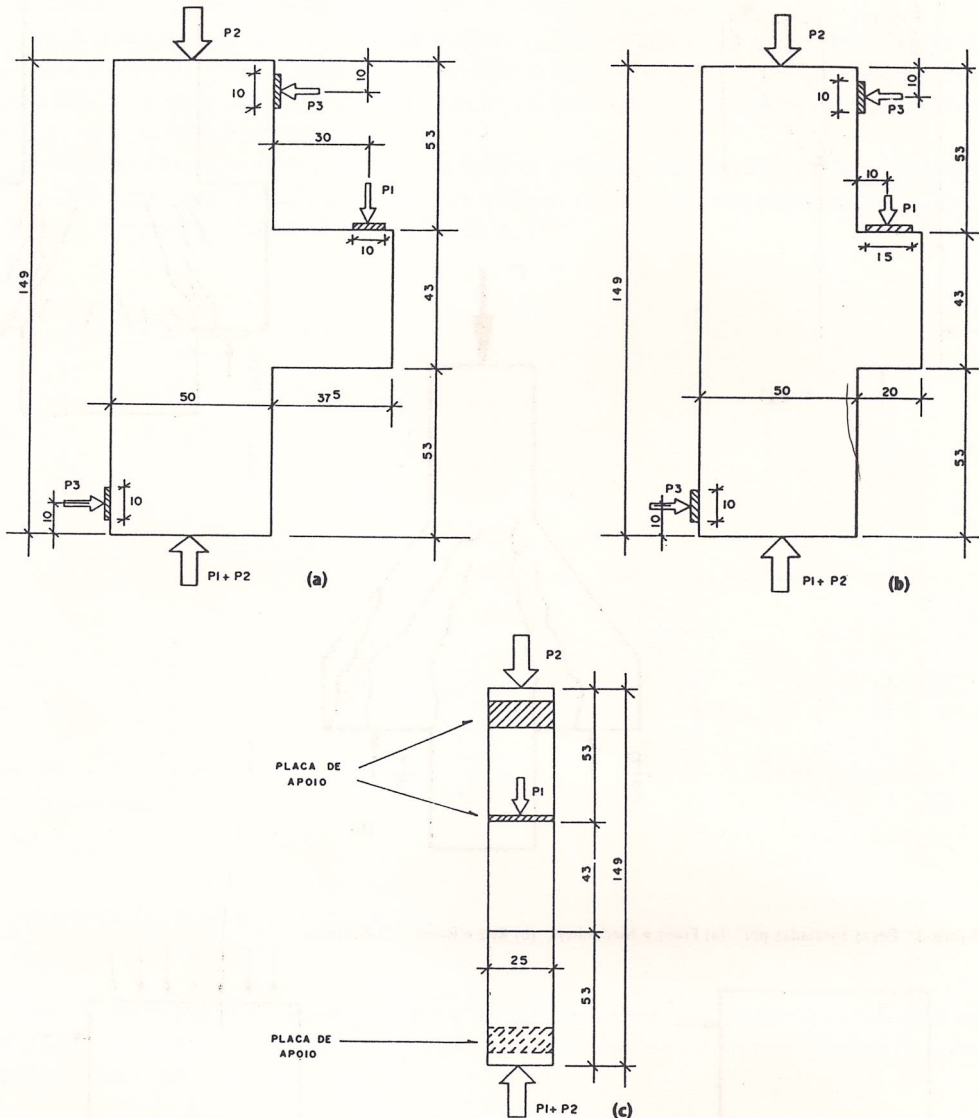


figura 5: Dimensões e posição do carregamento das peças ensaiadas: (a) consolo curto, (b) consolo muito curto, (c) vista lateral dos consolos.

Variáveis consolo	Relação a/d	Carregamento axial no pilar	ω	A_d
1	0,75	Sim	50%	$0,5A_s$
1A	0,75	Sim	50%	0
2	0,75	Sim	100%	$0,5A_s$
2A	0,75	Não	100%	0
2B	0,75	Não	100%	$0,5A_s$
3	0,25	Sim	50%	$0,5A_s$
3A	0,25	Não	50%	$0,5A_s$
4	0,30*	Sim	100%	$0,5A_s$
4A	0,25	Não	100%	$0,5A_s$

ω = Percentual de armadura principal adotada em relação ao valor apontado pelo cálculo.
 A_d = Armadura distribuída sobre o consolo.
 A_s = Armadura principal apontada no cálculo.
 * = A peça 4, prevista com uma relação $a/d = 0,25$, por um erro na montagem, apresentou $a/d = 0,30$.

Quadro 1: Denominação das peças ensaiadas e suas principais variáveis.

2.2. ARMAÇÃO

As peças ensaiadas foram dimensionadas segundo as recomendações do CEB [4]. Algumas modificações foram introduzidas com o intuito de facilitar o estudo do mecanismo de ruptura e do desenvolvimento da fissuração: os consolos 1 e 1A possuem metade da armadura principal apontada no cálculo; os consolos 1A e 2A não possuem armadura distribuída sobre o consolo e os consolos 3 e 3A não possuem a segunda camada de armadura principal disposta na altura $d = 2a$, recomendada pelo CEB.

A armação dos consolos é mostrada nas figuras 6, 7 e 8 e quadro 2.

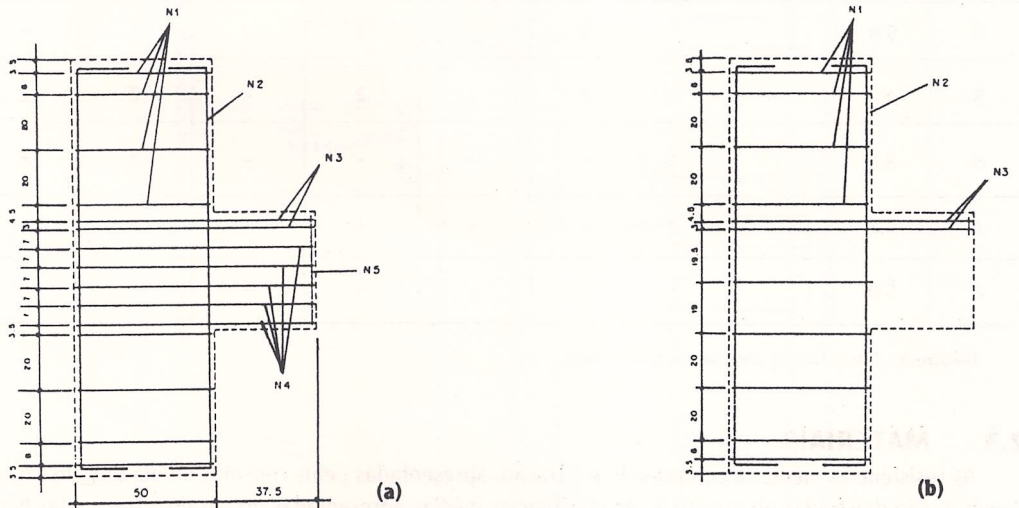


Figura 6: Armação nos consolos 1(a) e 1A(b).

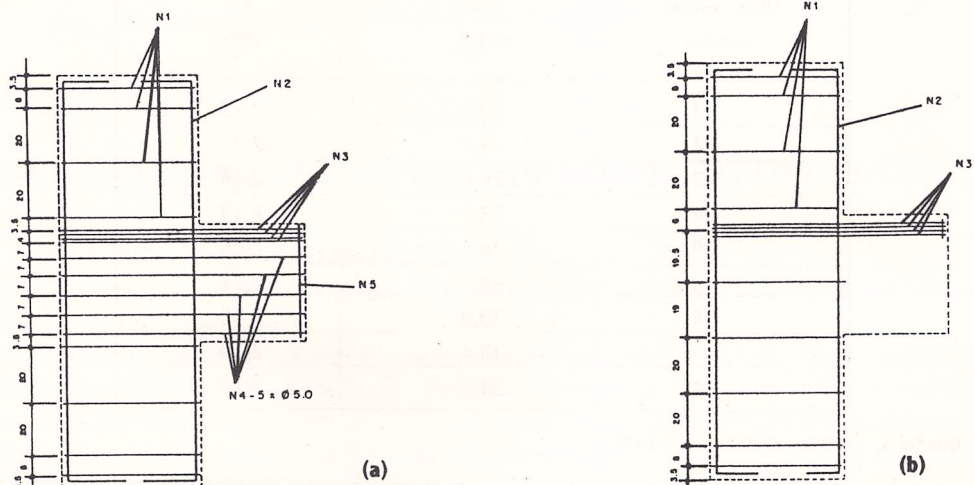


Figura 7: Armação nos consolos 2 e 2B(a) e 2A(b).

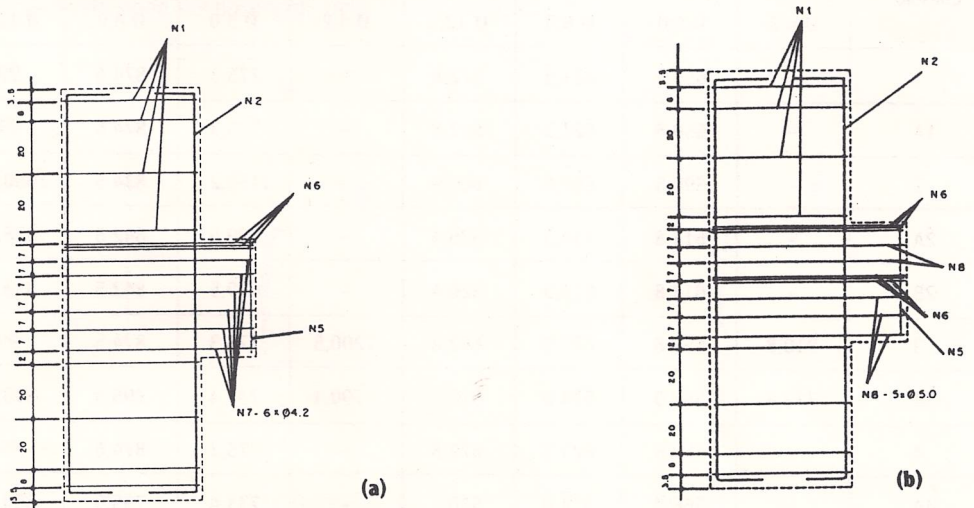
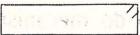
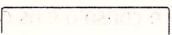
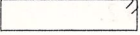
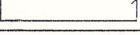
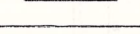
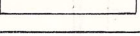
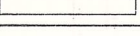
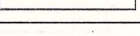


Figura 8: Armação dos consolos 3 e 3A(a), 4 e 4A(b).

N	Ø	Forma	Consolo 1	Consolo 1A	Consolos 2 e 2B	Consolo 2A	Consolos 3 e 3A	Consolos 4 e 4A
1	5,0		8	9	8	9	8	8
2	12,5		8	8	8	8	10	10
3	8,0		2	2	4	4	-	-
4	5,0		5	-	5	-	-	-
5	4,2		2	-	2	-	2	2
6	8,0		-	-	-	-	3	6
7	4,2		-	-	-	-	6	-
8	5,0		-	-	-	-	-	5

Quadro 2: Quantidade de armação em cada consolo.

2.3. MATERIAIS

As resistências médias à compressão e à tração, apresentadas pelos consolos no dia dos ensaios dos mesmos, são mostradas no quadro 3. As resistências médias apresentadas no ensaio à tração das barras de aço são apresentadas no quadro 4.

Propriedades consolo	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)
1	33,4	2,73
1A	34,2	2,75
2	24,0	2,14
2A	23,8	2,13
2B	22,6	2,06
3	34,7	2,78
3A	30,0	2,50
4	33,4	2,70
4A	34,0	2,74

Quadro 3: Resistências médias do concreto.

Consolo	Escoamento f_y (MPa)				Ruptura f_{su} (MPa)			
	Ø 4,2	Ø 5,0	Ø 8,0	Ø 12,5	Ø 4,2	Ø 5,0	Ø 8,0	Ø 12,5
1	-	659,8	821,3	672,8	-	775,3	874,6	996
1A	-	659,8	821,3	672,8	-	775,3	874,6	996
2	-	890,5	607,8	660,9	-	1153,2	834,5	1000,3
2A	-	613,8	614,3	526,4	-	699,5	842,5	838,3
2B	-	613,8	614,3	526,4	-	699,5	842,5	838,3
3	910,8	659,8	821,3	672,8	1200,5	775,3	874,6	996
3A	719,4	566,0	514,0	510,7	790,1	733,4	795,0	800,8
4	-	659,8	821,3	672,8	-	775,3	874,6	996
4A	-	566,0	514,0	510,7	-	733,4	795,0	800,8

Quadro 4: Resistências médias do aço.

2.4. MONTAGEM

A montagem dos ensaios, feita através de elementos em aço juntamente com o pórtico existente no Laboratório de Ensaios de Materiais do Departamento de Engenharia Civil da PUC-RJ (LEM/DEC-PUC), é apresentada na figura 9.

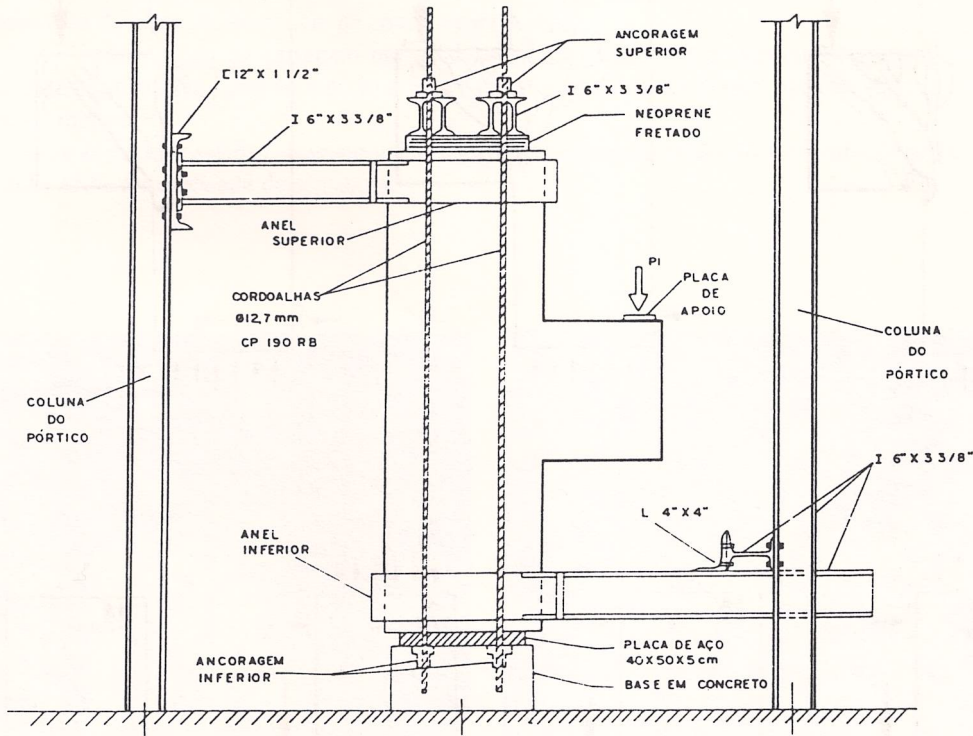


Figura 9: Montagem das peças para os ensaios.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1. DESENVOLVIMENTO DAS FISSURAS

Em todos os consolos, as primeiras fissuras observadas foram as de flexão, localizadas na face superior, na região de interseção com o pilar.

Nos consolos 1 e 1A observa-se apenas o desenvolvimento das fissuras de flexão. Nos consolos 2, 2A e 2B observou-se, além da fissuração de flexão, uma fissuração bastante significativa na biela comprimida. Nos consolos 3, 3A, 4 e 4A (consolos muito curtos) observou-se, inicialmente, a predominância da fissuração de cisalhamento e posteriormente, para estágios de carregamento mais elevados, o surgimento da fissuração na biela.

A existência de carregamento axial no pilar influenciou significativamente no aspecto da fissuração do mesmo; este fato pode ser observado pela análise da figura 10.

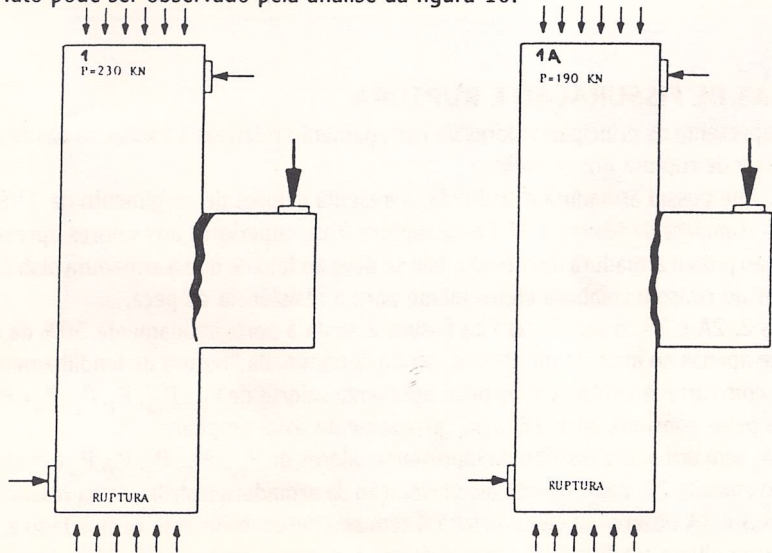


Figura 10: Aspecto da fissuração apresentada pelos consolos ensaiados.

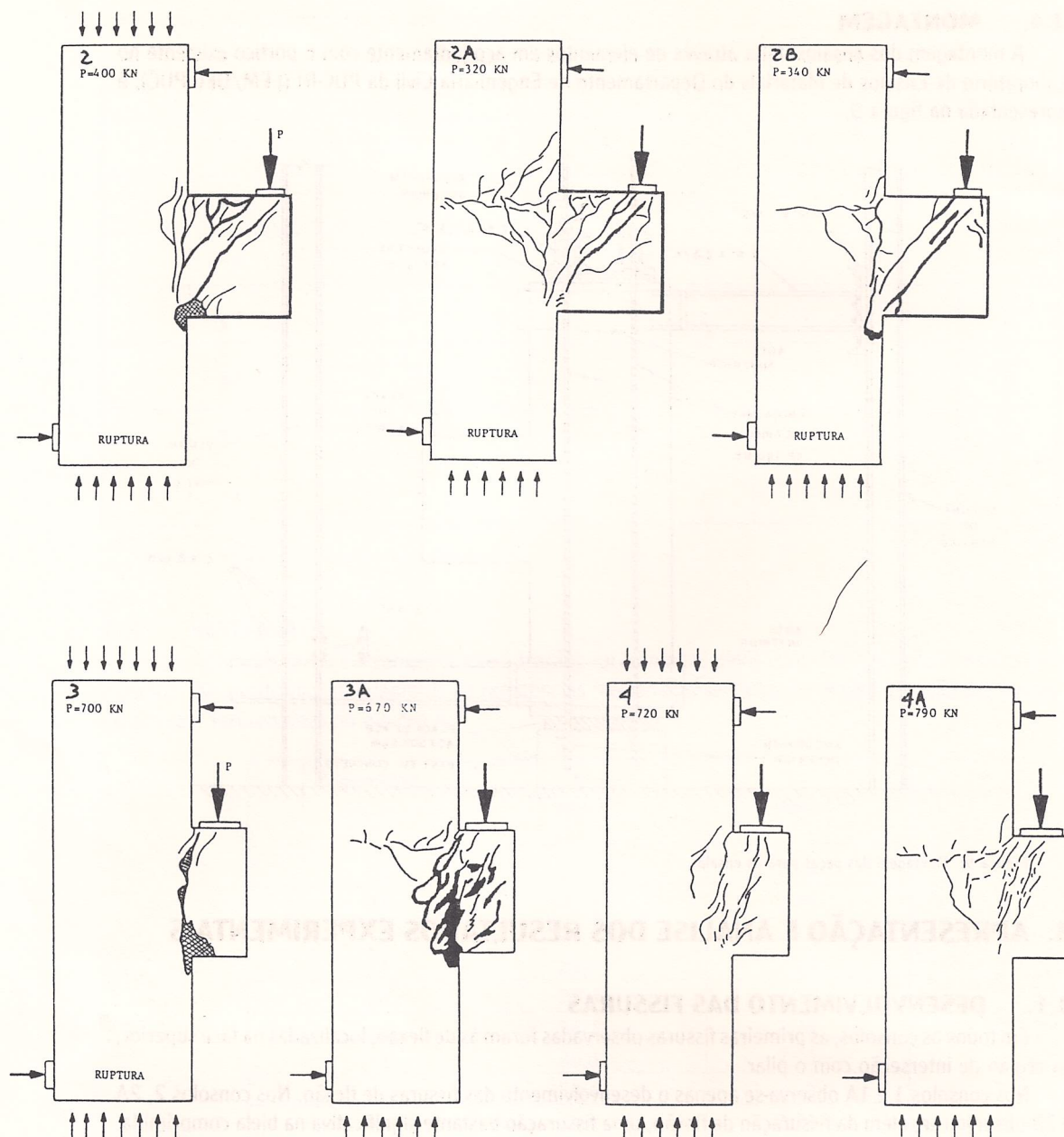


Figura 10 (continuação): Aspecto da fissuração apresentada pelos consolos ensaiados.

3.2. CARGAS DE FISSURAÇÃO E RUPTURA

O quadro 5 apresenta os principais valores de carregamento relativos à formação das fissuras e a sua relação com a carga de ruptura dos consolos.

O consolo 1, que possui armadura distribuída, apresenta valores de surgimento da 1ª fissura (P_{FV} e P_{FE}), de formação completa da fissura 1 (P_1) e da ruptura (P_u), superiores aos valores apresentados pelo consolo 1A, que não possui armadura distribuída. Isto se deve ao fato de que a armadura distribuída situada na região superior do consolo colabora efetivamente para a resistência da peça.

Nos consolos 2, 2A e 2B, o surgimento da fissura 2 se dá a aproximadamente 50% da carga última e a fissura 3 surge apenas no instante da ruptura, sendo denominada “fissura de fendilhamento da biela”.

O consolo 2, com carregamento axial no pilar, apresenta valores de P_{FV} , P_{FE} , P_1 , P_2 , P_3 e P_u superiores aos apresentados pelos consolos 2A e 2B, sem carregamento axial no pilar.

O consolo 2A, sem armadura distribuída, apresenta valores de P_{FV} , P_{FE} , P_1 , P_2 , P_3 e P_u inferiores aos apresentados pelo consolo 2B, confirmando a contribuição da armadura distribuída na resistência da peça.

Nos consolos 3 e 3A observa-se que a fissura 4 tem seu desenvolvimento completado a aproximadamente 50% da carga última e a fissura 5 surge próxima à ruptura, em torno de 90% da carga última.

Para os consolos 4 e 4A não foi possível a determinação da carga de ruptura, pois a resistência destas peças foi superior à capacidade de carregamento do equipamento do laboratório.

Os mecanismos de ruptura básicos descritos na literatura [5] foram observados com nitidez nas peças ensaiadas. Os consolos 1 e 1A romperam por flexão, com escoamento da armadura principal; os consolos 2, 2A e 2B romperam por fendilhamento da biela comprimida; os consolos 3 e 3A romperam por cisalhamento do plano de interseção do consolo com o pilar.

A existência ou não de carregamento axial no pilar e de armadura distribuída, embora tenham influenciado significativamente no aspecto e no tamanho das aberturas de fissura, não têm influência sobre o tipo de ruptura.

Dentre as peças ensaiadas observou-se que os fatores capazes de influir no mecanismo de ruptura são a relação a/d e a quantidade de armadura.

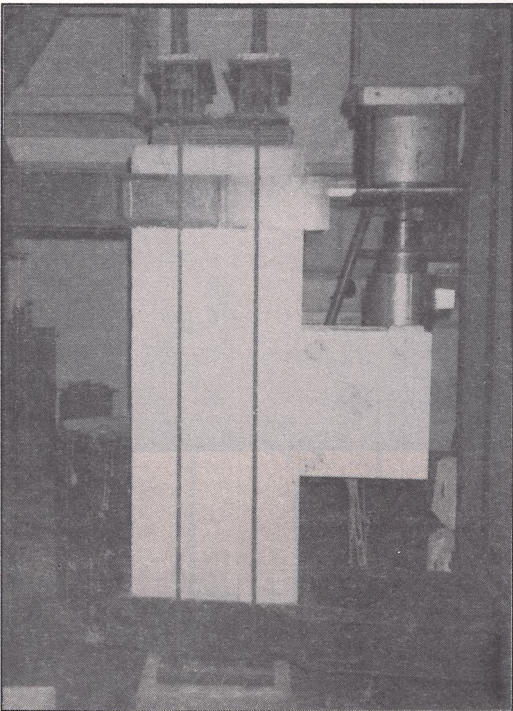


Figura 11: Vista geral do consolo 1, preparado para o ensaio.

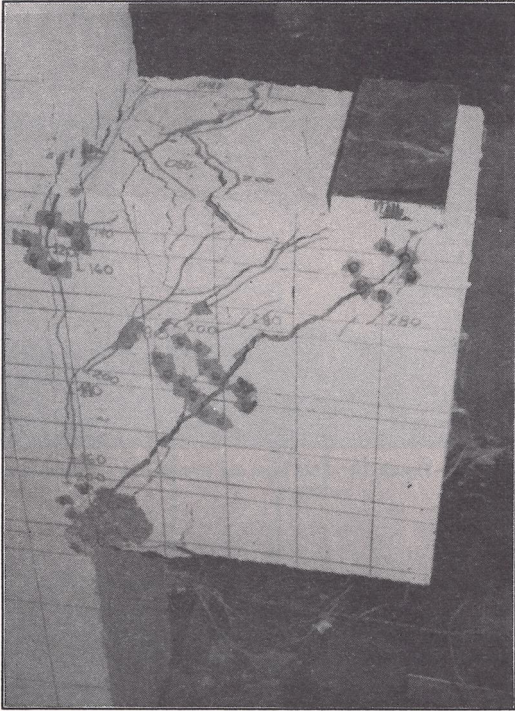
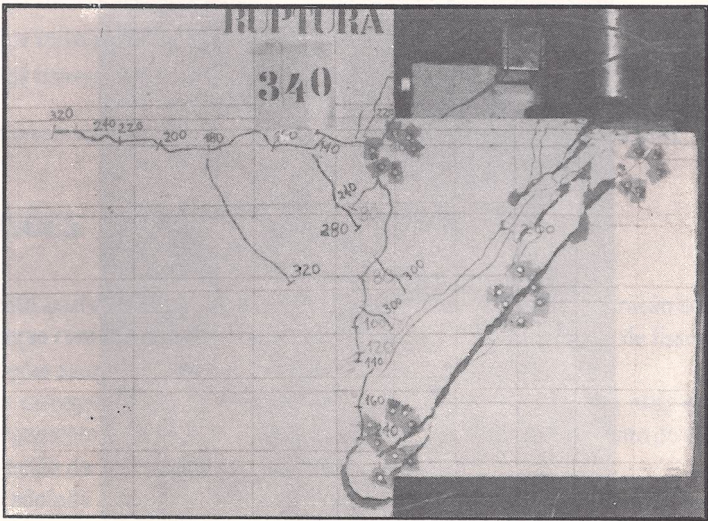


Figura 12: Detalhe do consolo 2 após a ruptura.

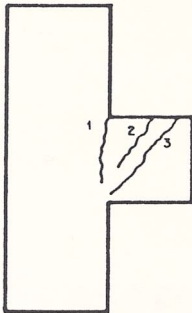


Figur 13: Detalhe do consolo 2B apos a ruptura.

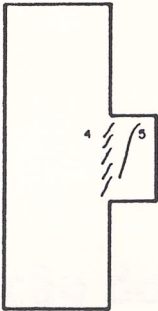
Consolo	P_u	P_{FV}	P_{FE}	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	$\frac{P_{FV}}{P_u}$	$\frac{P_{FE}}{P_u}$	$\frac{P_1}{P_u}$	$\frac{P_2}{P_u}$	$\frac{P_3}{P_u}$	$\frac{P_4}{P_u}$	$\frac{P_5}{P_u}$
1	230	80	62	100	-	-	-	-	0,35	0,27	0,43	-	-	-	-
1A	190	60	58	80	-	-	-	-	0,32	0,31	0,42	-	-	-	-
2	400	120	110	160	200	400	-	-	0,30	0,28	0,40	0,50	1	-	-
2A	320	40	50	100	160	320	-	-	0,13	0,16	0,31	0,50	1	-	-
2B	340	60	70	100	180	340	-	-	0,18	0,21	0,29	0,53	1	-	-
3	700	280		-	-	-	380	600	0,40		-	-	-	0,54	0,86
3A	670	175		-	-	-	380	650	0,26		-	-	-	0,57	0,97
4	720*	85		-	-	-	320	550	-	-	-	-	-		
4A	790*	170		-	-	-	350	650	-	-	-	-	-		

* último valor observado

onde:



Consolos curtos



Consolos muito curtos

- P_u = carga última.
- P_{FV} = carga correspondente ao surgimento da 1ª fissura, obtida visualmente.
- P_{FE} = carga correspondente ao surgimento da primeira fissura, obtida através dos extensômetros elétricos.
- P_1 = carga correspondente à formação da fissura 1.
- P_2 = carga correspondente à formação da fissura 2.
- P_3 = carga correspondente à formação da fissura 3.
- P_4 = carga correspondente à formação da fissura 4.
- P_5 = carga correspondente à formação da fissura 5.

Quadro 5: Comparação entre a carga de formação de fissuras e a carga última (KN).

4. CONCLUSÕES

O carregamento axial aplicado ao pilar mostrou-se eficaz no controle da fissuração do pilar e do consolo. Os consolos das peças com carregamento axial no pilar apresentaram aberturas de fissura menores do que os consolos das peças sem carregamento axial no pilar.

As peças com carregamento axial no pilar apresentaram cargas de ruptura mais elevadas em relação às peças sem carregamento axial no pilar. Este fato pode ser explicado pelo aumento do efeito de ancoragem na armadura na região do pilar, causado pelo carregamento axial no pilar.

A montagem adotada apresentou resultados bastante satisfatórios, confirmando a expectativa de que a adoção de peças não simétricas conduziria a um comportamento bastante diferenciado daquele obtido através de peças simétricas.

A armadura distribuída apresentou grande importância no controle da fissuração, além de contribuir para a resistência última da peça. Considera-se que esta armadura apresenta ainda maior eficiência quando distribuída também ao longo da espessura do consolo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Franz, G., und Niedenhoff, H., "Die Bewehrung von Konsolen und Gedrungenen Balken", Beton und Stahlbetonbau 5/1963.
- [2] Kriz, L.B., and Raths, C.H., "Connections in Precast Concrete Structures - Strength of Corbels", PCI Journal, fev. 1965.
- [3] Robinson, J.R., "L'Armature des Consoles Courtes" Aus Theorie und Praxis des Stahlbetonbaues, Festschrift zum 65 Geburtstag von Herrn Professor Dr. Ing. Gottard Franz - Ernst & Sohn, Berlin/Muenchen, 1969.
- [4] CEB-FIP, "Model Code for Concrete Structures", Comité Euro-Internacional du Béton, Paris, 1978.
- [5] Naegeli, C.H., "Estudo Experimental de Consolos em Concreto Armado", Tese de Mestrado apresentada à PUC-RJ, 1988.