

4 Apresentação e Análise dos Resultados

4.1. Comportamento dos Pilares

4.1.1. Controle de imperfeições e dimensões dos pilares

Em todos os pilares foi feito controle das imperfeições iniciais da peça antes do ensaio. A tabela 4.1 mostra um resumo das imperfeições encontradas nos pilares.

Pilar	Imperfeição
L450-E0	Flecha de 3,5 mm na direção y e de 4 mm em x (figura 4. 1);
L300-E0-A0	A seção do topo estava torcida 5 mm em relação a seção da base;
L300-E5-A3	Flecha de 2 mm na direção x;
L150-E0	A placa de vedação do topo estava inclinada 2 mm em y e 3,5 mm em x.

Tabela 4.1 – Imperfeições iniciais dos pilares.

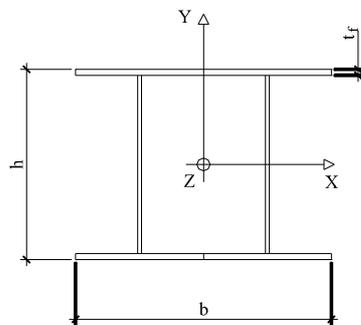


Figura 4.1 – Eixo xy na seção transversal do pilar.

Foi realizado também um controle dimensional dos pilares. A tabela 4.2 apresenta os valores médios da espessura da mesa t_f , da largura b e da altura h da seção (conforme figura 4.1), medidos em três seções ao longo do comprimento do pilar: próximo ao topo, próximo à base e na seção intermediária. Os valores teóricos são: $t_f = 4,75$ mm, $b = 20$ cm e $h = 15$ cm, conforme indicado na figura 3.27.

Pilar	t_f (mm)	b (cm)	h (cm)
L450-E0	5,0	20,0	15,2
L450-E2.5	4,9	20,0	15,0
L450-E5	5,0	20,0	14,8
L300-E0-A0 *	5,1	19,9	15,1
L300-E0-A3 *	5,1	20,0	15,1
L300-E0-A4.8 *	5,0	20,0	15,1
L300-E2.5-A0	5,2	19,9	15,1
L300-E2.5-A3	5,1	20,0	15,0
L300-E2.5-A4.8	5,0	20,0	15,0
L300-E5-A0	5,0	20,0	14,6
L300-E5-A3	5,0	19,9	15,0
L300-E5-A4.8	4,9	20,0	14,7
L150-E0 *	5,0	20,0	15,0
L150-E2.5	5,2	20,0	14,9
L150-E5	5,1	20,0	15,0

Tabela 4.2 – Controle dimensional dos pilares.

OBS.: Os pilares identificados com asterisco nas tabelas 4.2 e 4.3 apresentaram ninhos de concretagem, conforme citado no item 4.1.2 a seguir.

4.1.2. Modos de ruptura

A tabela 4.3 mostra os resultados gerais obtidos nos ensaios. As cargas e as deformações dadas nesta tabela são definidas como:

P_y – carga correspondente à deformação $\epsilon_y = 3,5 \%$ na seção, no ponto mais solicitado;

P_u – carga máxima observada no ensaio;

ϵ_u – deformação correspondente a P_u .

Pilar	le (m)	e (cm)	A_s (cm ²)	P_y (tf)	P_u (tf)	ϵ_u (‰)		Modo de ruptura
						mín	máx	
L450-E0	4,5	0,0	4,8	-	61,5	-2,1	+0,5	Flambagem
L450-E2.5	4,5	2,5	4,8	-	38,1	-2,5	+1,4	Flambagem
L450-E5	4,5	5,0	4,8	34,5	35,2	-4,0	+4,1	Esgotamento da seção
L300-E0-A0 *	3,0	0,0	0,0	-	76,1	-2,2	-0,5	Esgotamento da seção
L300-E0-A3 *	3,0	0,0	3,0	-	100,3	-2,7	+0,6	Esgotamento da seção
L300-E0-A4.8 *	3,0	0,0	4,8	91,0	92,1	-3,7	+0,7	Esgotamento da seção
L300-E2.5-A0	3,0	2,5	0,0	67,0	68,7	-4,9	+2,9	Esgotamento da seção
L300-E2.5-A3	3,0	2,5	3,0	63,0	64,3	-5,8	+3,2	Esgotamento da seção
L300-E2.5-A4.8	3,0	2,5	4,8	62,5	65,1	-4,0	+2,6	Esgotamento da seção
L300-E5-A0	3,0	5,0	0,0	46,7	46,7	-4,0	+3,5	Esgotamento da seção
L300-E5-A3	3,0	5,0	3,0	43,0	47,0	-5,5	+2,3	Esgotamento da seção
L300-E5-A4.8	3,0	5,0	4,8	45,0	46,1	-5,9	+3,4	Esgotamento da seção
L150-E0 *	1,5	0,0	4,8	95,0	98,3	-8,0	+0,6	Esgotamento da seção
L150-E2.5	1,5	2,5	4,8	77,0	86,5	-6,0	+2,1	Esgotamento da seção
L150-E5	1,5	5,0	4,8	66,0	77,2	-7,5	+4,5	Esgotamento da seção

Tabela 4.3 – Resultados gerais obtidos nos ensaios.

Apenas os dois primeiros pilares (L450-E0 e L450-E2.5) romperam por flambagem à flexão, em todos os outros a deformação máxima ultrapassou 3,5 %.

A flambagem local nos flanges e na alma do perfil somente começou a ocorrer após o pico de resistência.

Após a conclusão dos ensaios foram abertas janelas nos perfis metálicos nos trechos onde ocorreu a flambagem com a finalidade de se verificar a qualidade da concretagem. Constatou-se nos pilares L300-E0-A0, L300-E0-A3, L300-E0-A4.8 e L150-E0 (identificados com asterisco) a presença ninhos de concretagem nestes trechos, como mostram as figuras 4.13, 4.17, 4.22, 4.49. Devido a este problema, os resultados de tais pilares foram excluídos deste estudo.

As figuras 4.2 a 4.57 mostram a configuração deformada final dos pilares, os detalhes da flambagem local do perfil e as aberturas neles feitas.



Figura 4.2 – Deformação final do pilar L450-E0.



Figura 4.3 –Flambagem local do L450-E0.



Figura 4.4 – Deformação final do pilar L450-E2.5.



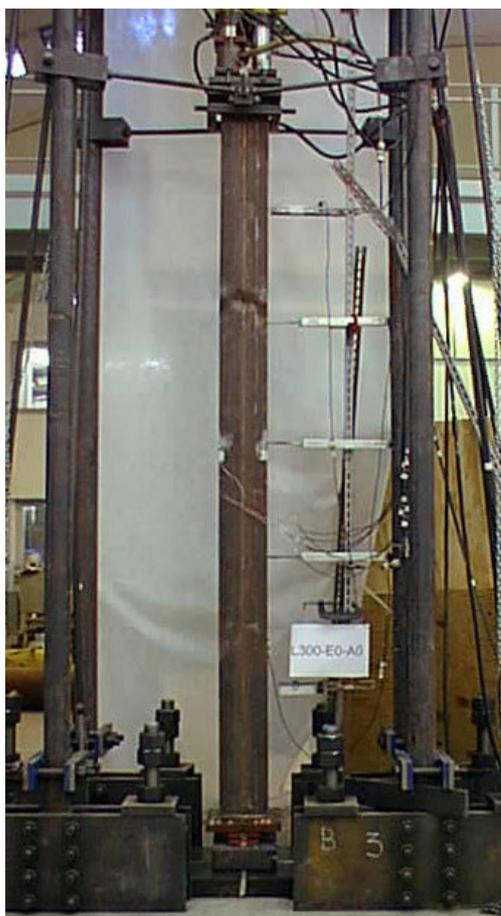
Figura 4.5 –Flambagem local do L450-E2.5.



Figura 4.6 – Deformação final do pilar L450-E5.



Figuras 4.7 e 4.8 – Detalhes da flambagem local do L450-E5.



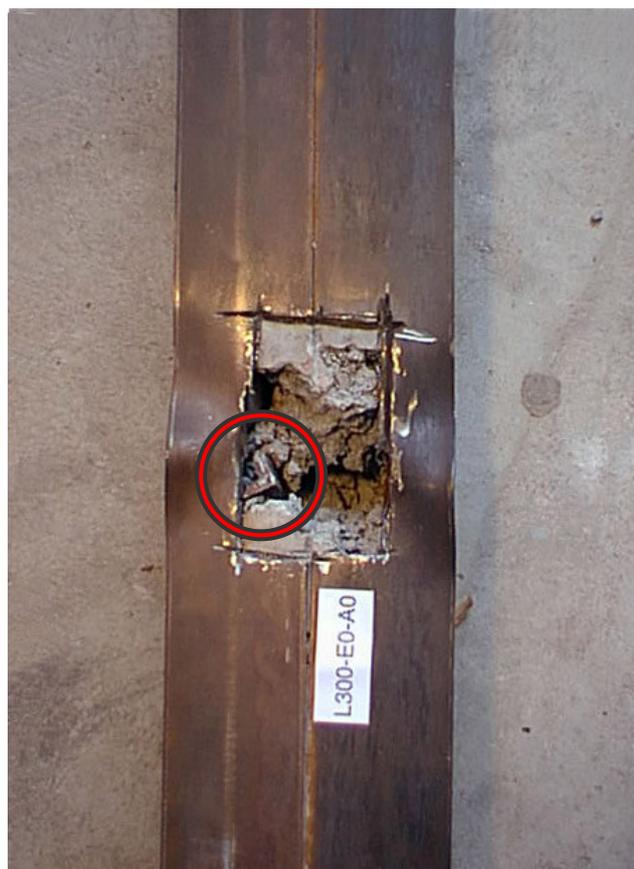
Figuras 4.9 e 4.10 – Vista frontal e lateral do pilar L300-E0-A0 deformado.



Figuras 4.11 e 4.12 – Detalhe frontal e lateral do pilar L300-E0-A0 deformado.

O pilar L300-E0-A0 flambou em torno do eixo de maior inércia, a 85 cm do topo. Logo, a carga máxima foi bem abaixo da esperada. A figura 4.13 mostra o vazio encontrado no concreto e a presença de conectores de cisalhamento que não haviam sido previstos, em destaque dentro do círculo. As britas se acumularam acima do conector e entupiram o perfil de aço.

Na parte da frente o vazio é maior do que no fundo, o que justifica o sentido da flambagem do pilar.



Figuras 4.13 – Abertura no pilar L300-E0-A0.

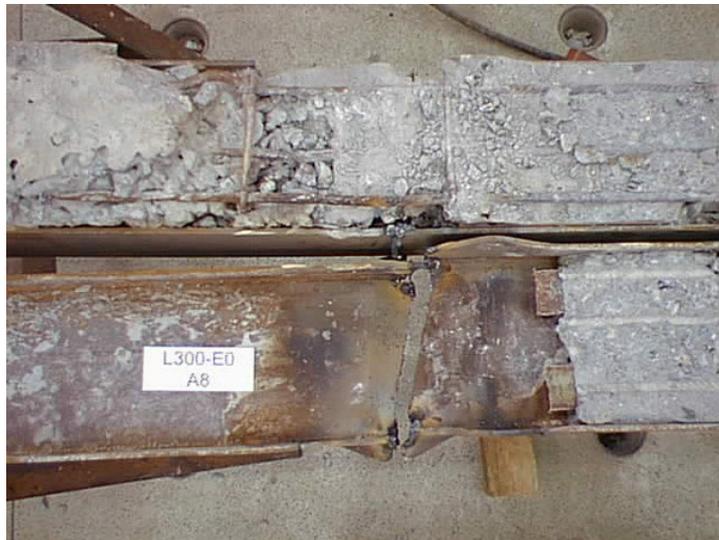


Figura 4.14 – Deformação final do pilar L300-E0-A3.



Figuras 4.15 e 4.16 – Detalhes da flambagem local do L300-E0-A3.

Como a flambagem ocorreu abaixo do meio do vão do pilar, o pilar L300-E0-A3 foi aberto no local da ruptura.



Figuras 4.17– Abertura no local da ruptura do pilar L300-E0-A3

Assim como no pilar L300-E0-A0 o vazio encontrava-se exatamente abaixo dos conectores. Para visualizar a qualidade geral do pilar, este foi aberto completamente como mostra a figura 4.18.



Figuras 4.18– Pilar L300-E0-A3 aberto completamente.

Além do local da ruptura, houve também um ninho de concretagem abaixo do segundo par de conectores, mostrado na figura 4.19.



Figuras 4.19– Detalhe do segundo par de conectores do pilar L300-E0-A3.

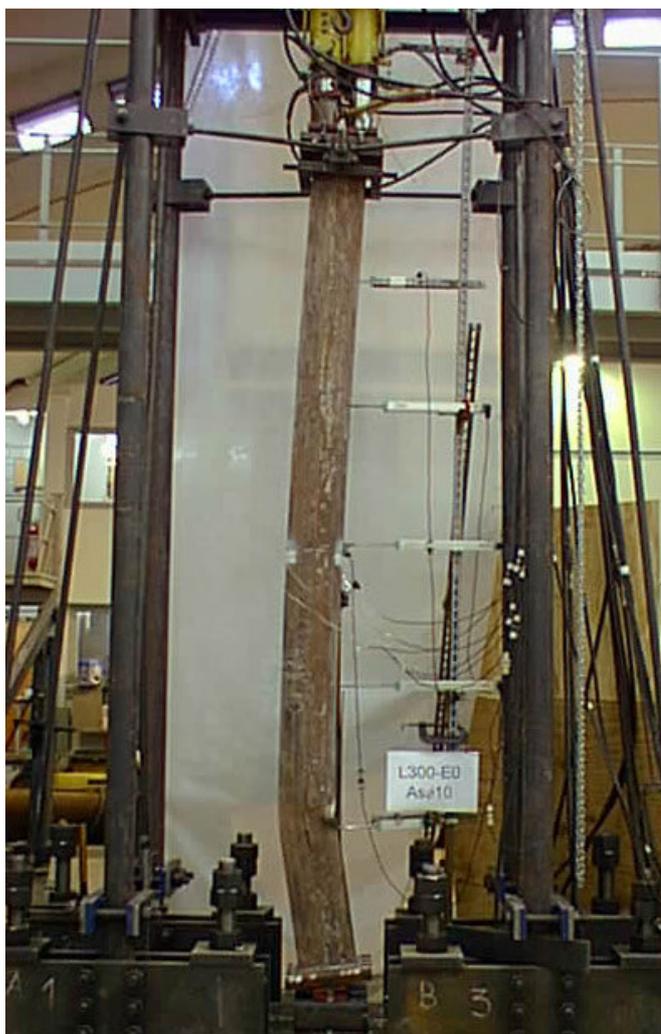


Figura 4.20 – Deformação final do pilar L300-E0-A4.8.



Figura 4.21 Flambagem local do pilar L300-E0-A4.8.

As figuras 4.22, 4.23 e 4.24 mostram o vazio seguido apenas de argamassa.



Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 – Abertura no pilar L300-E0-A4.8.



Figura 4.25 – Deformação final do pilar L300-E2.5-A0.

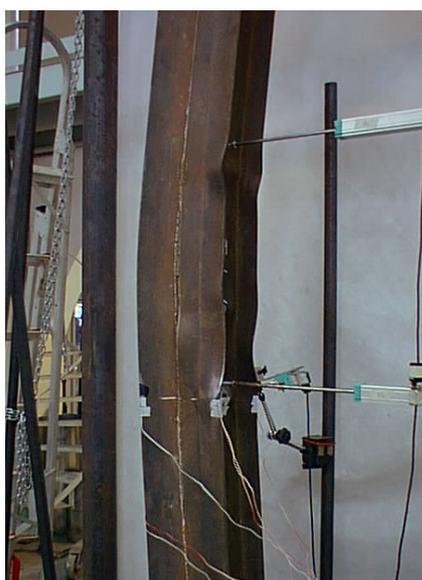


Figura 4.26 – Flambagem local do pilar L300-E2.5-A0.



Figura 4.27 – Flambagem local do pilar L300-E2.5-A0.



Figuras 4.28 e 4.29 – Abertura da solda entre os perfis do pilar L300-E2.5-A0 mostrando o concreto em seu interior.

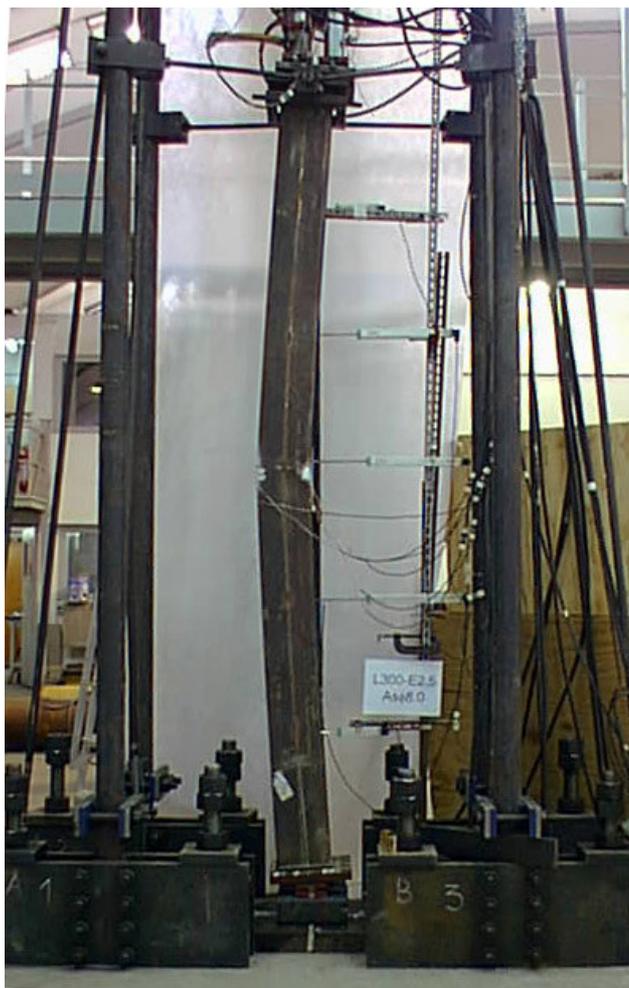


Figura 4.30 – Deformação final do pilar L300-E2.5-A3.



Figura 4.31 –Flambagem local do pilar L300-E2.5-A3.



Figura 4.32 – Deformação final do pilar L300-E2.5-A4.8.



Figuras 4.33 e 4.34 – Flambagem local do pilar L300-E2.5-A4.8.

Como a seção crítica do pilar L300-E2.5-A4.8 localizou-se fora do meio do vão, ele foi aberto para verificar a concretagem em seu interior. Desta vez a concretagem não apresentou problemas.

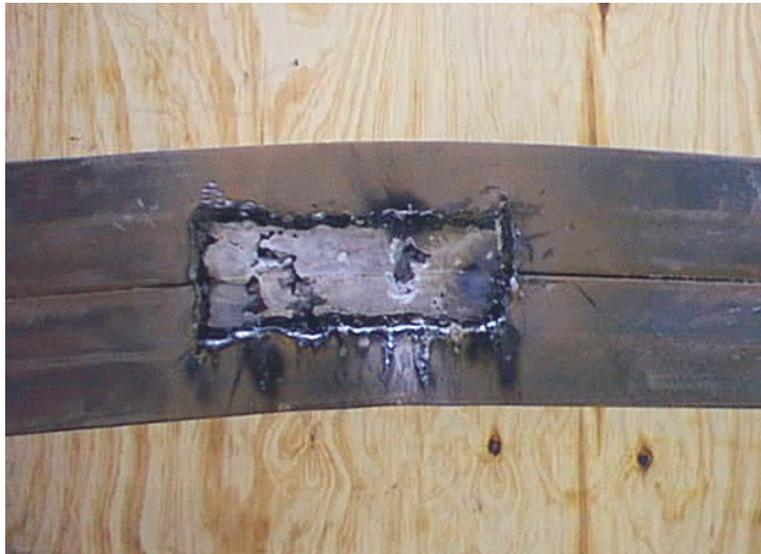


Figura 4.35 – Abertura no pilar L300-E2.5-A4.8.



Figura 4.36 – Abertura na outra face do pilar L300-E2.5-A4.8.



Figura 4.37 – Deformação final do pilar L300-E5-A0.



Figuras 4.38 e 4.39 –Flambagem local do pilar L300-E5-A0.

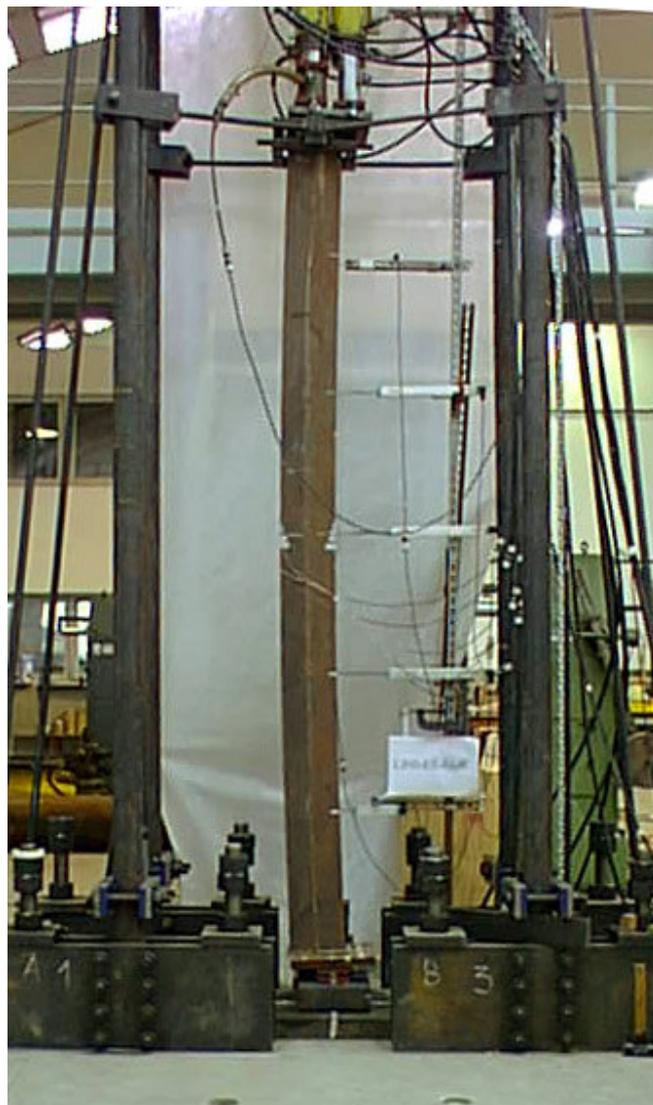


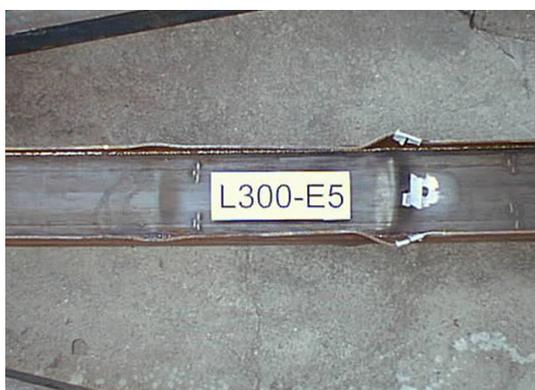
Figura 4.40 – Deformação final do pilar L300-E5-A3.



Figuras 4.41 e 4.42 –Flambagem local do pilar L300-E5-A3.



Figura 4.43 – Deformação final do pilar L300-E5-A4.8.



Figuras 4.44 e 4.45 – Flambagem local do pilar L300-E5-A4.8.

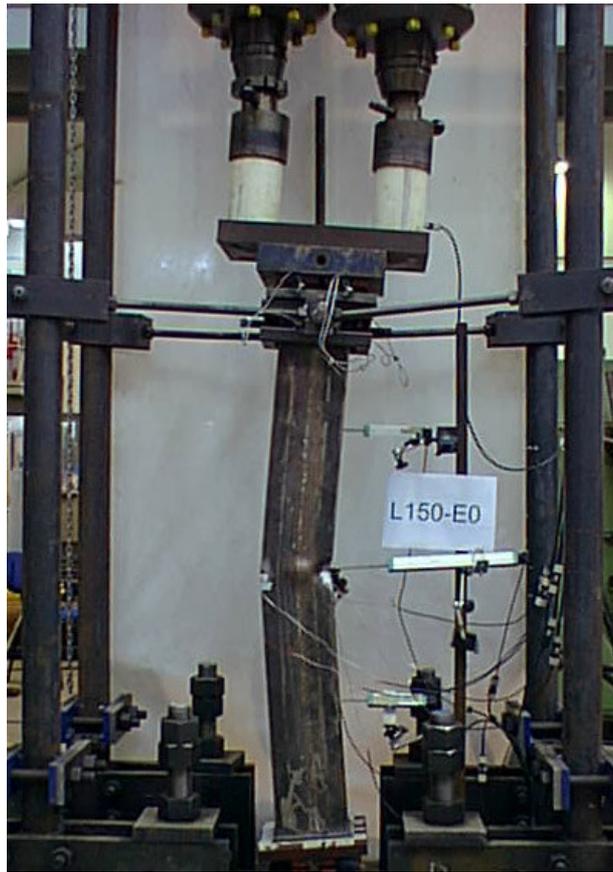


Figura 4.46 – Deformação final do pilar L150-E0.



Figuras 4.47 e 4.48 –Flambagem local do pilar L150-E0.

Apesar da flambagem do pilar L150-E0 ter ocorrido no meio do vão, a carga máxima foi bem abaixo da esperada e por isso este pilar também foi aberto.



Figura 4.49 – Abertura no pilar L150-E0.

No pilar L150-E0 foi encontrado um dos maiores vazios de todos os pilares que foram abertos.

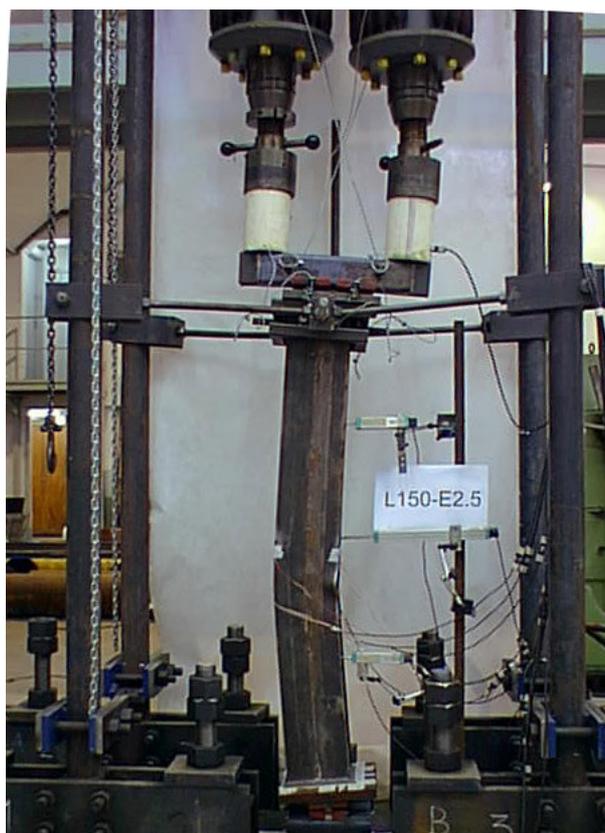


Figura 4.50 – Deformação final do pilar L150-E2.5.



Figuras 4.51 e 4.52 –Flambagem local do pilar L150-E2.5.

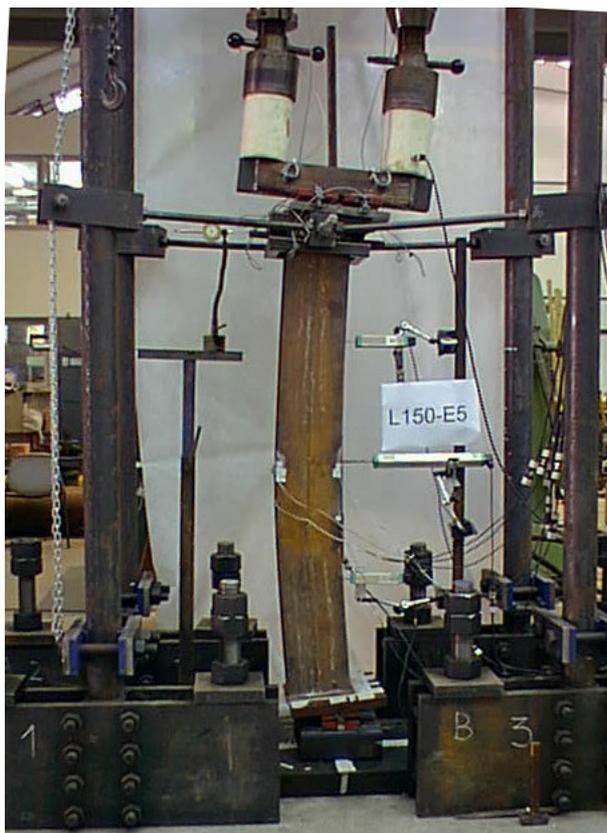


Figura 4.53 – Deformação final do pilar L150-E5.



Figuras 4.54 e 4.55 –Flambagem local do pilar L150-E5.

Vários pilares apresentaram problemas no modo da ruptura, o que motivou a abertura do perfil de aço para conferir a concretagem em seu interior. Como em todos estes casos foi comprovada a presença de ninhos de concretagem, resolveu-se também verificar a qualidade da concretagem num pilar que havia rompido normalmente, como o L150-E5.

A concretagem do pilar L150-E5 não apresentou ninhos de concretagem.

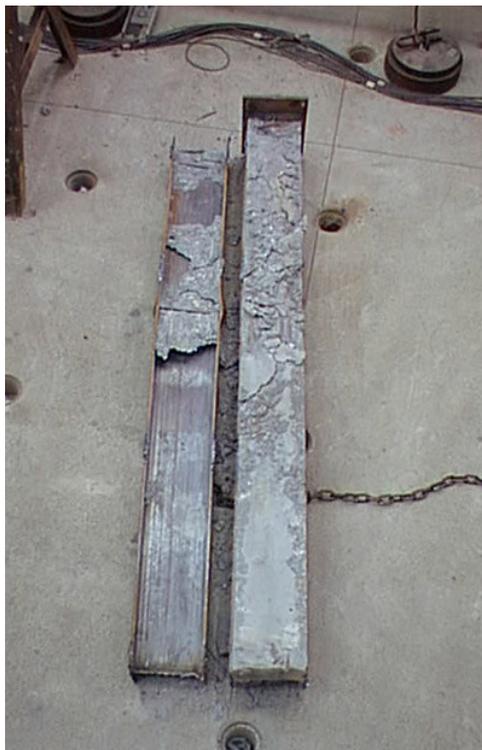


Figura 4.56 – Abertura no pilar L150-E5.



Figura 4.57 – Detalhe do local da ruptura no pilar L150-E5.

4.1.3. Curvas carga-deslocamento e carga-deformação dos pilares mistos

Curvas típicas carga-deslocamento e carga-deformação são apresentadas nas figuras 4.58 a 4.61.

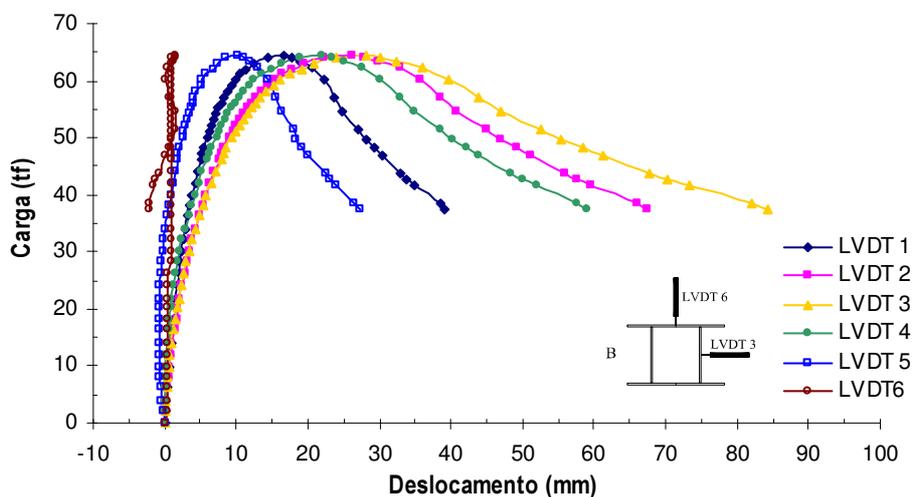


Figura 4.58 – Curva típica Carga x Deslocamento - pilar L300-E2.5-A3.

Em ambas as figuras observa-se o crescimento suave dos deslocamentos e deformações até uma carga equivalente a 80% da carga máxima. Após o pico ocorre aumento expressivo destas grandezas.

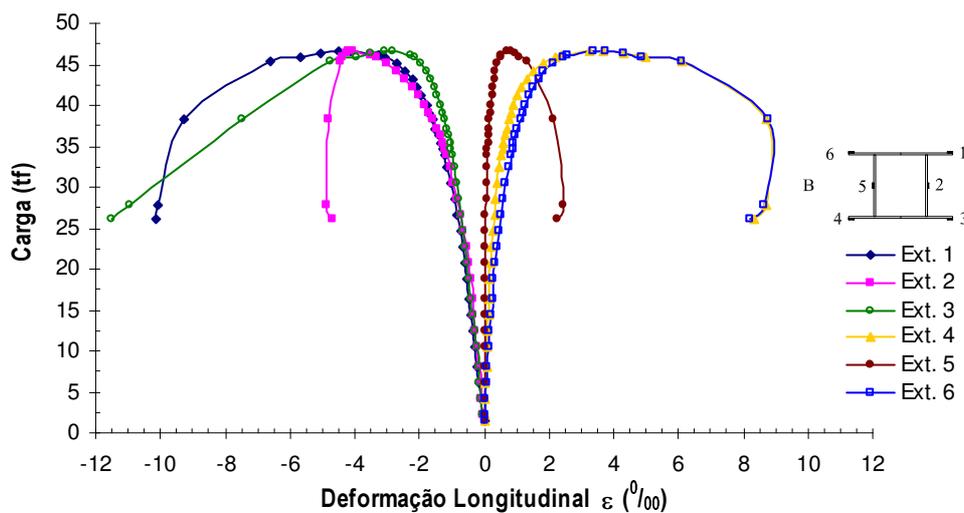


Figura 4.59 – Curva típica Carga x Deformação - pilar L300-E5-A0.

Apenas nos pilares L450-E0 e L450-E2.5 o pico ocorreu antes do escoamento do perfil, referente a deformação $\epsilon_y = 3,5 \text{ ‰}$, como indicado no item 3.2.4.

As figuras 4.60 e 4.61 mostram a distribuição típica das deformações numa seção transversal do pilar. Em alguns casos foi observado a distribuição linear das deformações ao longo da seção, ou seja as seções permaneceram planas, como no exemplo do pilar L300-E5-A3 (figura 4.60).

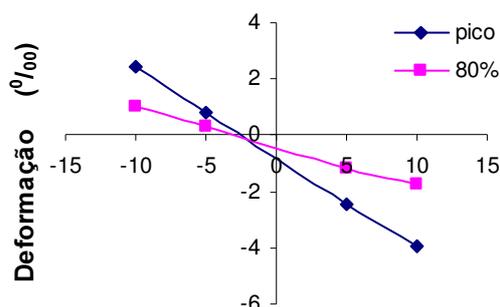


Figura 4.60 – Curva típica das deformações na seção intermediária - pilar L300-E5-A3.

Porém em alguns pilares, esta linearidade não foi observada para valores medidos no pico e a 80% da carga máxima. Isto pode ser explicado pela influência da flambagem local que já ocorria na seção, causando alívio ou acréscimo no valor medido.

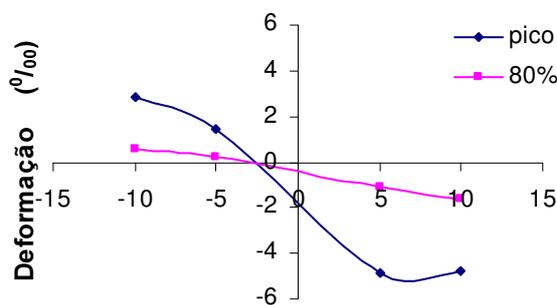


Figura 4.61 – Curva típica das deformações na seção intermediária - pilar L450-E5.

a - Pilar L450-E0 - Carga máxima: 61,5 toneladas.

Os pilares ensaiados com carga centrada apresentaram ruptura mais brusca. A flambagem global ocorre somente bem próximo à ruptura.

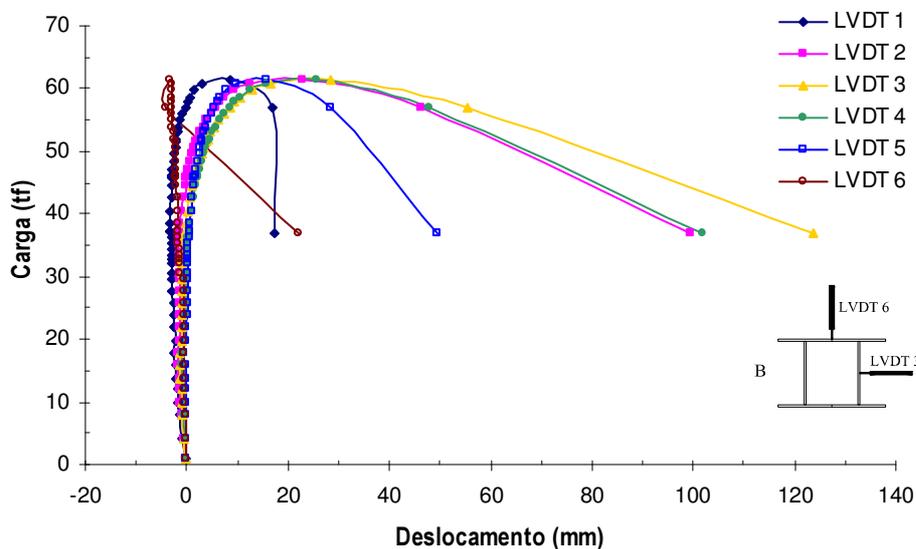


Figura 4.62 – Curva Carga x Deslocamento do pilar L450-E0.

Com o deslocamento lateral, o pilar acabou saindo da frente do LVDT6 que estava localizado no plano perpendicular ao plano da flambagem do pilar. Isto pode ser observado pela mudança de direção no último ponto deste LVDT na figura 4.62. Tal fato ocorreu em vários ensaios.

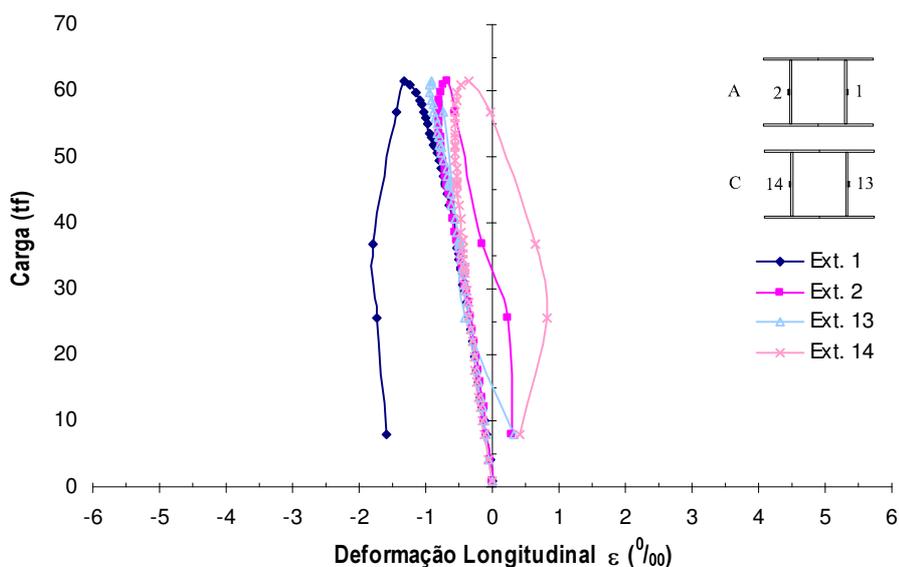


Figura 4.63 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros nas seções A e C, localizadas a L/4 do topo e da base do pilar L450-E0.

As curvas carga-deformação (figuras 4.63, 4.64, 4.65, 4.66, 4.68) mostram que toda a seção permaneceu comprimida até bem próximo da ruptura.

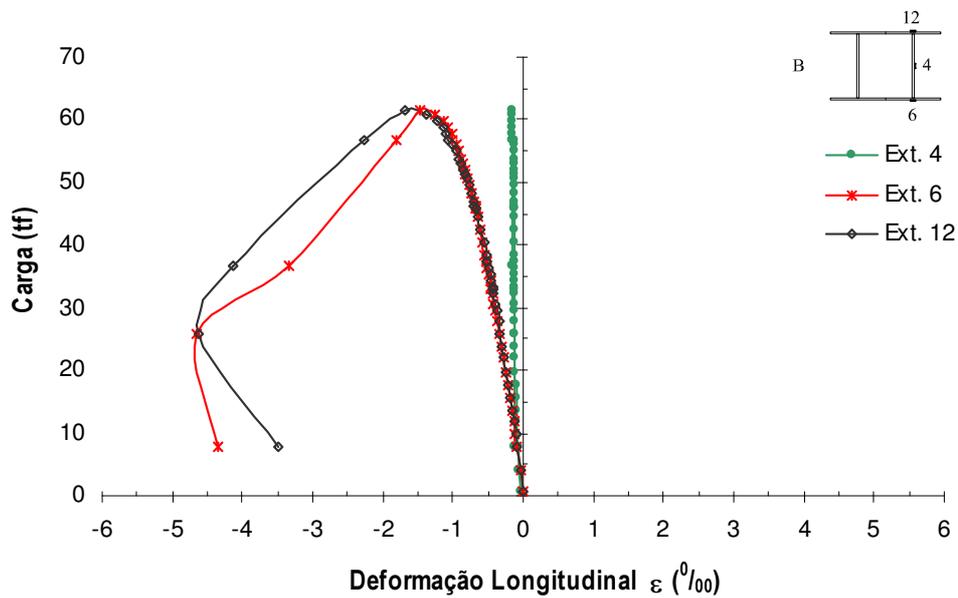


Figura 4.64 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros 4, 6, 12 na seção B, localizada no meio do pilar L450-E0 (extensômetro 4 apresentou problemas).

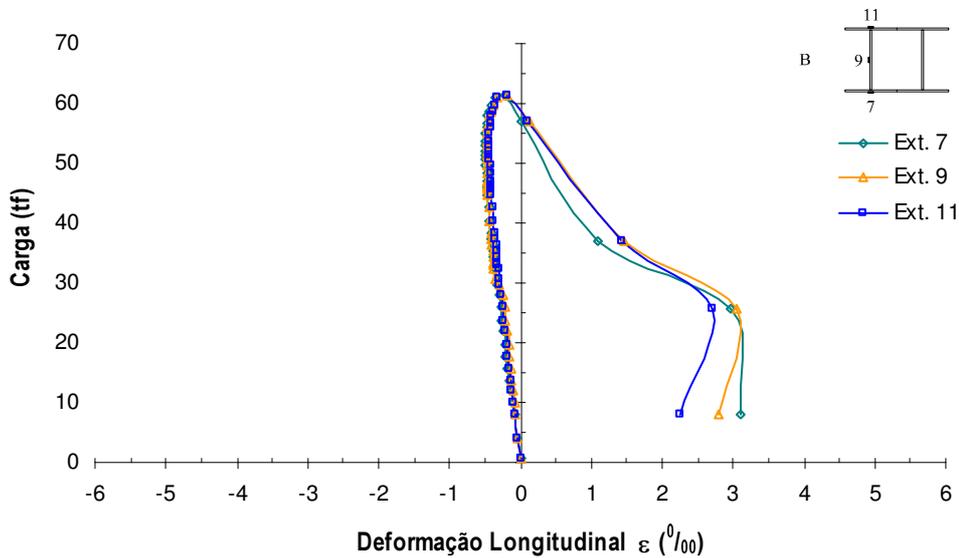


Figura 4.65 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros 7, 9, 11 na seção B, localizada no meio do pilar do pilar L450-E0.

Assim como na figura 4.64, os extensômetros 7, 9 e 11 também comprovaram que as deformações no meio e nas extremidades da seção são

praticamente as mesmas. Em função disto, optou-se por não instrumentar os pontos referentes aos extensômetros 6, 7, 11, 12 nos ensaios seguintes.

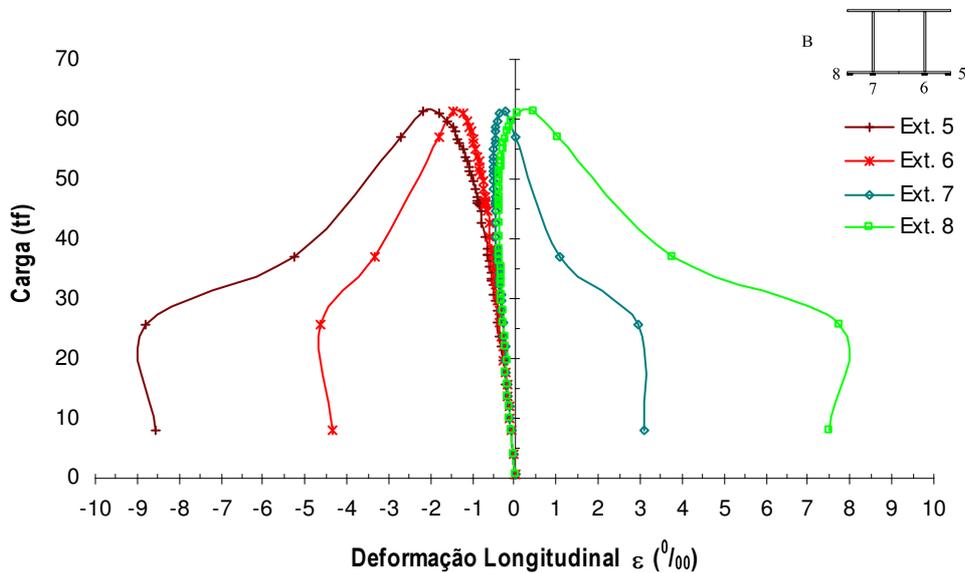


Figura 4.66 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros 5, 6, 7 e 8 na seção B, localizada no meio do pilar L450-E0.

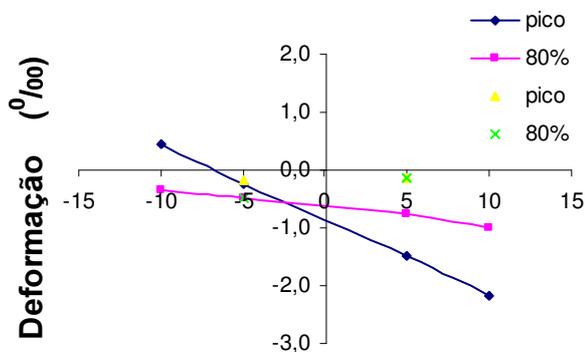


Figura 4.67 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L450-E0, na face dos extensômetros 5, 6, 7 e 8.

Os pontos da terceira e quarta seqüência nas legendas da figura 4.67 e 4.69 são referentes aos extensômetros 4 e 9, e deveriam ser coincidentes com as linhas traçadas pela primeira e pela segunda seqüência, o que ocorre apenas no valor -5

(a cinco centímetros à esquerda do eixo da seção). Os pontos a cinco centímetros à direita do eixo correspondem ao extensômetro 4 que não funcionou corretamente.

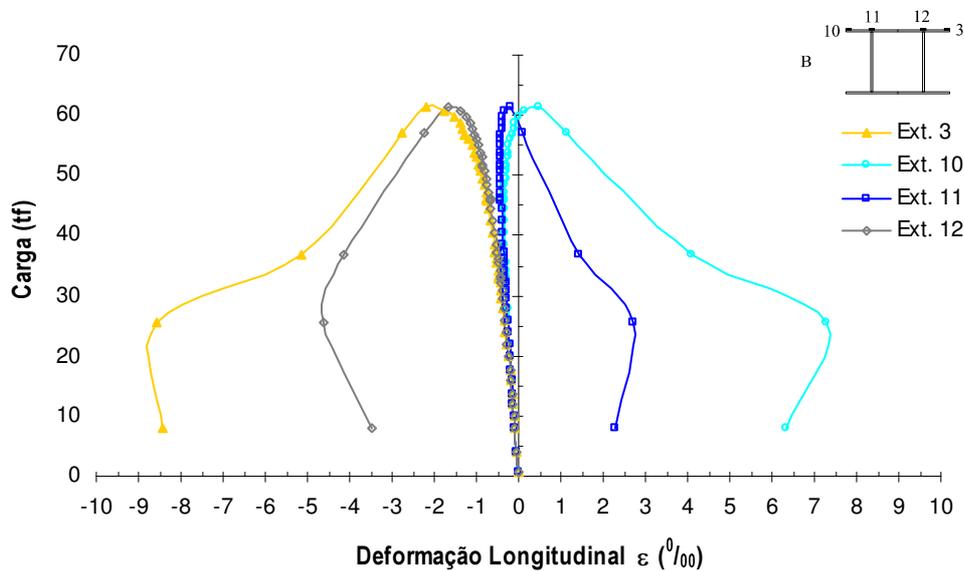


Figura 4.68 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros 3, 10, 11 e 12 na seção B, localizada no meio do pilar L450-E0.

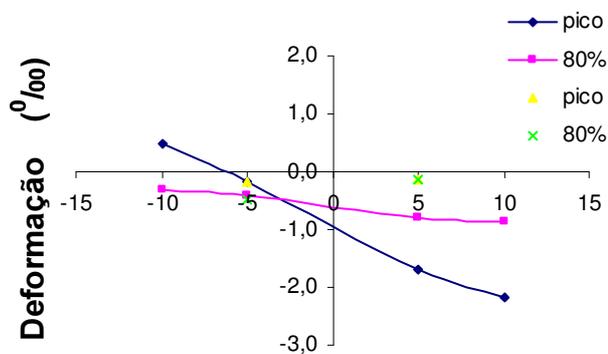


Figura 4.69 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L450-E0, na face dos extensômetros 3, 10, 11 e 12.

b - Pilar L450-E2.5 - Carga máxima: 38,07 toneladas.

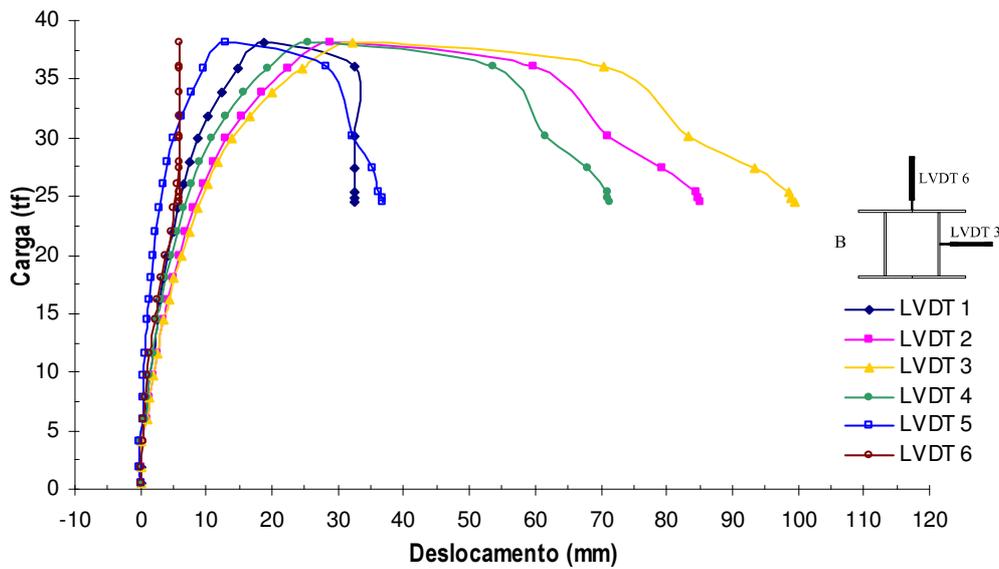


Figura 4.70 – Curva Carga x Deslocamento do pilar L450-E2.5.

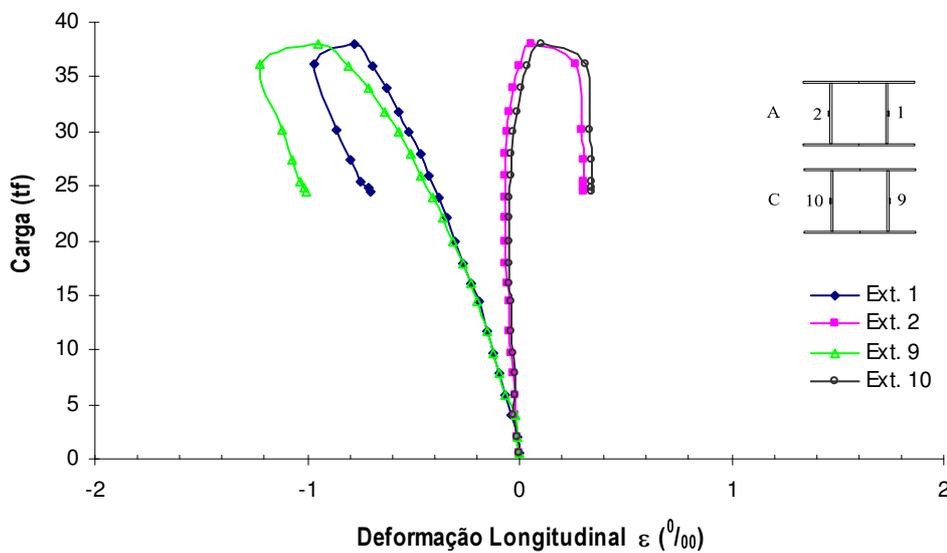


Figura 4.71 – Diagrama Carga x Deformação dos extensômetros nas seções A e C, localizadas a L/4 do topo e da base do pilar L450-E2.5.

As figuras 4.71 e 4.72 mostram que antes do pico praticamente todos os extensômetros registraram compressão, conforme era previsto já que a excentricidade de 2,5 cm encontra-se dentro do núcleo central da seção.

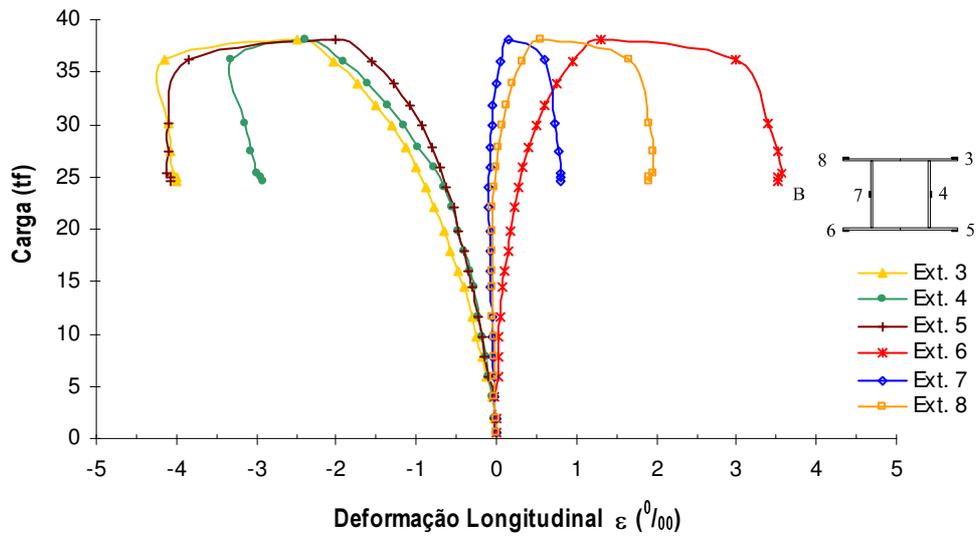


Figura 4.72 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros na seção B, localizada no meio do pilar L450-E2.5.

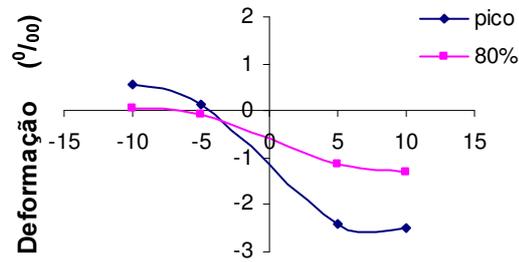


Figura 4.73 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L450-E2.5, na face dos extensômetros 3, 4, 7 e 8.

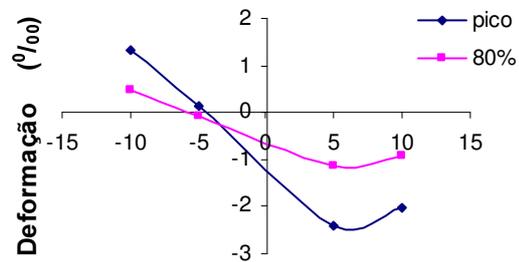


Figura 4.74 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L450-E2.5, na face dos extensômetros 4, 5, 6 e 7.

c - Pilar L450-E5 – Carga máxima: 35,22 toneladas.

O LVDT 6 ficou preso na solda que une os dois perfis metálicos que compõem a seção do pilar até a carga de 23 toneladas (figura 4.75).

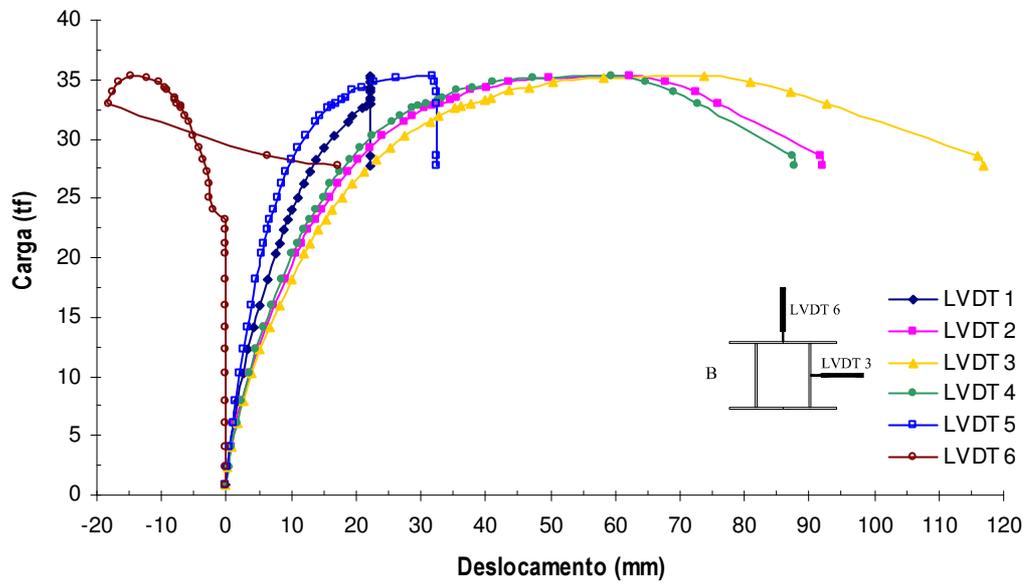


Figura 4.75 – Curva Carga x Deslocamento do pilar L450-E5.

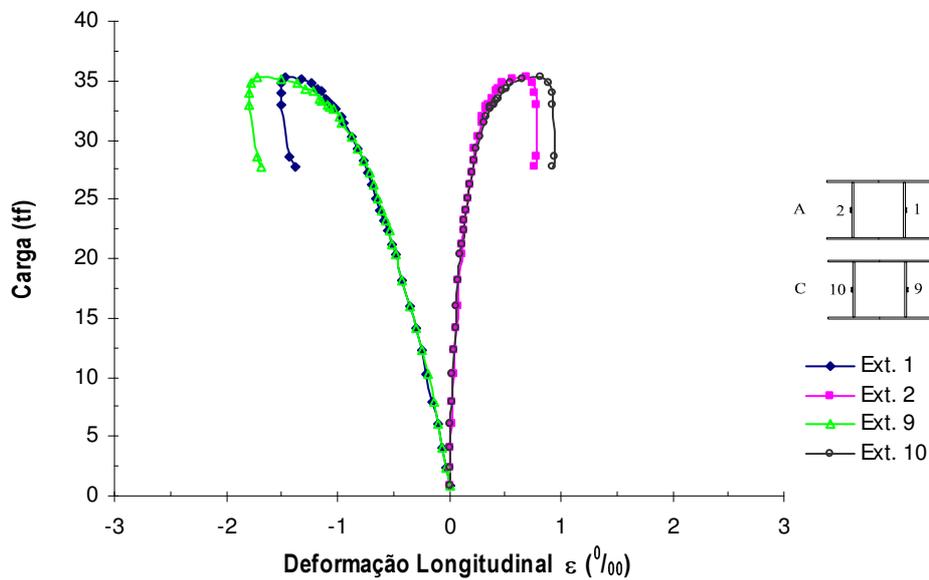


Figura 4.76 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros nas seções A e C, localizadas a L/4 do topo e da base do pilar L450-E5.

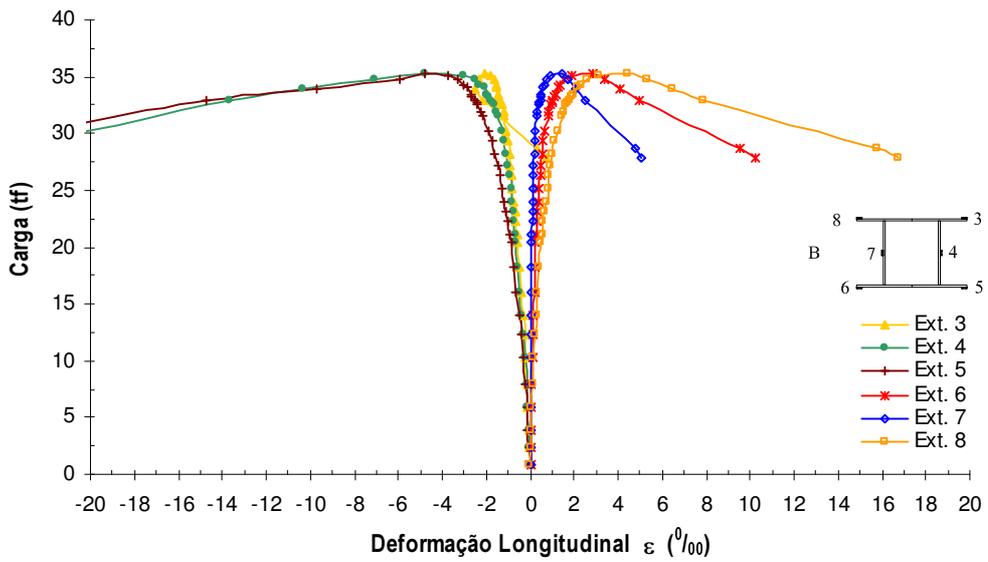


Figura 4.77 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros na seção B, localizada no meio do pilar L450-E5.

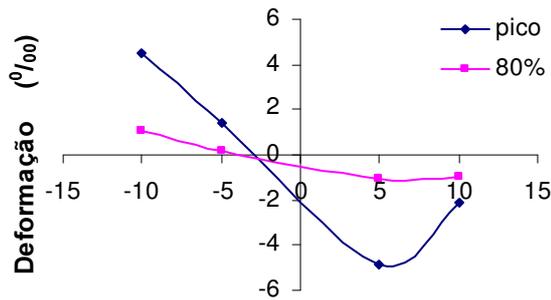


Figura 4.78 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L450-E5, na face dos extensômetros 3, 4, 7 e 8.

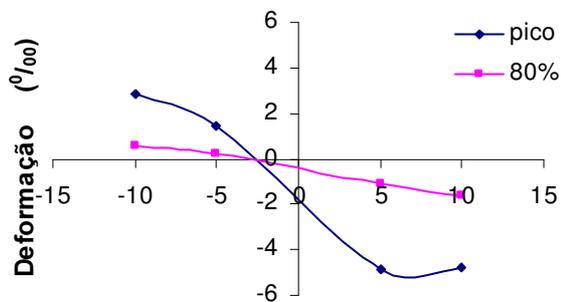


Figura 4.79 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L450-E5, na face dos extensômetros 4, 5, 6 e 7.

d - Pilar L300-E2.5-A0 – Carga máxima: 68,7 toneladas.

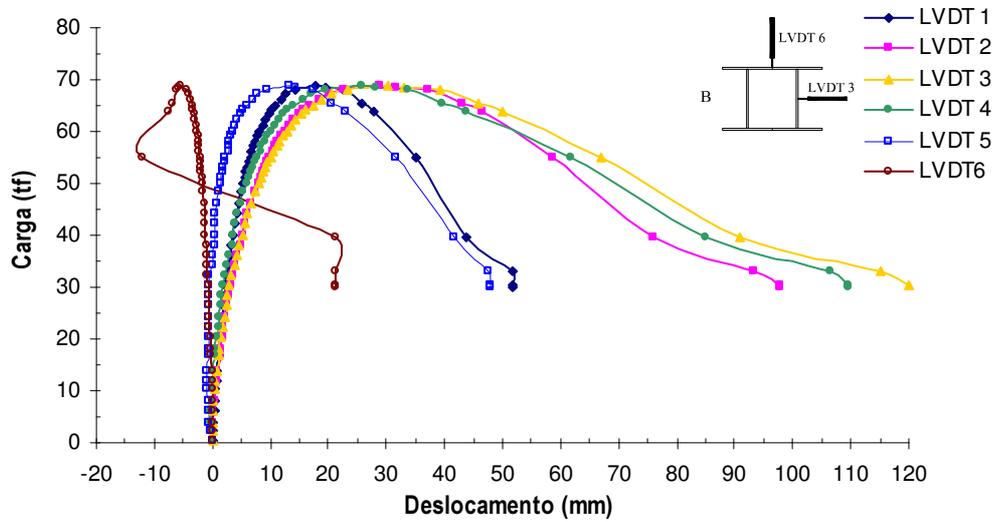


Figura 4.80 – Curva Carga x Deslocamento do pilar L300-E2.5-A0.

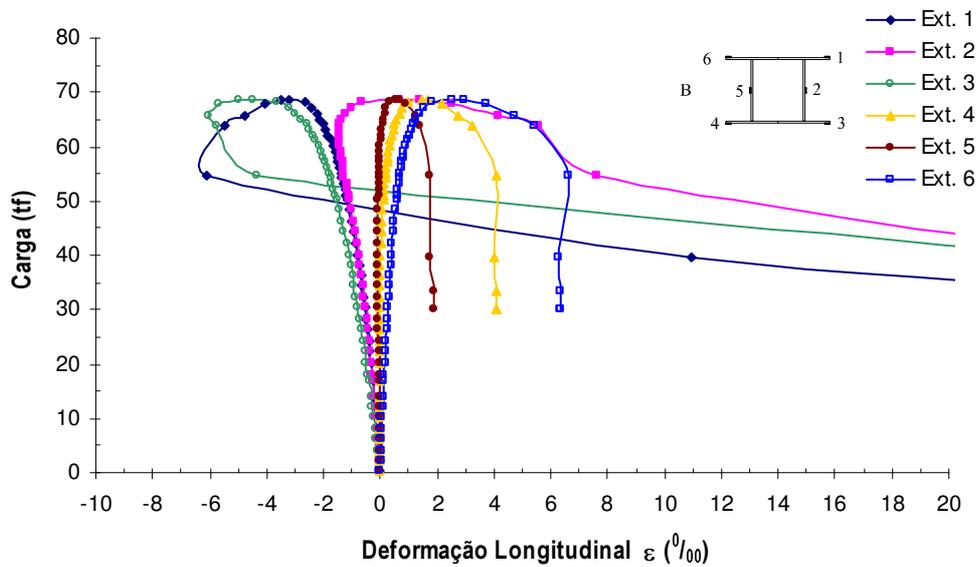


Figura 4.81 – Curva Carga x Deformação na seção B, localizada no meio do pilar L300-E2.5-A0.

A flambagem do pilar L300-E2.5-A0 ocorreu bem próxima da seção intermediária B onde estavam colados os extensômetros. Portanto a leitura dos extensômetros 1, 2 e 3 foi influenciada.

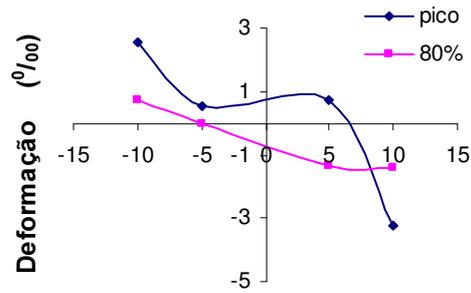


Figura 4.82 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L300-E2.5-A0, na face dos extensômetros 1, 2, 5 e 6.

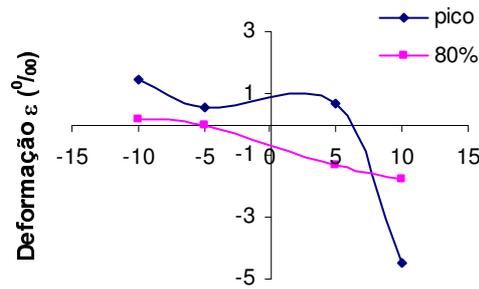


Figura 4.83 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L300-E2.5-A0, na face dos extensômetros 2, 3, 4 e 5.

e - Pilar L300-E2.5-A3 – Carga máxima: 64,3 toneladas.

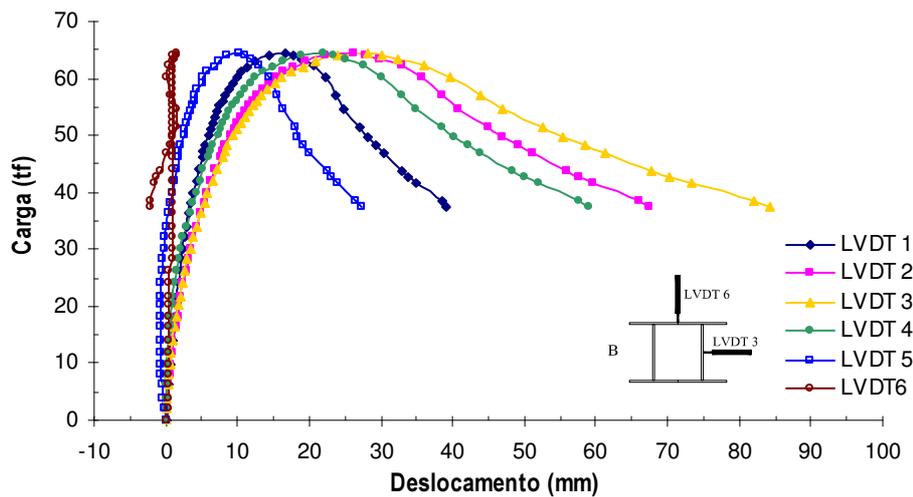


Figura 4.84 – Curva Carga x Deslocamento do pilar L300-E2.5-A3.

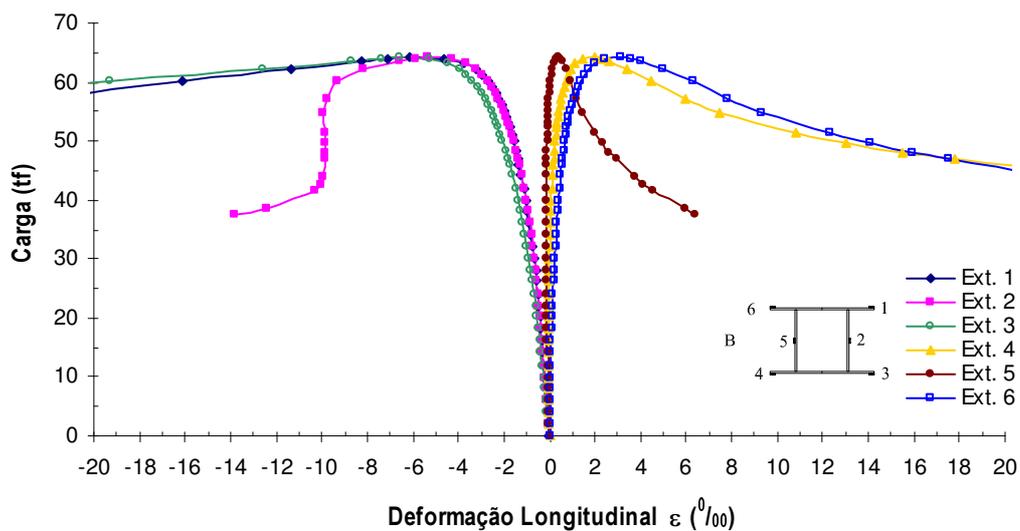


Figura 4.85 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros na seção B, localizada no meio do pilar L300-E2.5-A3.

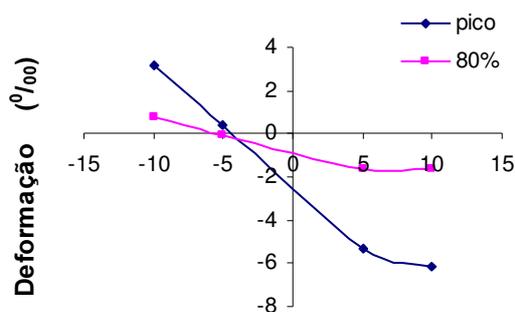


Figura 4.86 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L300-E2.5-A3, na face dos extensômetros 1, 2, 5 e 6.

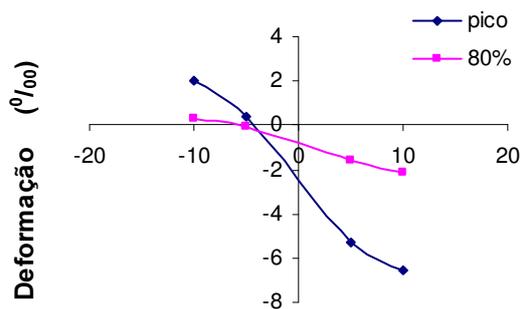


Figura 4.87 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L300-E2.5-A3, na face dos extensômetros 2, 3, 4 e 5.

f - Pilar L300-E2.5-A4.8 – Carga máxima: 65,1 toneladas.

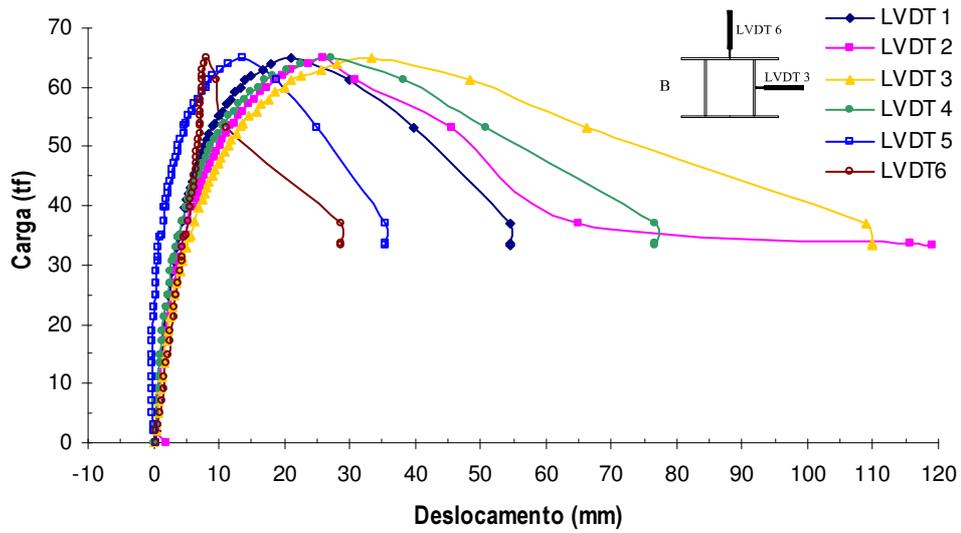


Figura 4.88 – Curva Carga x Deslocamento do pilar L300-E2.5-A4.8.

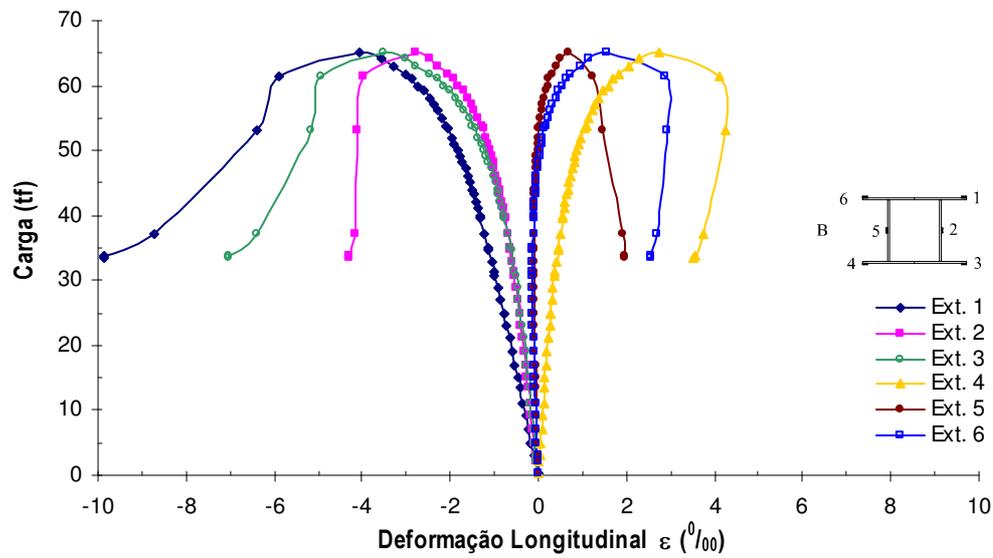


Figura 4.89 – Curva Carga x Deformação na seção B, localizada no meio do pilar L300-E2.5-A4.8.

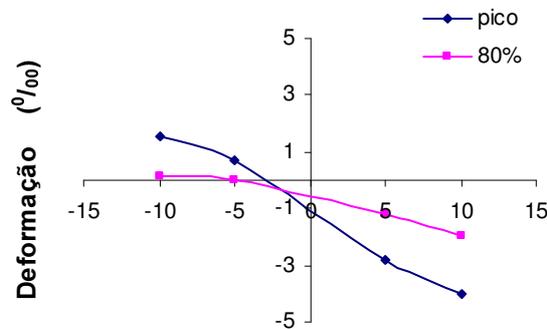


Figura 4.90 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L300-E2.5-A4.8, na face dos extensômetros 1, 2, 5 e 6.

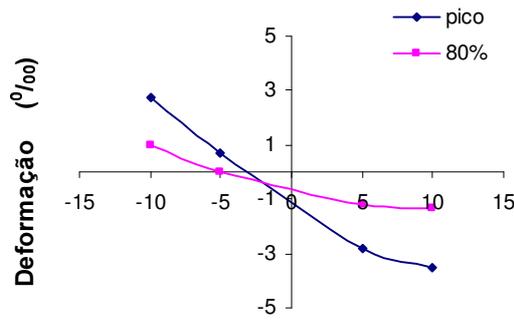


Figura 4.91 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L300-E2.5-A4.8, na face dos extensômetros 2, 3, 4 e 5.

g - Pilar L300-E5-A0 – Carga máxima: 46,7 toneladas.

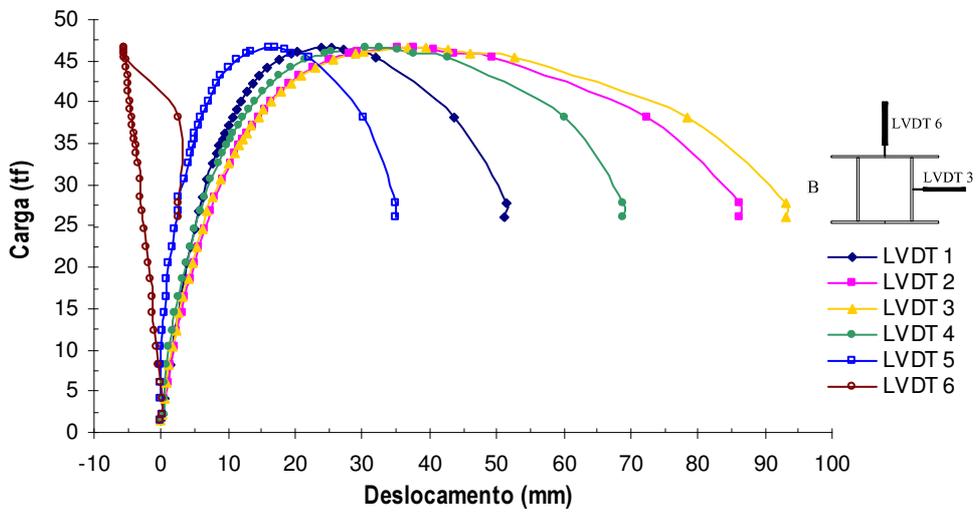


Figura 4.92 – Curva Carga x Deslocamento do pilar L300-E5-A0.

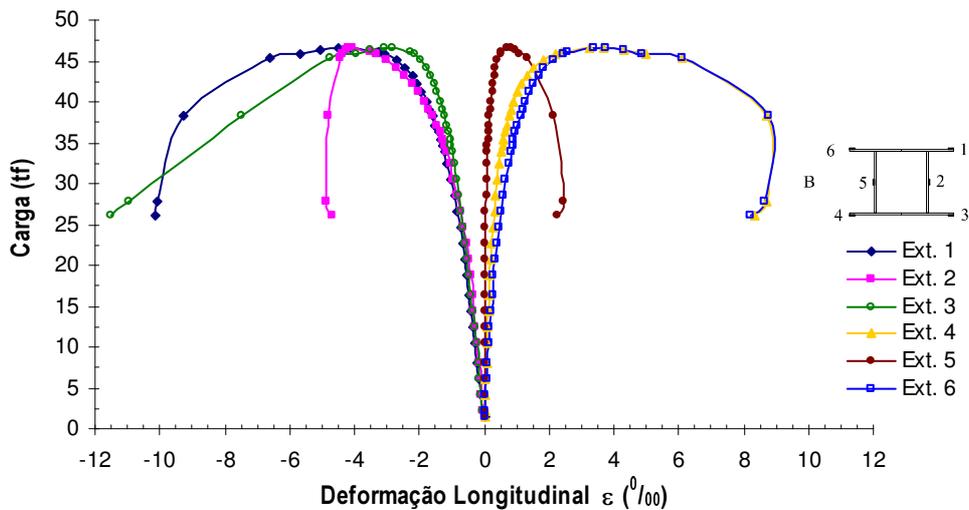


Figura 4.93 – Curva Carga x Deformação na seção B, localizada no meio do pilar L300-E5-A0.

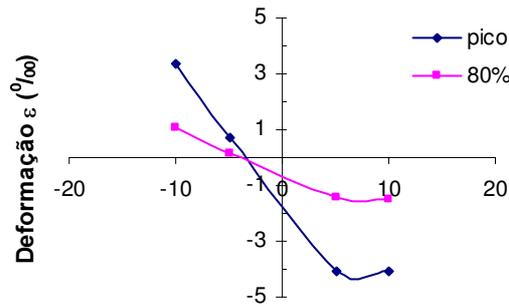


Figura 4.94 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L300-E5-A0, na face dos extensômetros 1, 2, 5 e 6.

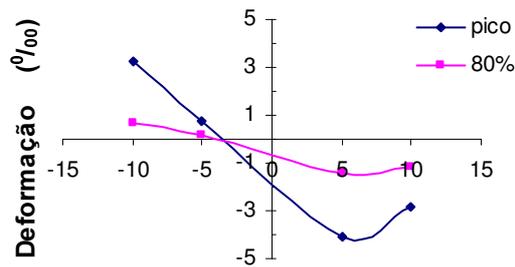


Figura 4.95 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L300-E5-A0, na face dos extensômetros 2, 3, 4 e 5.

h - Pilar L300-E5-A3 – Carga máxima: 47,0 toneladas.

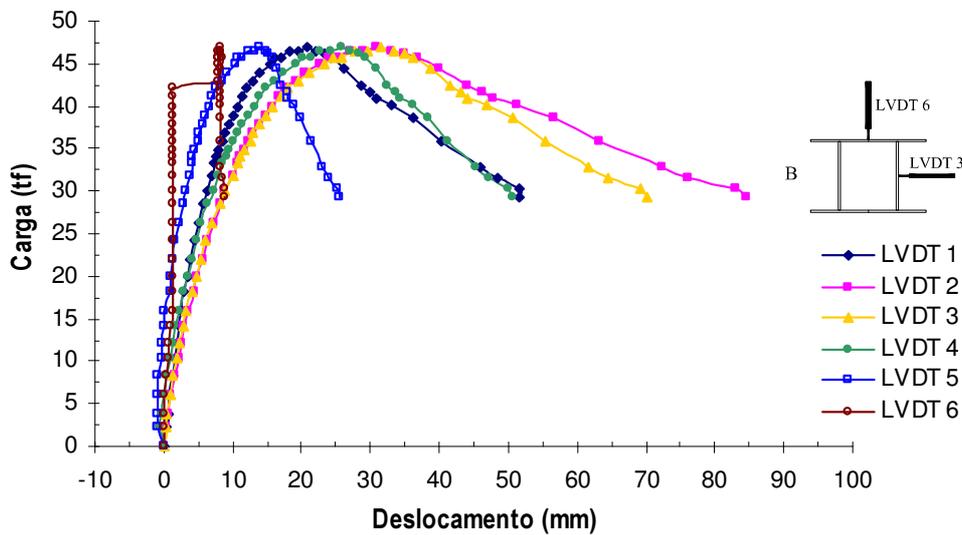


Figura 4.96 – Curva Carga x Deslocamento do pilar L300-E5-A3.

O LVDT 6 ficou preso na solda que une os dois perfis I que formam a seção até a carga de 42 toneladas.

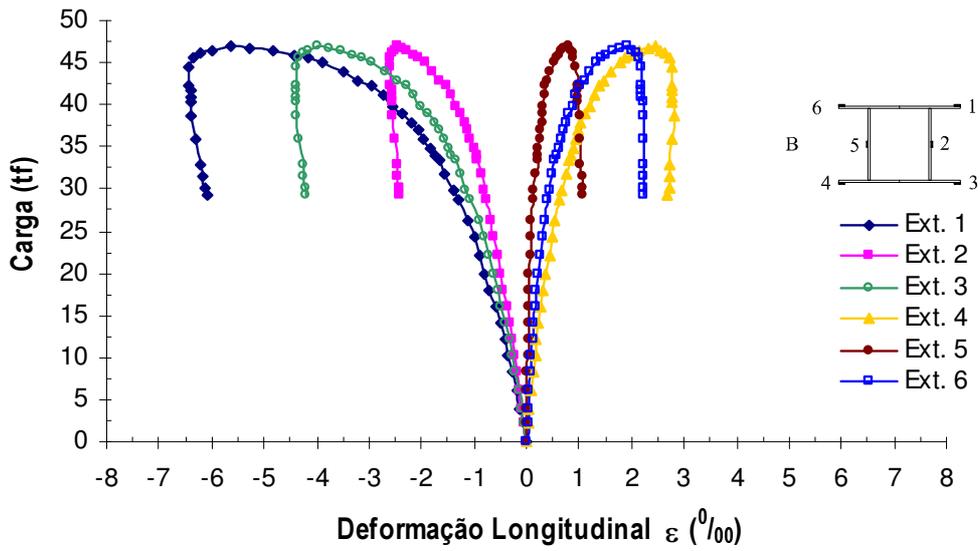


Figura 4.97 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros na seção B, localizada no meio do pilar L300-E5-A3.

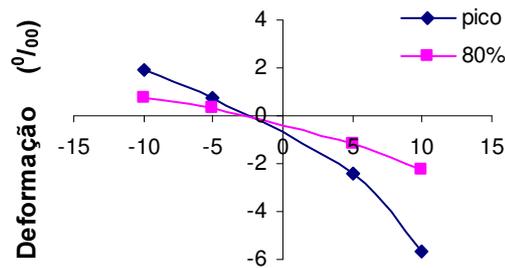


Figura 4.98 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L300-E5-A8, na face dos extensômetros 1, 2, 5 e 6.

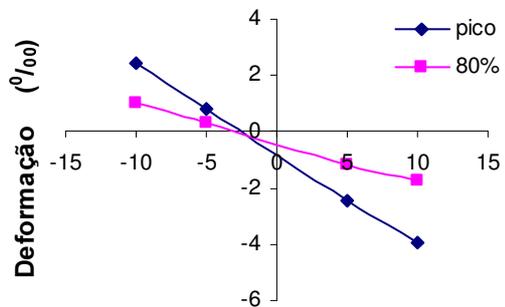


Figura 4.99 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L300-E5-A3, na face dos extensômetros 2, 3, 4 e 5.

i - Pilar L300-E5-A4.8 – Carga máxima: 46,13 toneladas.

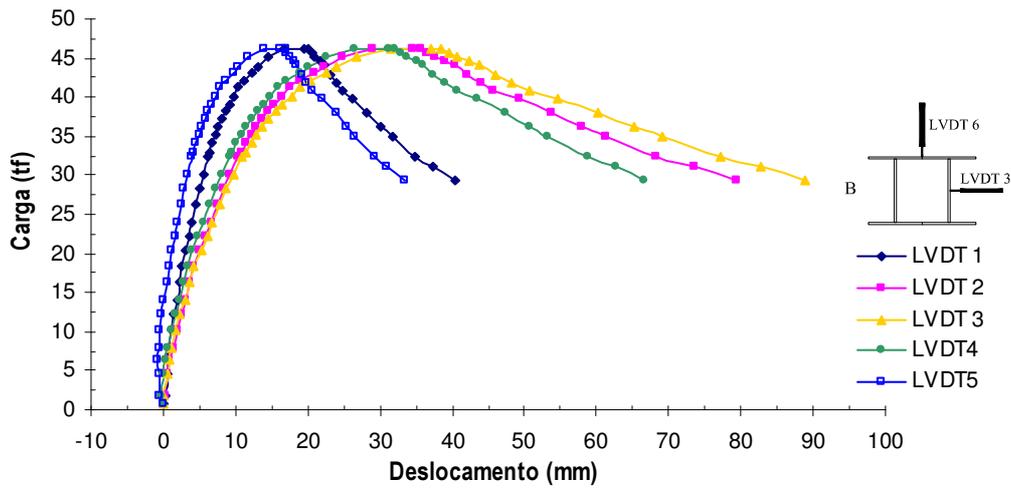


Figura 4.100 – Curva Carga x Deslocamento do pilar L300-E5-A4.8.

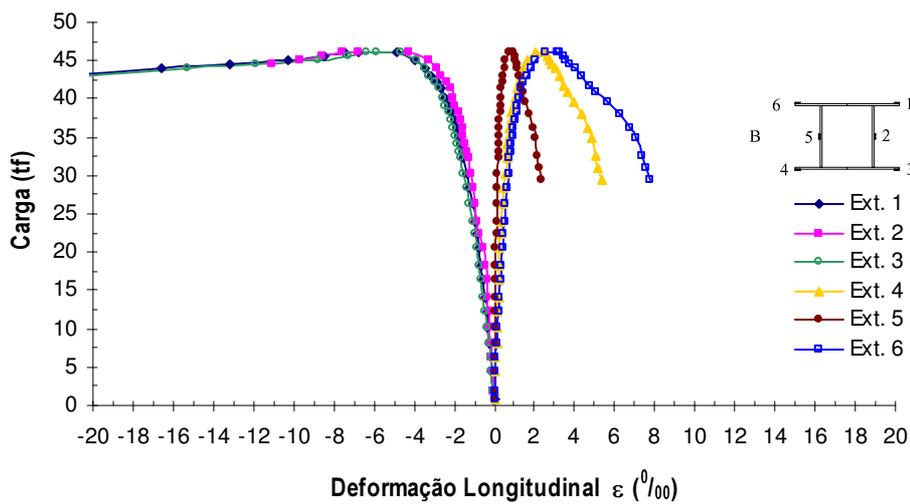


Figura 4.101 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros na seção B, localizada no meio do pilar L300-E5-A4.8.

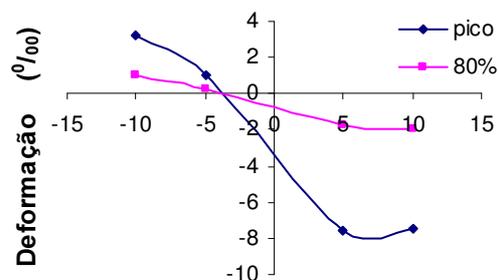


Figura 4.102 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L300-E5-A4.8, na face dos extensômetros 1, 2, 5 e 6.

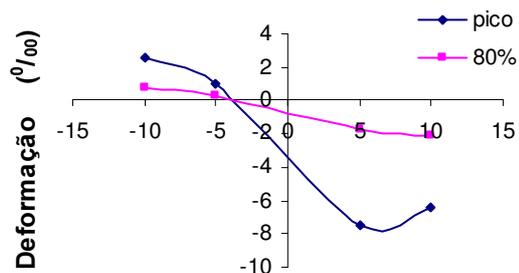


Figura 4.103 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L300-E5-A4.8, na face dos extensômetros 2, 3, 4 e 5.

j - Pilar L150-E2.5 – Carga máxima: 86,47 toneladas.

Os pilares de um metro e meio apresentaram primeiramente um pequeno deslocamento de corpo rígido antes da flambagem, como pode ser observado na figura 4.104. Apenas após a carga máxima é que a flambagem global do pilar começa a ocorrer.

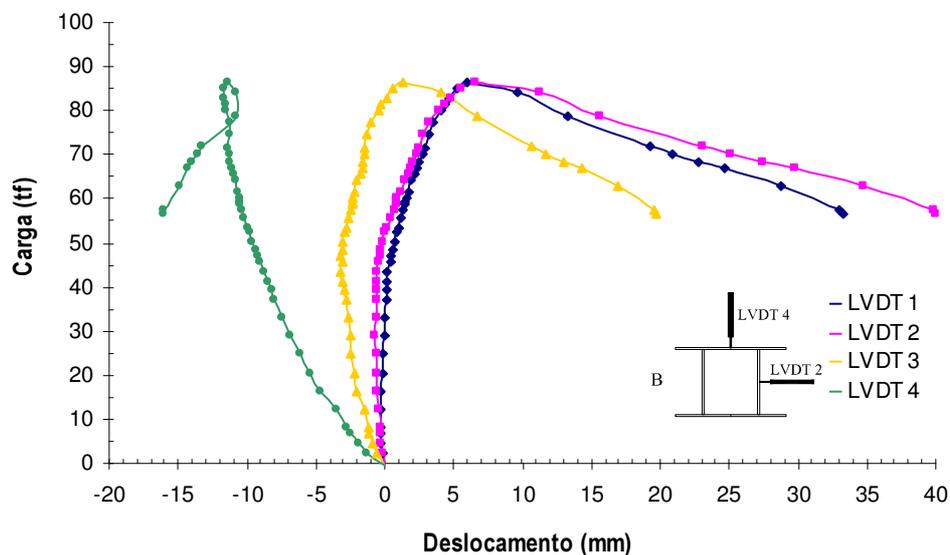


Figura 4.104 – Curva Carga x Deslocamento do pilar L150-E2.5.

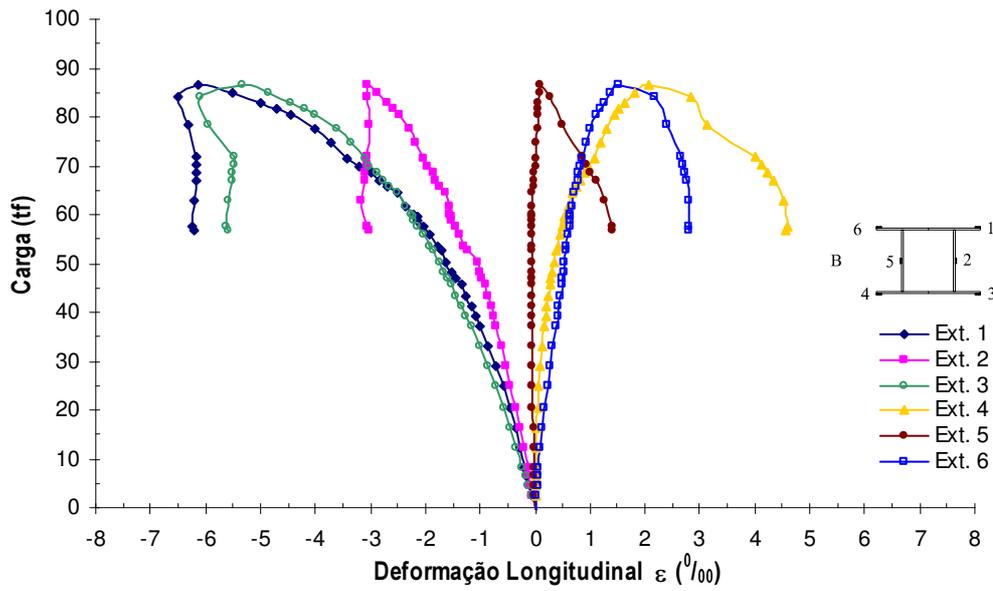


Figura 4.105 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros na seção B, localizada no meio do pilar L150-E2.5.

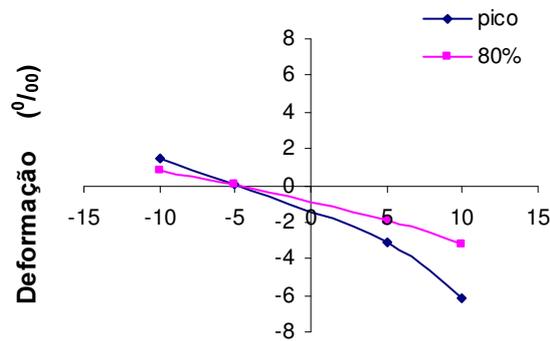


Figura 4.106 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L150-E2.5, na face dos extensômetros 1, 2, 5 e 6.

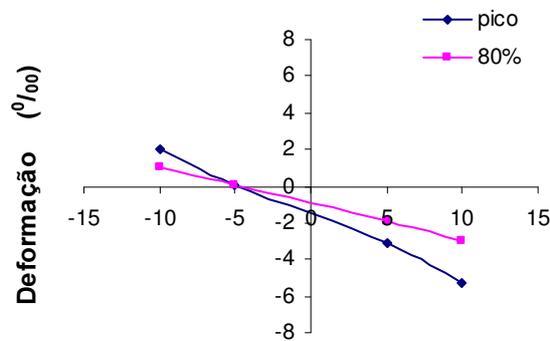


Figura 4.107 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L150-E2.5, na face dos extensômetros 2, 3, 4 e 5.

k - Pilar L150-E5 – Carga máxima: 77,20 toneladas.

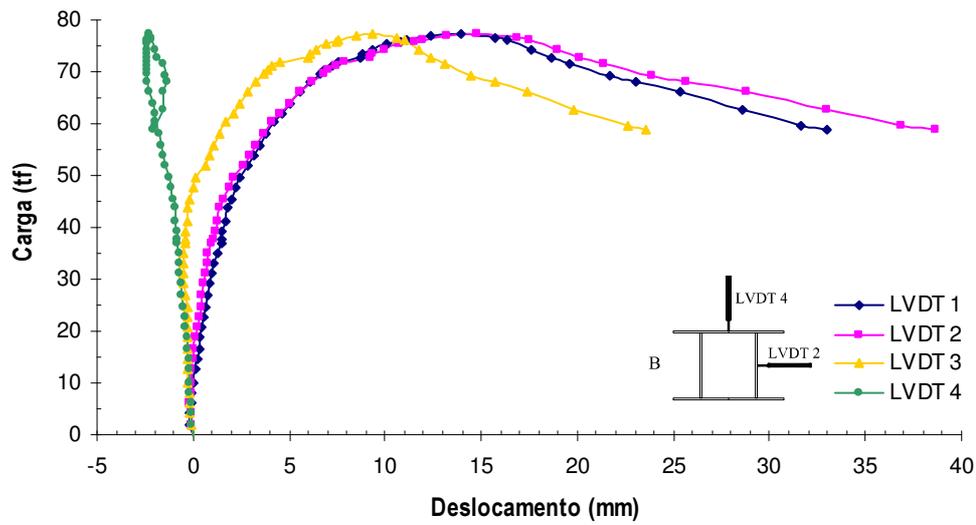


Figura 4.108 – Curva Carga x Deslocamento do pilar L150-E5.

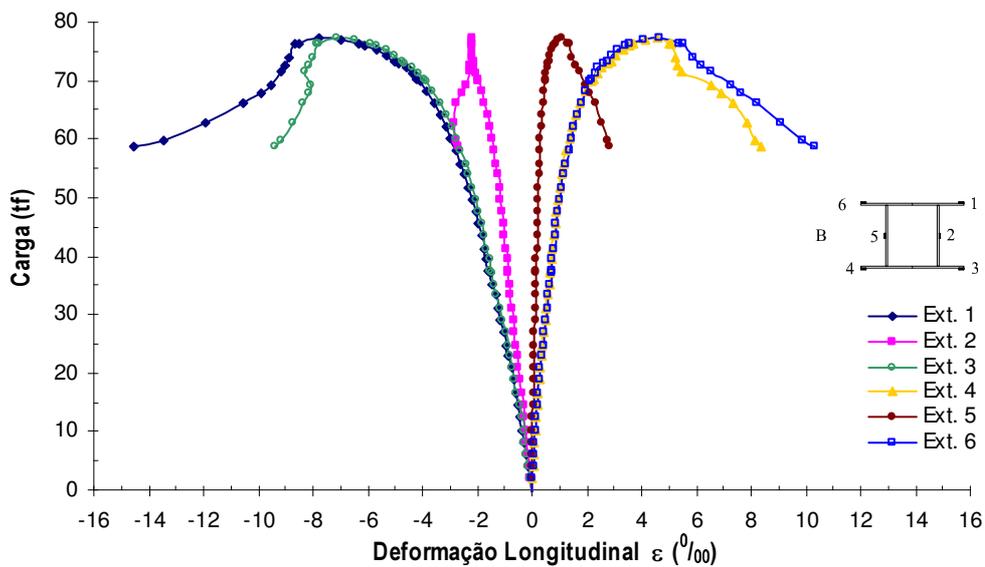


Figura 4.109 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros na seção B, localizada no meio do pilar L150-E5.

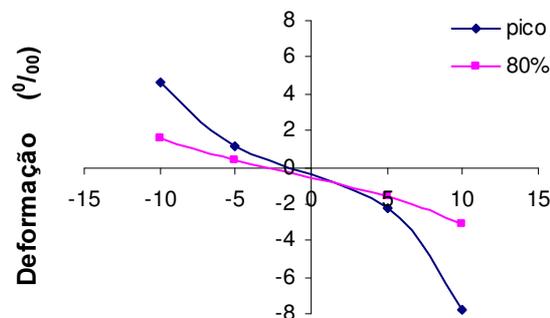


Figura 4.110 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L150-E5, na face dos extensômetros 1, 2, 5 e 6.

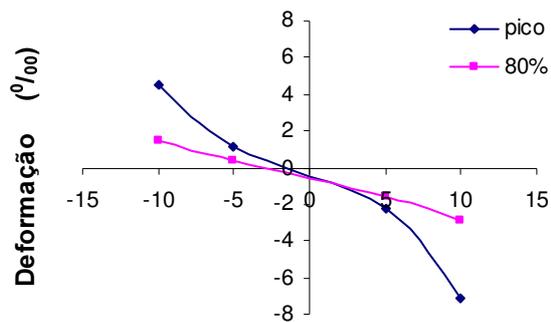


Figura 4.111 – Curva das deformações na seção intermediária do pilar L150-E5, na face dos extensômetros 2, 3, 4 e 5.

4.1.4. Influência do comprimento de flambagem

A figura 4.112 mostra a diminuição da resistência dos pilares com o aumento do comprimento de flambagem. Para os pilares com excentricidade de 2,5 cm esta redução foi de 56% e para os pilares com excentricidade de 5 cm foi de 54,4%.

Todos os pilares apresentados têm a mesma armadura (4,8 cm²).

Os valores indicados próximo aos pontos são as cargas máximas obtidas nos ensaios. Não estão presentes os resultados dos pilares que apresentaram ninhos de concretagem (L300-E0-A0, L300-E0-A3, L300-E0-A4.8, L150-E0).

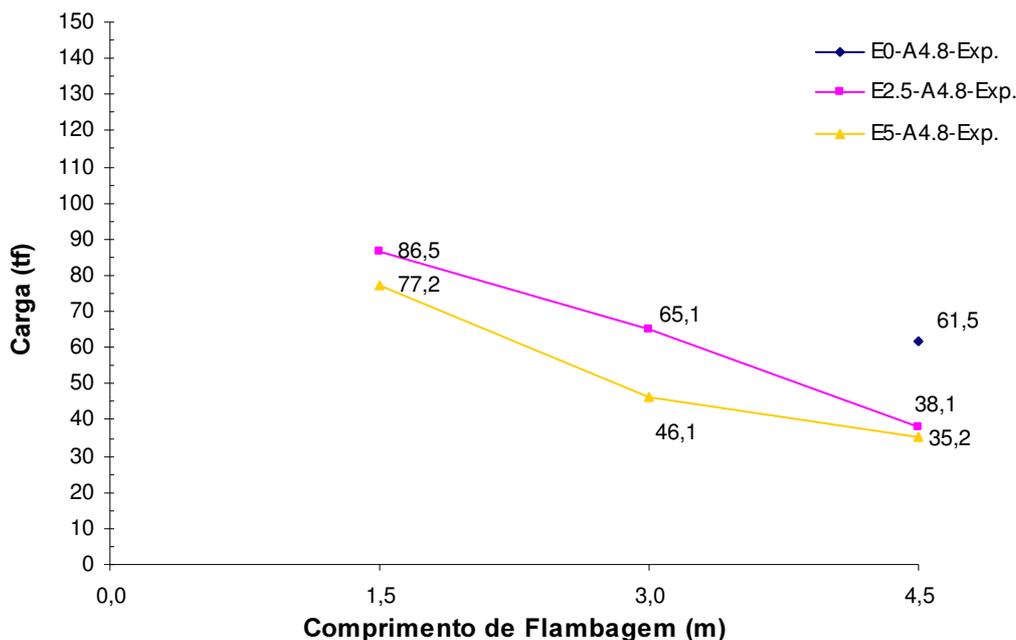


Figura 4.112 – Curva Carga x Comprimento de Flambagem com Armadura constante de 4.8 cm^2 , valores experimentais.

A tabela 4.4 mostra a variação da esbeltez em função do comprimento de flambagem.

Comprimento (m)	Esbeltez	
	λ_x	λ_y
1,5	29,24	31,78
3,0	58,48	63,56
4,5	87,72	95,34

Tabela 4.4 – Esbeltez para cada comprimento de flambagem.

4.1.5. Influência da taxa de armadura

A figura 4.113 demonstra que a variação da taxa de armadura não contribuiu para o aumento da resistência do pilar.

O aumento de zero para 3,5% na taxa de armadura (vergalhões) representa um aumento de $23,43 \text{ cm}^2$ para $32,23 \text{ cm}^2$ na área total de aço, incluindo a área da seção do perfil. Assim considerando uma taxa total de aço, definida como a

relação entre a área total de aço (perfil + vergalhões) e a área de concreto, essa taxa de armadura passaria de 20,1 para 23,6 %. Ainda que esse acréscimo na taxa total de aço tenha sido pequeno, era de se esperar que houvesse um pequeno aumento na capacidade do pilar. A figura 4.127 mostra que isto não ocorreu. Tal fato é justificável pela variação na resistência do concreto de cada pilar

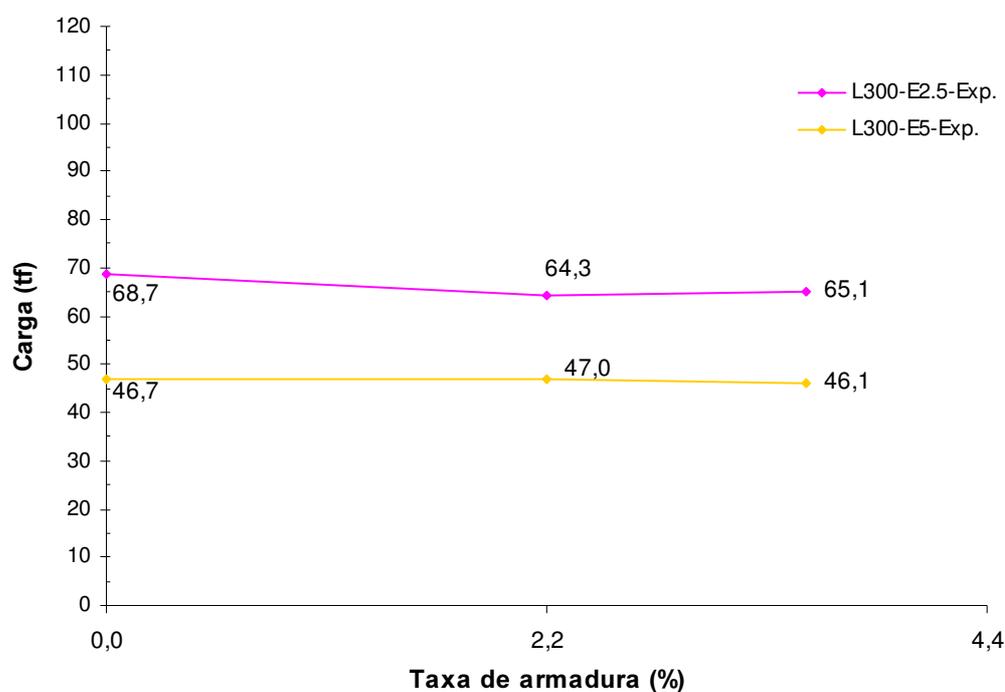


Figura 4.113 – Curva Carga x Taxa de Armadura, valores experimentais.

4.1.6. Influência da excentricidade da carga

A carga resistida por pilares sujeitos a flexo-compressão diminui com o aumento da excentricidade. No presente caso, esta diminuição é mostrada na figura 4.114, onde se observa, nos caso dos pilares de 4,5 metros de altura (L450), que a carga resistida cai de 61,5 para 35,2 toneladas quando a excentricidade passa de zero para 5 cm, o que representa uma queda de 42,8%.

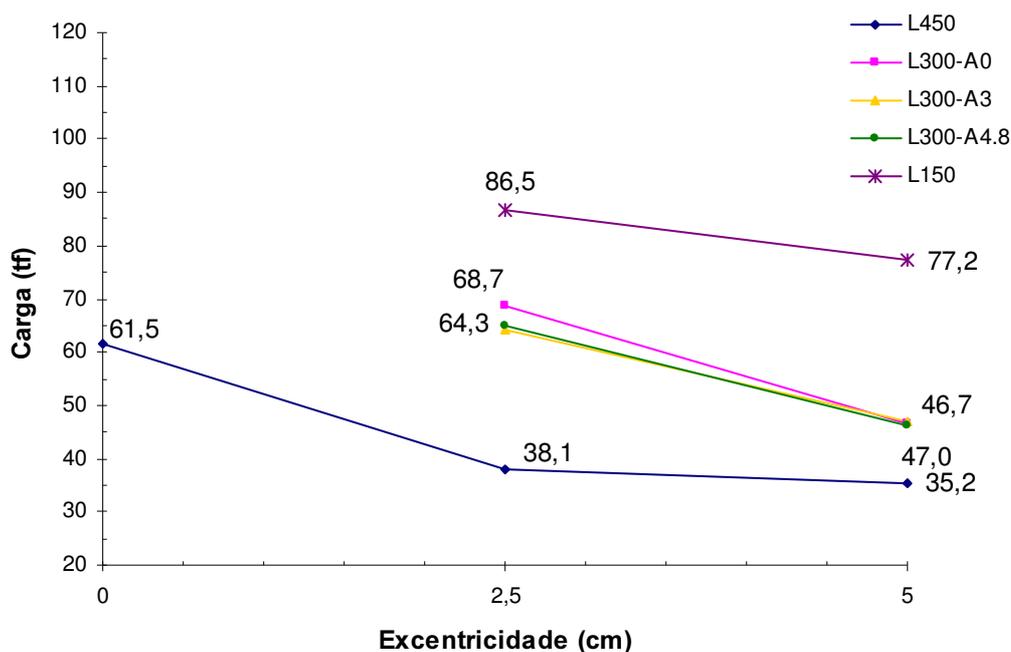


Figura 4.114 – Curva Carga última x Excentricidade, valores experimentais.

4.1.7.

Contribuição de cada material para a resistência da seção

Considerando que a deformação medida é a mesma para o aço do perfil, para o concreto e para a armadura, pode-se obter a distribuição da resistência entre esses três materiais que compõem o pilar misto.

Tomando como exemplo um pilar curto com uma seção transversal tal como a considerada neste trabalho, com $A_s = 4,8 \text{ cm}^2$ e concreto com resistência $f_c = 45 \text{ MPa}$, a carga máxima resistida pelo pilar sob compressão uniforme é:

Concreto:	$0,45 \text{ tf/cm}^2 \times 136,3 \text{ cm}^2 = 61,3 \text{ tf}$	33,0%
Perfil de aço:	$3,5 \text{ tf/cm}^2 \times 27,4 \text{ cm}^2 = 95,8 \text{ tf}$	51,5 %
Armadura:	$6,0 \text{ tf/cm}^2 \times 4,8 \text{ cm}^2 = 28,8 \text{ tf}$	15,5%

Portanto neste caso a contribuição da armadura é pequena. Porém para valores empregados na prática (em torno de 25 MPa) a contribuição da armadura seria mais significativa.

4.1.8. Problemas na concretagem

Como visto anteriormente, os pilares L300-E0-A0, L300-E0-A3, L300-E0-A4.8 e L150-E0, apresentaram ninhos de concretagem em alguns trechos, como mostram as figuras 4.13, 4.17, 4.22, 4.49. Portanto os resultados destes pilares estão comprometidos. A fim de investigar melhor a real condição da concretagem, foram feitas aberturas em todos os pilares nos trechos da seção crítica, constatando-se que o problema ocorreu apenas nos quatro pilares citados acima.

As aberturas nos pilares mostraram conectores de cisalhamento que não tinham sido previstos. Os trechos onde ocorreu entupimento da seção estavam sempre abaixo do par de conectores. A brita se acumulava, impedindo a passagem do concreto, formava-se então um vazio seguido de um trecho com apenas argamassa.

A má qualidade da concretagem foi devida a vários fatores: a alta taxa de armadura dos pilares, a existência de conectores de cisalhamento que não haviam sido previstos, e a baixa trabalhabilidade do concreto, que estava seco e continha muita brita.

O concreto foi preparado em betoneira e a concretagem foi feita com os pilares na vertical. Foi utilizado vibrador de imersão.

4.1.9. Comparação entre resultados experimentais e de cálculo

A tabela 4.5 mostra as cargas últimas experimentais e as resistências obtidas pelos métodos da NBR 14323 [6] e do Eurocode [8].

As resistências de cálculo foram obtidas considerando os valores de cálculo das tensões de escoamento da armadura e do aço do perfil ($f_{ys} = 500$ MPa, $f_{ya} = 250$ MPa) e empregando os coeficientes de redução de resistência dos materiais. No cálculo das resistências nominais foram utilizados os valores reais ($f_{ys} = 600$ MPa, $f_{ya} = 350$ MPa) e todos os coeficientes de redução de resistência foram considerados iguais a um.

De uma maneira geral, todos os valores nominais calculados pelas normas técnicas apresentaram resultados próximos aos obtidos experimentalmente, exceto no caso dos pilares que apresentaram problemas, como visto anteriormente.

Na tabela 4.6 é feita a comparação das resistências obtidas nos ensaios com as resistências de cálculo e nominais calculadas pela NBR e pelo EuroCode.

Comp. L (m)	Excent. ex (cm)	Tx. Arm. ρ (%)	Armad. As (cm ²)	Cálculo		Nominal		Experi- mental (tf)
				NBRd (tf)	ECd (tf)	NBR (tf)	EC (tf)	
4,5	0,0	3,5	4,8	44,5	50,4	67,7	64,8	61,5
	2,5	3,5		27,8	29	42,9	37,9	38,1
	5,0	3,5		21,7	23,1	34,0	30,8	35,2
3	2,5	0	0	33,7	36,4	55,3	50	68,7
		2,2	3,0	37,4	37,2	60,7	50,5	64,3
		3,5	4,8	39,3	38,2	63,5	51,2	65,1
	5,0	0	0	24,6	27,6	40,3	38,7	46,7
		2,2	3,0	27,6	28,5	44,9	39,2	47,0
		3,5	4,8	29,0	29,2	47,2	39,6	46,1
1,5	2,5	3,5	4,8	48,8	52,1	82,1	72,2	86,5
	5,0	3,5		34,8	38	58,4	53,3	77,2

Tabela 4.5 – Resistências experimentais, de cálculo e nominais.

Comp. L (m)	Excent. ex (cm)	Tx. Arm. ρ (%)	Armad. As (cm ²)	Comparação		Comparação	
				Exp./NBRd	Exp./ECd	Exp./NBR	Exp./EC
4,5	0,0	3,5	4,8	1,38	1,22	0,91	0,95
	2,5	3,5		1,37	1,31	0,89	1,00
	5,0	3,5		1,62	1,52	1,04	1,14
3	2,5	0	0	2,04	1,89	1,24	1,37
		2,2	3,0	1,72	1,73	1,06	1,27
		3,5	4,8	1,66	1,70	1,02	1,27
	5,0	0	0	1,90	1,69	1,16	1,21
		2,2	3,0	1,70	1,65	1,05	1,20
		3,5	4,8	1,59	1,58	0,98	1,16
1,5	2,5	3,5	4,8	1,77	1,66	1,05	1,20
	5,0	3,5		2,22	2,03	1,32	1,45

Tabela 4.6 – Comparação entre as resistências experimentais, de cálculo e nominais.

A figura 4.115 mostra a relação entre o comprimento de flambagem e as resistências experimentais dos pilares e as obtidas pelos métodos de cálculo NBR e EuroCode. Os valores indicados próximo aos pontos são as resistências experimentais.

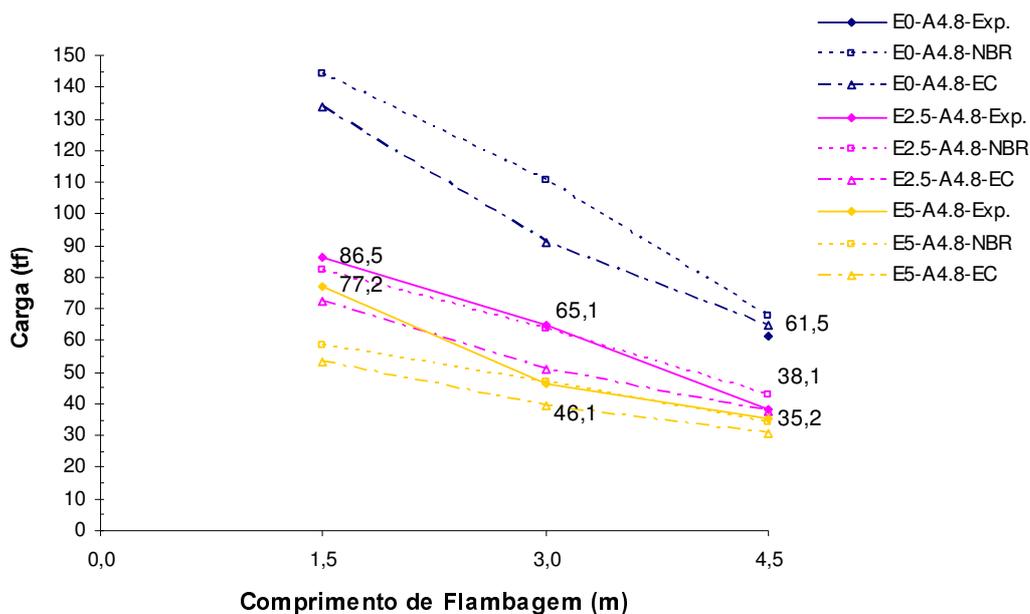


Figura 4.115 – Curva Carga x Comprimento de Flambagem, comparação dos valores experimentais e nominais.

A figura 4.116 demonstra que no cálculo, a variação da taxa de armadura pouco contribui para o aumento da resistência do pilar. E os ensaios mostraram que para este caso em que a resistência do concreto foi de 45 MPa, o emprego de armadura não representa nenhuma vantagem.

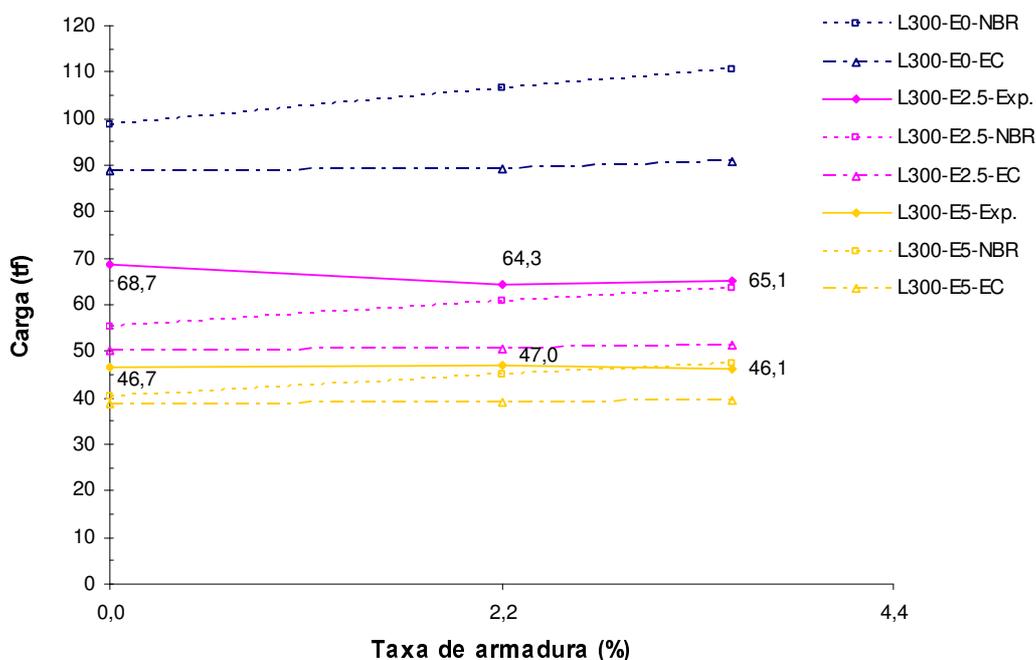


Figura 4.116 – Curva Carga x Taxa de Armadura, comparação dos valores experimentais e nominais.

Como já mencionado no item 4.1.6 os resultados experimentais mostraram a diminuição da resistência dos pilares com o aumento da excentricidade.

Nas figuras 4.117 a 4.121 os resultados experimentais são comparados com os resultados teóricos, os quais também mostram essa redução.

Nas figuras pode-se observar que a taxa de diminuição da resistência é semelhante para os valores experimentais e teóricos.

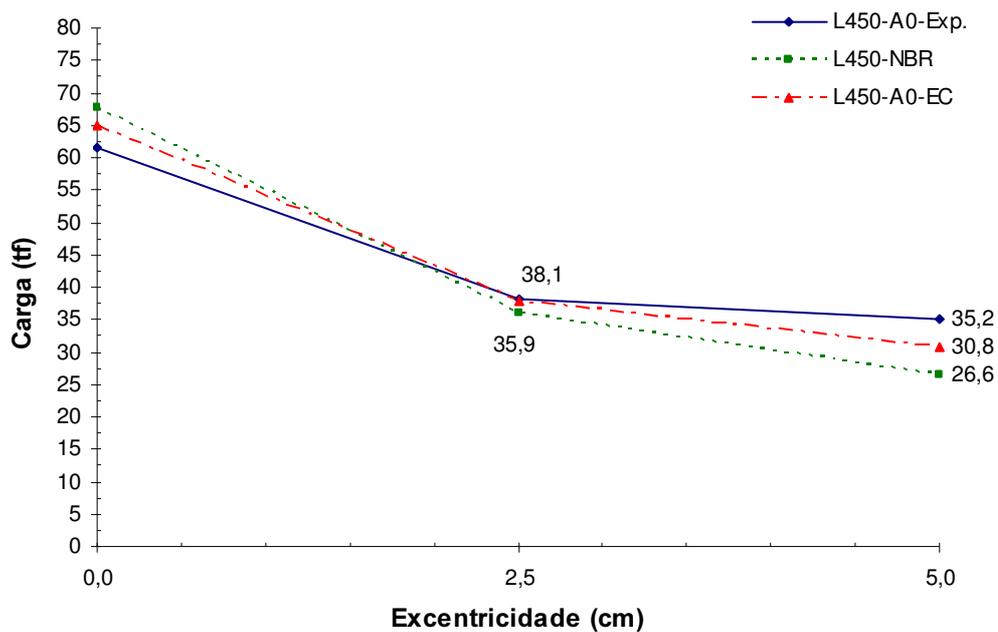


Figura 4.117 – Curva Carga x Excentricidade para os pilares de 4,5 metros, comparação dos valores experimentais e nominais.

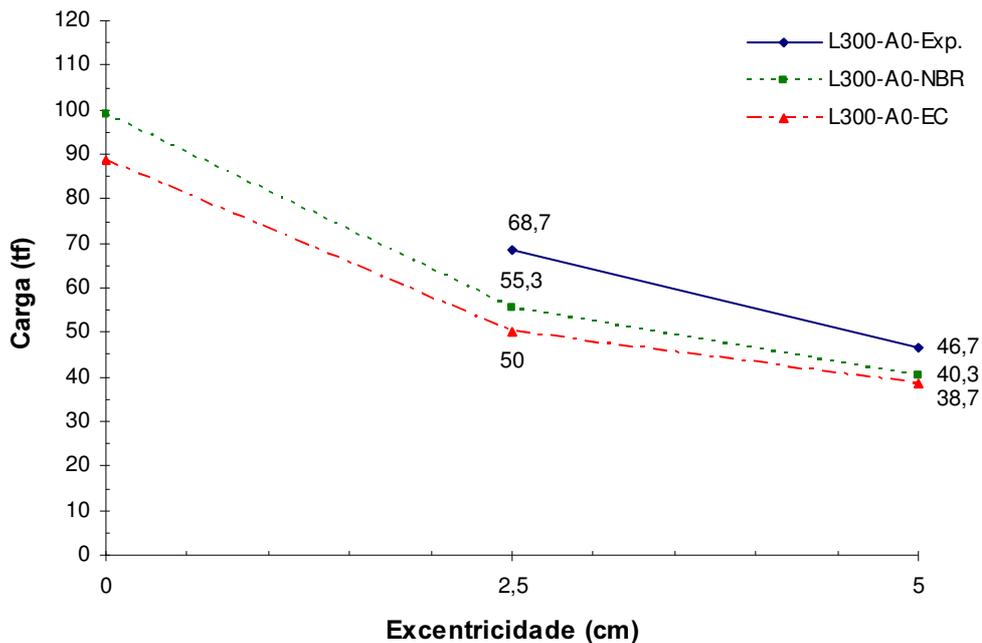


Figura 4.118 – Curva Carga x Excentricidade para os pilares de 3,0 metros sem armadura, comparação dos valores experimentais e nominais.

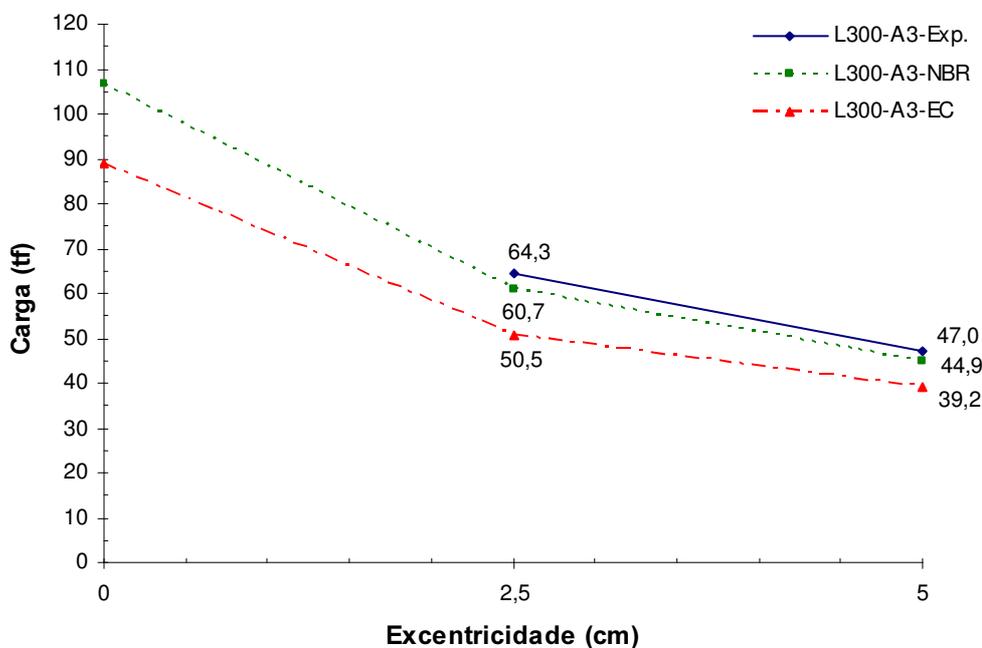


Figura 4.119 – Curva Carga x Excentricidade para os pilares de 3,0 metros e armadura igual a 3,0 cm², comparação dos valores experimentais e nominais.

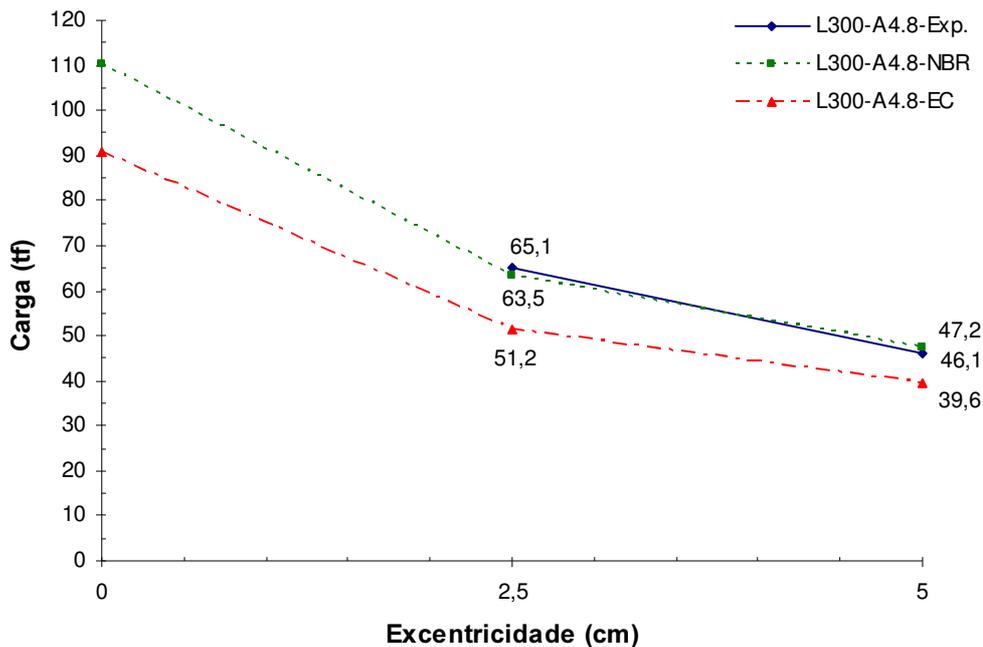


Figura 4.120 – Curva Carga x Excentricidade para os pilares de 3,0 metros e armadura igual a 4,8 cm², comparação dos valores experimentais e nominais.

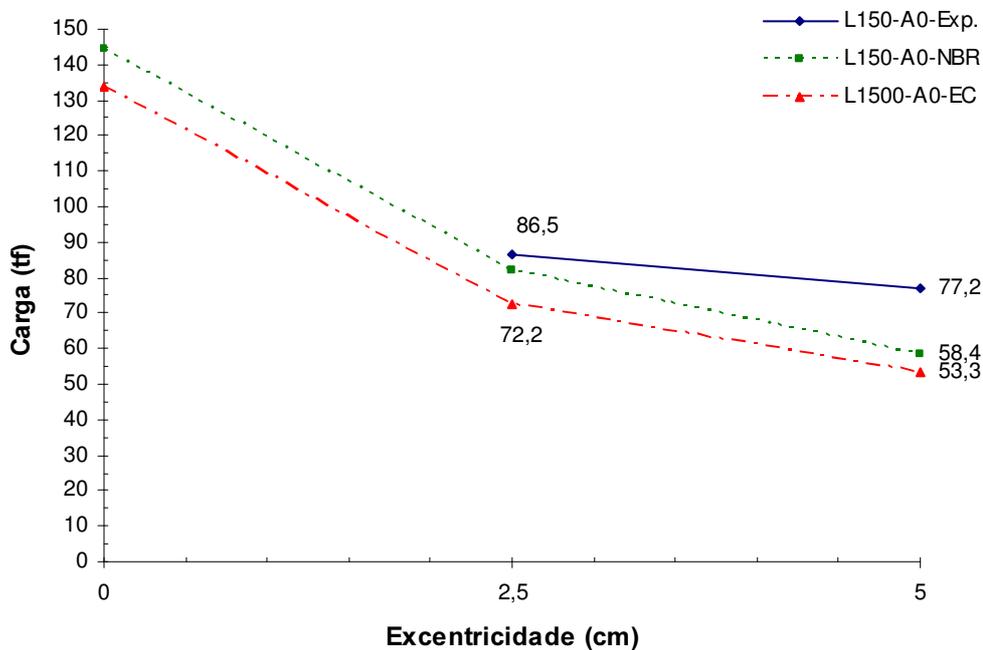


Figura 4.121 – Curva Carga x Excentricidade para os pilares de 1,5 metros, comparação dos valores experimentais e nominais.

Como visto nos itens 2.8.1.6 e 2.8.2.4 tanto a NBR 14323 [6] quanto o EuroCode 4 [8] apresentam uma curva de interação dos pares de momentos e cargas axiais aplicados para os quais a seção mista atinge a plastificação total.

As figuras 4.122 e 4.123 mostram as curvas de interação obtidas para pilares de 3 e 4,5 metros com mesma taxa de armadura $\rho = 3,5 \%$ ($6 \phi 10.0$) e os resultados experimentais para as excentricidades de 2,5 cm e 5 cm.

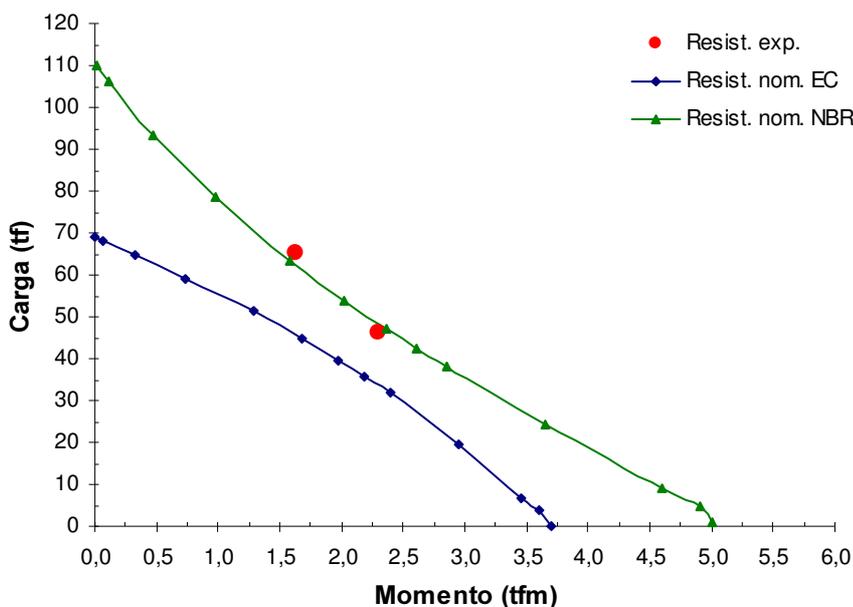


Figura 4.122 – Curva de Interação M x N para os pilares de 3,0 metros e $\rho = 3,5\%$, e resultados experimentais.

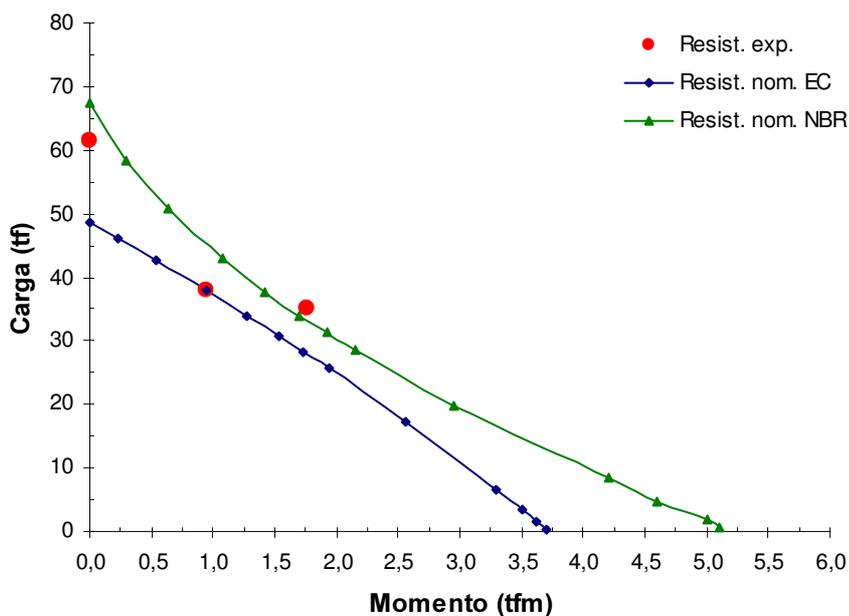


Figura 4.123 – Curva de Interação M x N para os pilares de 4,5 metros e $\rho = 3,5\%$, e resultados experimentais.

Nas curvas de interação da norma brasileira é possível notar uma pequena mudança na curva próximo ao valor da resistência da seção mista à plastificação total pelo momento fletor $M_{pl,Sd}$ (em torno de 5,0 tf.m).