

## 4. Apresentação e análise dos resultados

### 4.1. Modos de ruptura

Em todos os pilares a ruptura ocorreu bruscamente na região central do pilar (Figuras 4.1 a 4.8). Na face mais comprimida, se verificou visualmente o esmagamento do concreto e o posterior encurvamento das barras longitudinais entre os estribos.

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores da força de ruptura  $F_u$  (valor máximo atingido no ensaio) e os correspondentes valores das deformações  $\epsilon_c$  no concreto na face mais comprimida, as deformações  $\epsilon_s$  na armadura na face tracionada e comprimida. São apresentados também os valores da resistência à compressão do concreto no dia da realização dos ensaios dos pilares, da tensão de escoamento das barras da armadura longitudinal e da excentricidade da força aplicada em relação ao eixo do pilar (excentricidade de primeira ordem).

Deve ser esclarecido que nos pilares C80-3.2 e C80-4.3 a excentricidade de primer ordem foi 3,0 cm devido às limitações de carga do atuador hidráulico.

Tabela 4.1 – Resultados gerais dos pilares ensaiados

Série	Pilar	$f_c$ (Mpa)	$f_y$ (Mpa)	$e_1$ (cm)	$F_u$ (kN)	$\epsilon_c$ (‰)	$\epsilon_s$ * (‰)	
							tração	compr.
Serie I	C40 - 1.3	53,6	539	2,0	1235	-3,34	1,01	-3,43
	C40 - 2.1	49,1	547	2,0	1168	-2,38	0,81	-3,42
	C40 - 3.2	46,9	547	2,0	1147	-2,22	0,14	-1,84
	C40 - 4.3	48,7	547	2,0	1412	-4,42	1,05	-3,05
Serie II	C80 - 1.3	89,7	539	2,0	1769	-3,04	1,30	-2,57
	C80 - 2.1	83,2	547	2,0	1823	-3,05	1,42	-2,61
	C80 - 3.2	82,5	547	3,0	1783	-2,66	1,67	-2,70
	C80 - 4.3	79,0	547	3,0	1920	-3,53	1,11	-0,64

\* Valores médios das duas barras de aço instrumentadas.



Figura 4.1 – Ensaio do pilar C40-1.3



Figura 4.2 – Ensaio do pilar C40-2.1



Figura 4.3 – Ensaio do pilar C40-3.2



Figura 4.4 – Ensaio do pilar C40-4.3



Figura 4.5 – Ensaio do pilar C80-1.3

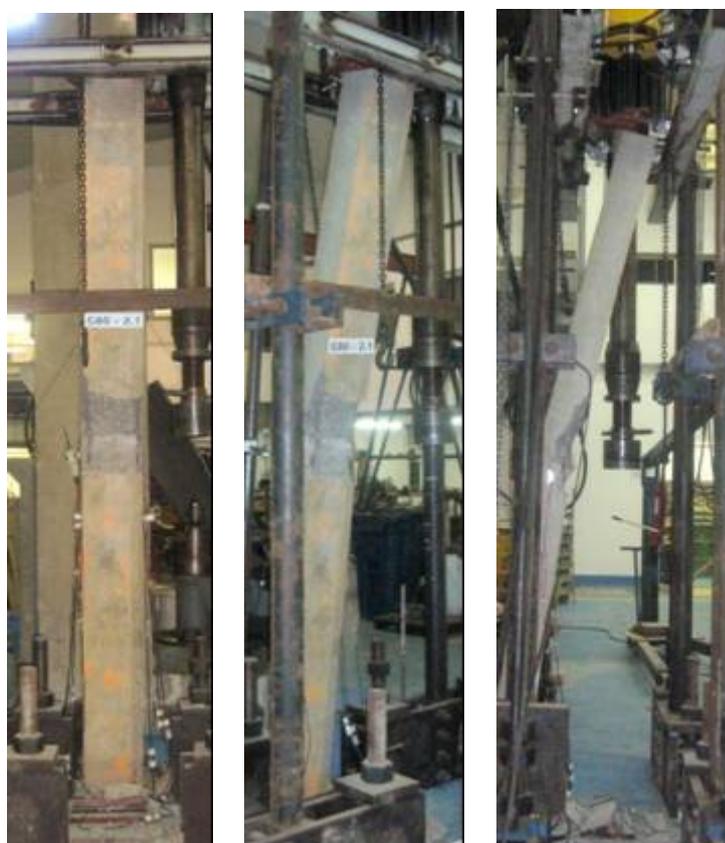


Figura 4.6 – Ensaio do pilar C80-2.1



Figura 4.7 – Ensaio do pilar C80-3.2

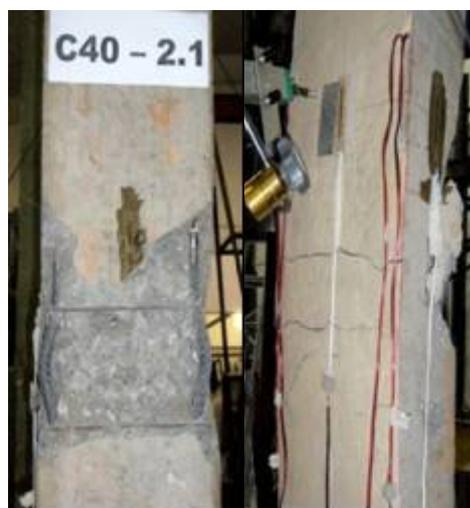


Figura 4.8 – Ensaio do pilar C80-4.3

Nas figuras 4.9 e 4.10 são apresentadas vistas fotográficas da região central onde ocorre a ruptura dos pilares da série I e da série II, respectivamente.



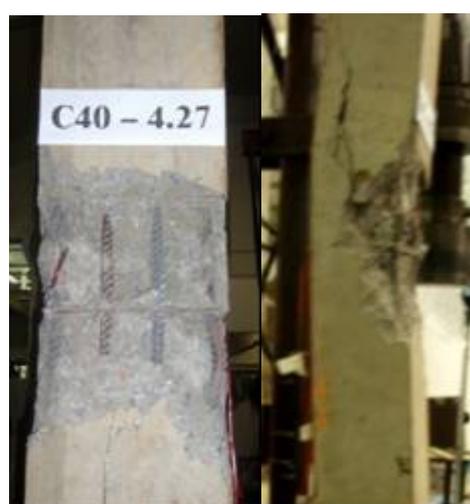
a) Pilar C40 – 1.3



b) Pilar C40 – 2.1



c) Pilar C40 – 3.2



d) Pilar C40 – 4.3

Figura 4.9 – Vista da ruptura dos pilares da série I



a) Pilar C80 – 1.3



b) Pilar C80 – 2.1



c) Pilar C80 – 3.2



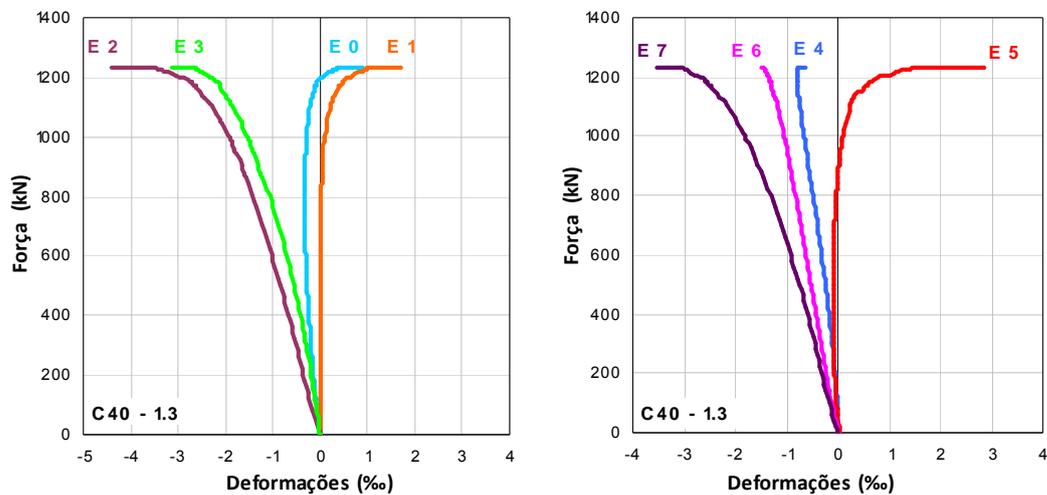
d) Pilar C80 – 4.3

Figura 4.10 – Vista da ruptura dos pilares da série II

### 4.3. Curvas força-deformação

As curvas força-deformação dos pilares da série I estão mostradas nas Figuras 4.11 a 4.14, e as da série II nas Figuras 4.15 a 4.18. Essas curvas mostram que, em todos os pilares, a seção instrumentada permanece inteiramente comprimida até o valor da carga aplicada atingir aproximadamente 70% da carga de ruptura. A partir daí, devido ao crescimento do momento aplicado à seção causado pelo crescimento mais acentuado da excentricidade de 2ª ordem, um dos lados da seção passa a ser tracionado. Deve-se ressaltar que as deformações no

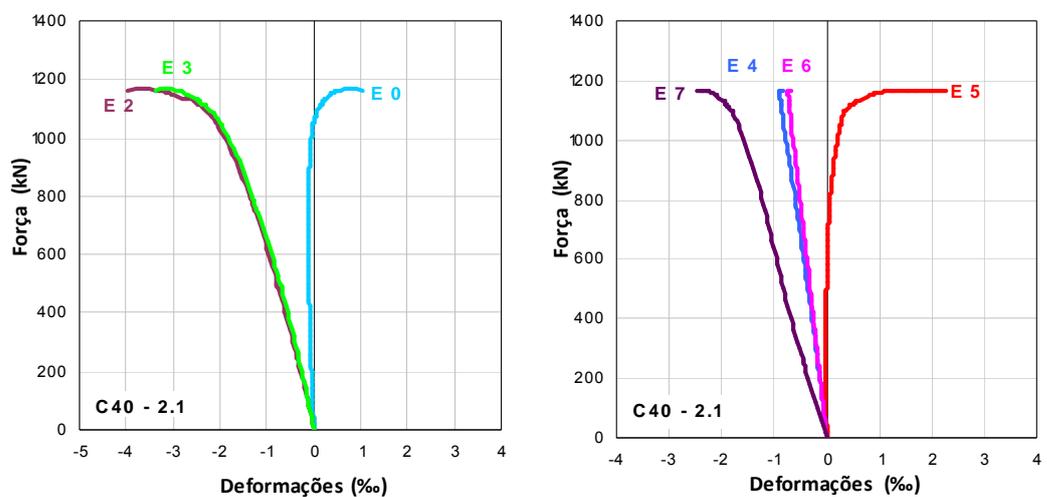
concreto medidas pelo extensômetro E5 nesse lado tracionado só são válidas para valores inferiores àquele correspondente ao surgimento da fissura (0,002 a 0,003), pois, a partir daí, os extensômetros mediram a abertura da fissura.



a) Deformação na armadura longitudinal

b) Deformação no concreto

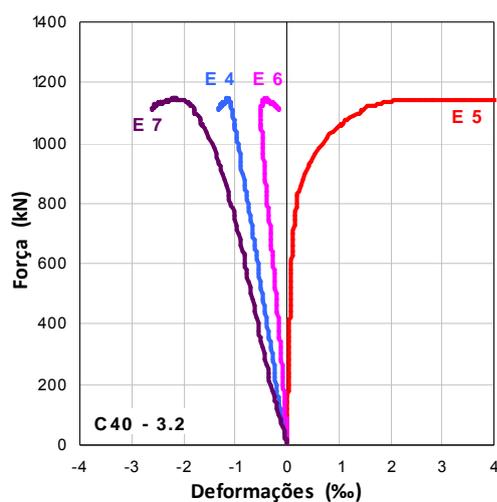
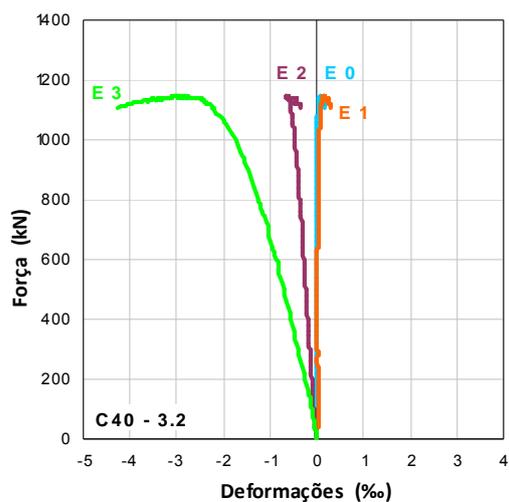
Figura 4.11 – Curvas força – deformação no pilar C40 – 1.3



a) Deformação na armadura longitudinal

b) Deformação no concreto

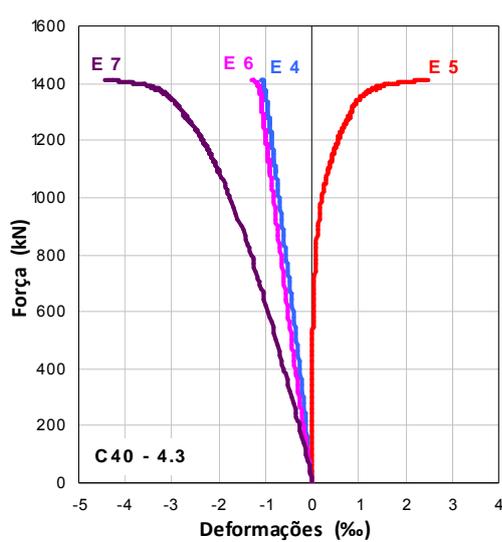
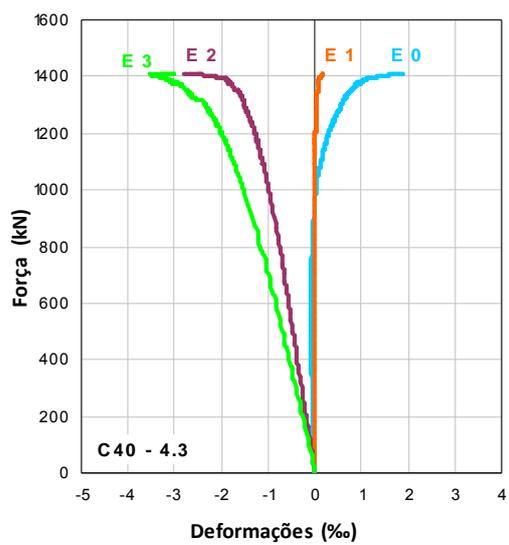
Figura 4.12 – Curvas força – deformação no pilar C40 – 2.1



a) Deformação na armadura longitudinal

b) Deformação no concreto

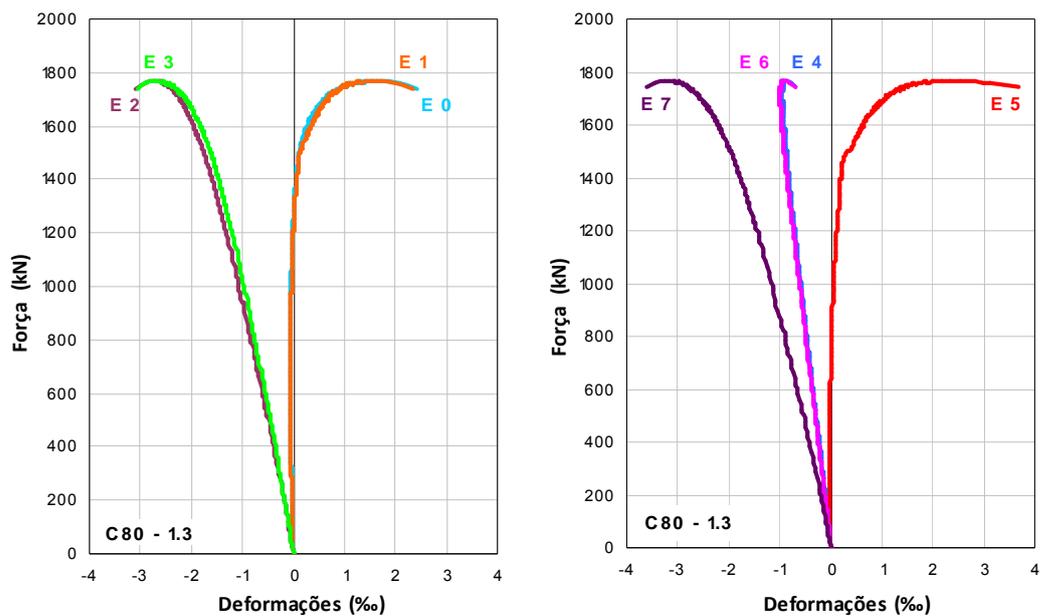
Figura 4.13 – Curvas força – deformação no pilar C40 – 3.2



a) Deformação na armadura longitudinal

b) Deformação no concreto

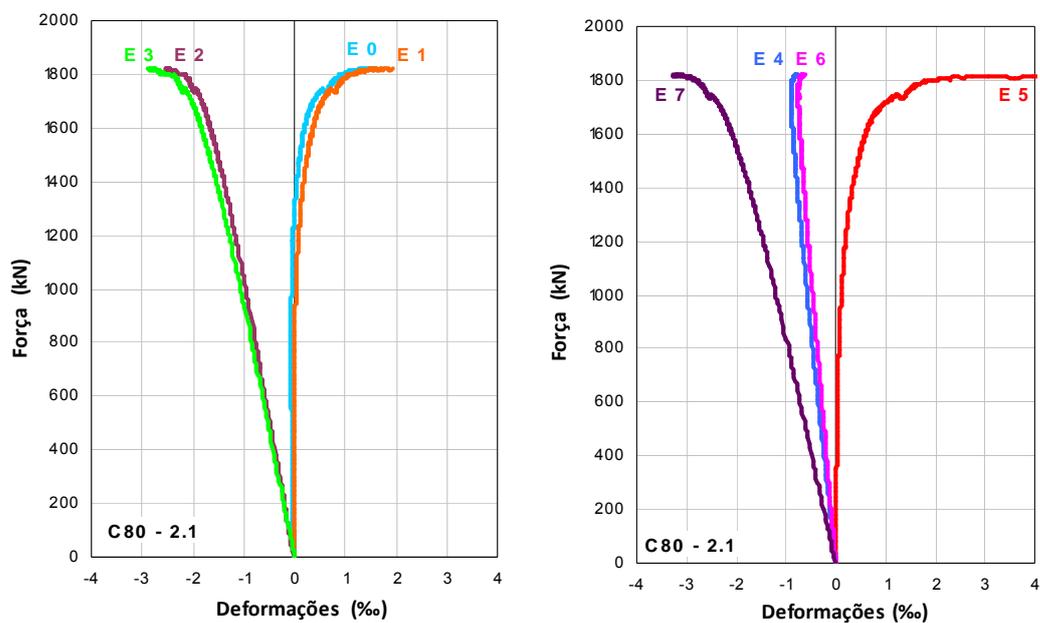
Figura 4.14 – Curvas força – deformação no pilar C40 – 4.3



a) Deformação na armadura longitudinal

b) Deformação no concreto

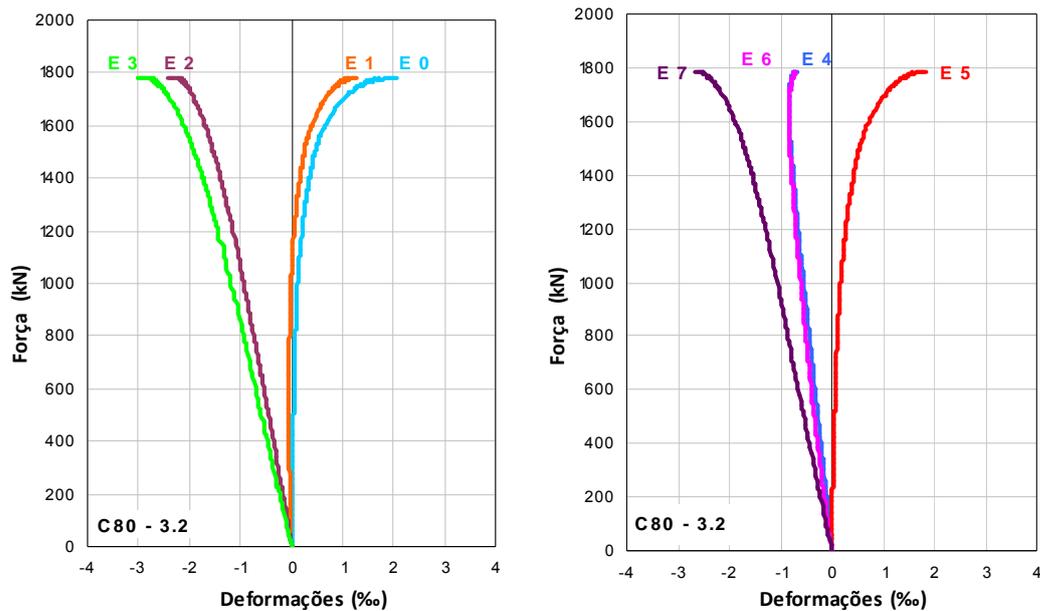
Figura 4.15 – Curvas força – deformação no pilar C80 – 1.3



a) Deformação na armadura longitudinal

b) Deformação no concreto

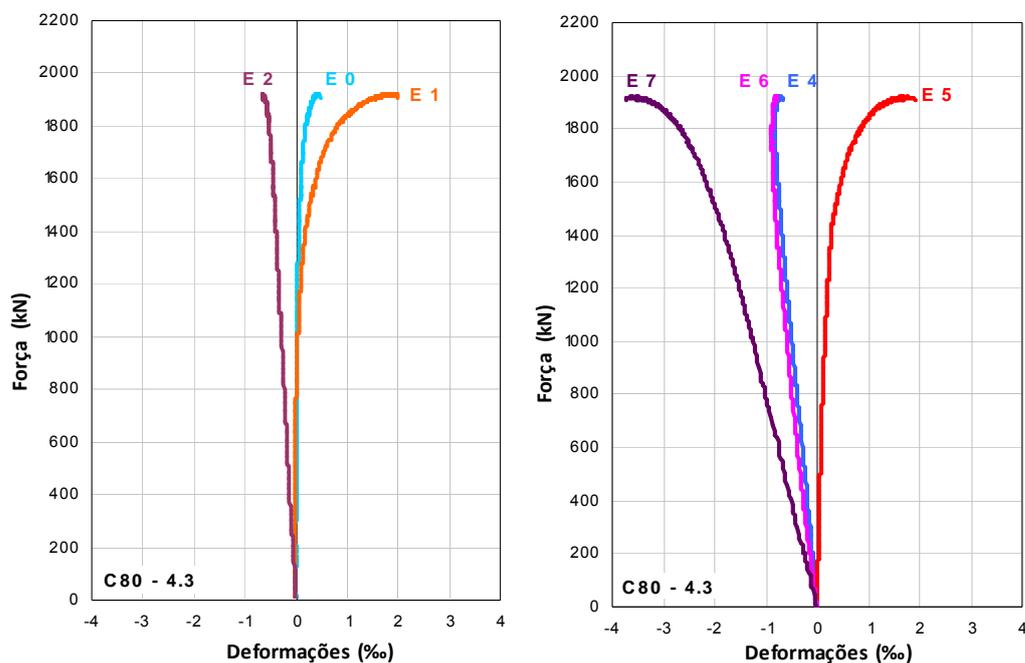
Figura 4.16 – Curvas força – deformação no pilar C80 – 2.1



a) Deformação na armadura longitudinal

b) Deformação no concreto

Figura 4.17 – Curvas força – deformação no pilar C80 – 3.2

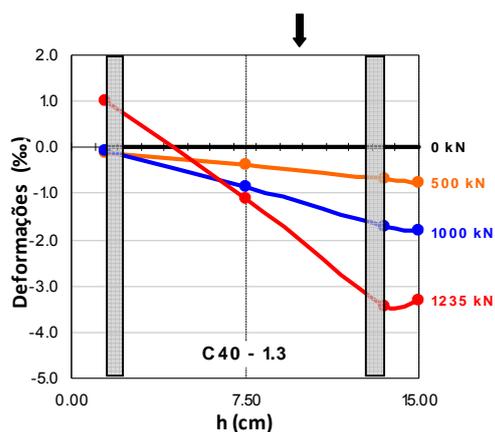


a) Deformação na armadura longitudinal

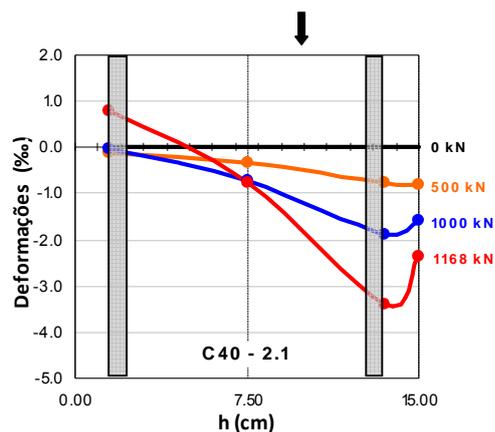
b) Deformação no concreto

Figura 4.18 – Curvas força – deformação no pilar C80 – 4.3

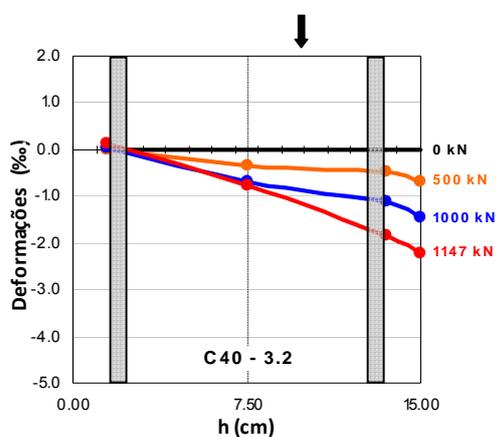
Nas figuras 4.19 e 4.20 são apresentadas a distribuição das deformações na seção média dos pilares da série I e série II respectivamente. Essas figuras foram traçadas com os valores das deformações no concreto, na face mais comprimida (E7), faces adjacentes (E4 e E6) e as deformações das armaduras na face tracionada (E0 e E1) e comprimida (E2 e E3).



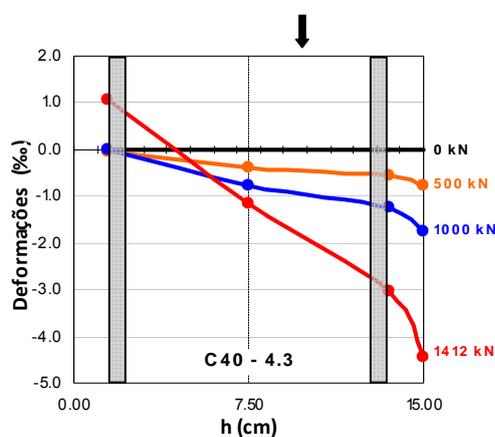
a) Pilar C40 – 1.3



b) Pilar C40 – 2.1

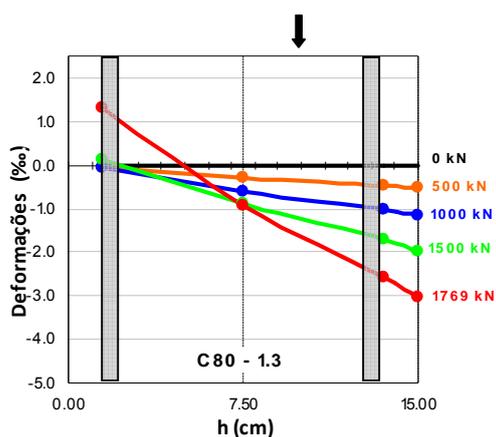


c) Pilar C40 – 3.2

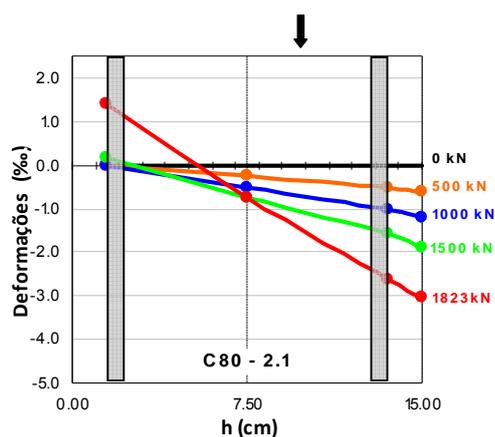


d) Pilar C40 – 4.3

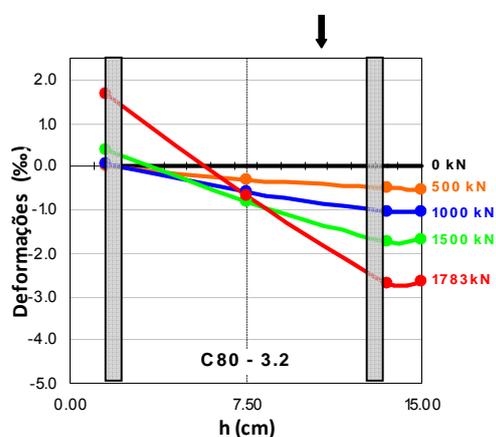
Figura 4.19 – Distribuição de deformações na seção média dos pilares da série I



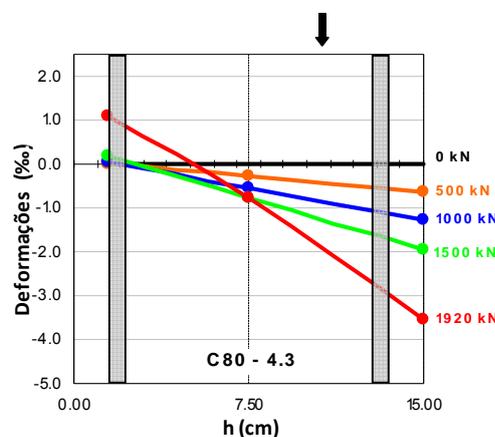
a) Pilar C80 – 1.3



b) Pilar C80 – 2.1



c) Pilar C80 – 3.2



d) Pilar C80 – 4.3

Figura 4.20 – Distribuição de deformações na seção média dos pilares da série II

#### 4.4. Curvas carga-deslocamento

As curvas carga-deslocamento transversal medidos na seção média dos pilares encontram-se nas figuras 4.22 e 4.23. Essas figuras mostram ainda o deslocamento ( $e_2$ ) calculado pelo método do pilar padrão com curvatura calculada em função dos valores experimentais da deformação do concreto e da armadura longitudinal, dadas na Tabela 4.1, pela expressão:

$$\delta_{(L/2)} = \frac{L^2}{10} \cdot \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_s}{d} \quad (4.1)$$

$L$  é o comprimento de flambagem igual a 312 cm para todos os pilares;

$d$  é a altura útil da seção, 13 cm para  $\phi$  10 e 12.7 cm para  $\phi$  16;

$\varepsilon_c$  é a deformação do concreto na face mais comprimida;

$\varepsilon_s$  é a deformação média das duas barras tracionadas.

#### 4.4.1. Pilares da série I

Na figura 4.22 são mostradas as curvas força–deslocamento transversal dos pilares da série I. A curva azul representa os valores medidos e a vermelha os deslocamentos calculados pela expressão 4.1. Os valores  $\delta_{T(L/2)}$  medidos são dados pela expressão 4.2, onde  $\delta_{\text{topo}}$  é o deslocamento de corpo rígido no topo do pilar (figura 4.21).

$$\delta_{T(L/2)} = \delta_{\text{central}} - \frac{\delta_{\text{topo}}}{2} \quad (4.2)$$

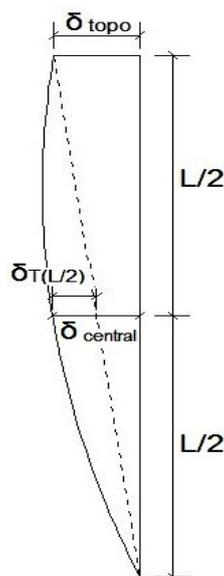
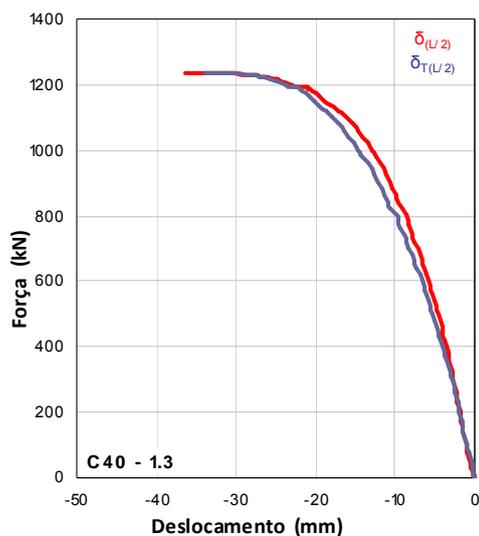
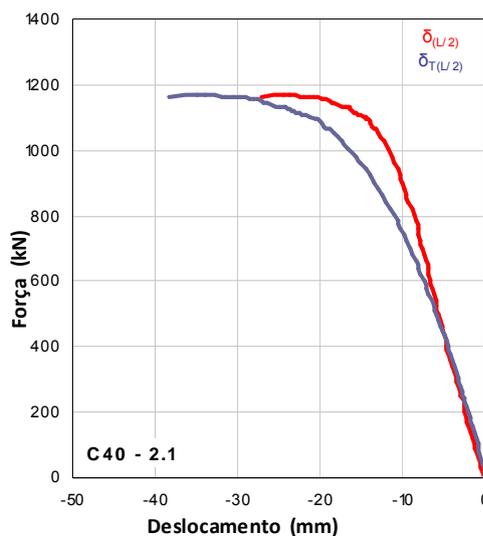


Figura 4.21 – Deslocamento transversal no pilar

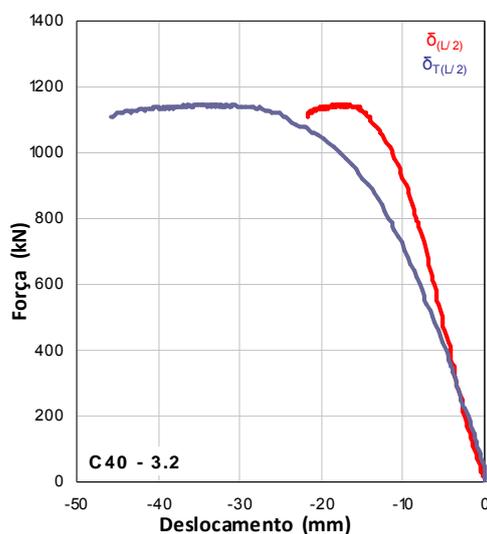
Em dois pilares a concordância entre valores experimentais e medidos foi excelente enquanto que nos outros dois os valores calculados foram menores do que os experimentais.



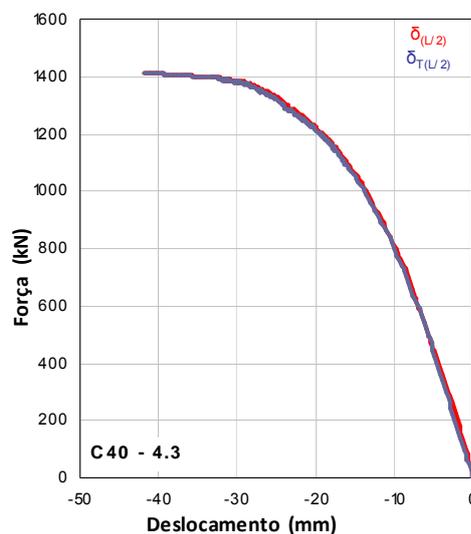
a) Pilar C40 – 1.3



b) Pilar C40 – 2.1



c) Pilar C40 – 3.2



d) Pilar C40 – 4.3

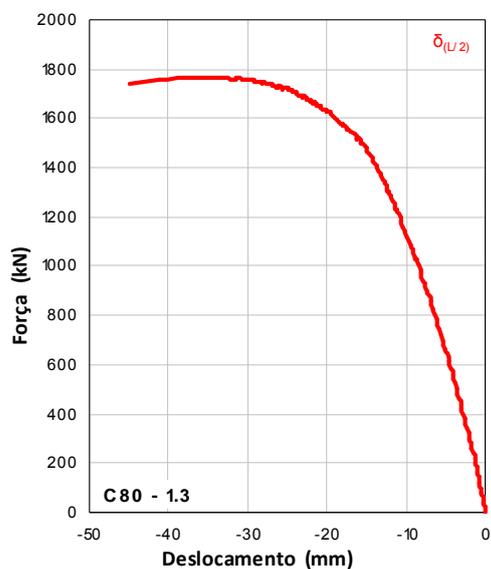
Figura 4.22 – Curvas força–deslocamento na região central da série I

#### 4.4.2.

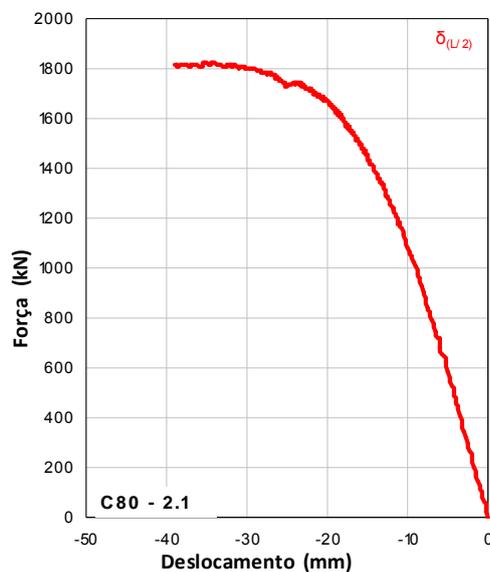
#### Pilares da série II

Os ensaios desta série foram realizados um atrás do outro sem interrupção para uma análise preliminar dos resultados. Ao final dos quatro ensaios, verificou-se que os diagramas carga-deslocamentos eram todos lineares (no topo, no meio do pilar e na base) nos quatro pilares o que não faz sentido. Algum erro foi cometido na conexão dos transdutores ou na identificação do canal (no software) a ser lido. Infelizmente, esses resultados tiveram de ser descartados.

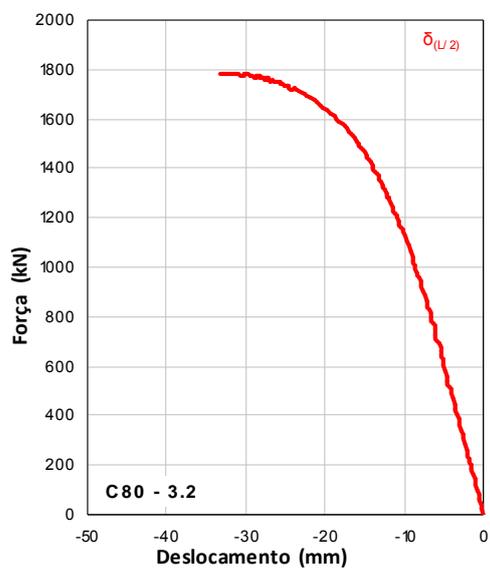
Portanto, as curvas força-deslocamento apresentadas na figura 4.23 são apenas as curvas teóricas obtidas como nos pilares da série I.



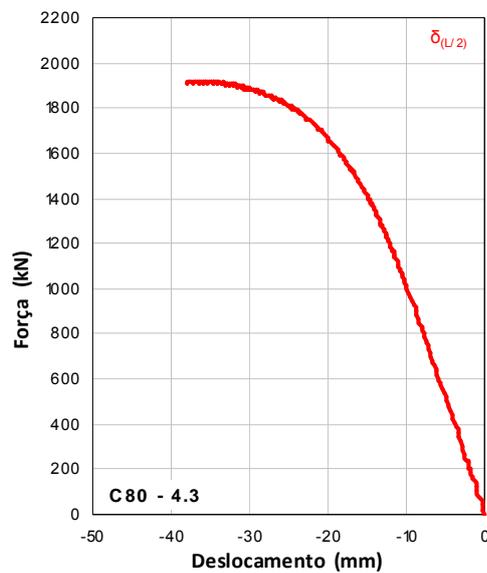
a) Pilar C80 – 1.3



b) Pilar C80 – 2.1



c) Pilar C80 – 3.2



d) Pilar C80 – 4.3

Figura 4.23 – Curvas força–deslocamento na região central da série II

## 4.5. Comparação entre resultados experimentais e teóricos

### 4.5.1. Excentricidades de 2ª ordem

Na figura 4.24 é feita a comparação entre as excentricidades de 2ª ordem experimentais e as teóricas calculadas:

- a) pelo método do pilar padrão com curvatura aproximada da NBR6118:2003 calculadas pelas expressões 2.11 e 2.12 (Barras CA-NBR na fig.4.24).
- b) pelo método do pilar padrão com curvatura calculada pela expressão 4.1 com as deformações medidas no concreto e no aço dadas na Tabela 4.1 (Barras CA na fig.4.24).
- c) pelo método da rigidez aproximada da NBR6118:2003 (Barras RA-NBR na fig.4.24).

A figura 4.24 mostra que na série I ( $f_c = 40$  MPa) os valores das excentricidades de 2ª ordem obtidos pelos métodos *a)* e *b)* acima estão mais próximos dos valores experimentais, enquanto que o método da rigidez aproximada é o que fornece os menores valores de  $e_2$  comparados aos valores experimentais. Portanto, no dimensionamento de um pilar, este método estaria contra a segurança. Quando se consideram as excentricidades totais (Figura 4.25), entretanto, a diferença entre os resultados teóricos e experimentais diminui.

Foi feita também a mesma comparação entre as excentricidades de 2ª ordem experimentais obtidas nos ensaios de (LLOYD e RANGAN, 1996) e de (LEE e SON, 2000), (Ver Cap. 2) com as teóricas calculadas pelos métodos da NBR6118:2003 (Figuras 4.26 a 4.28). Nesses casos, os valores teóricos da excentricidade total estão bastante próximos dos valores experimentais (Figuras 4.27 e 4.29), com o método da rigidez aproximada também fornecendo os menores valores.

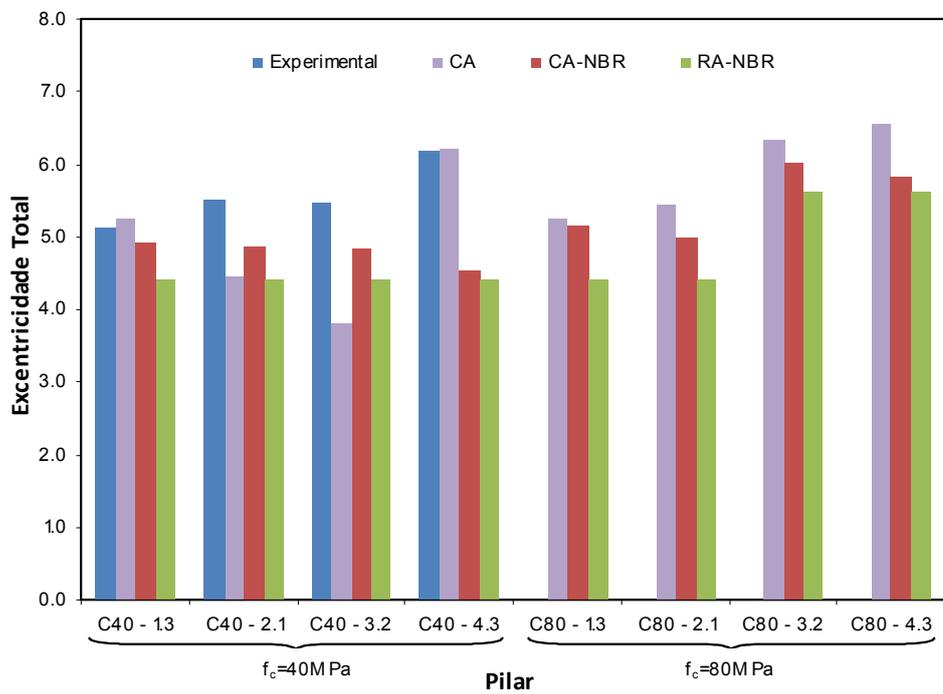


Figura 4.24 – Comparação entre as excentricidades de 2ª ordem

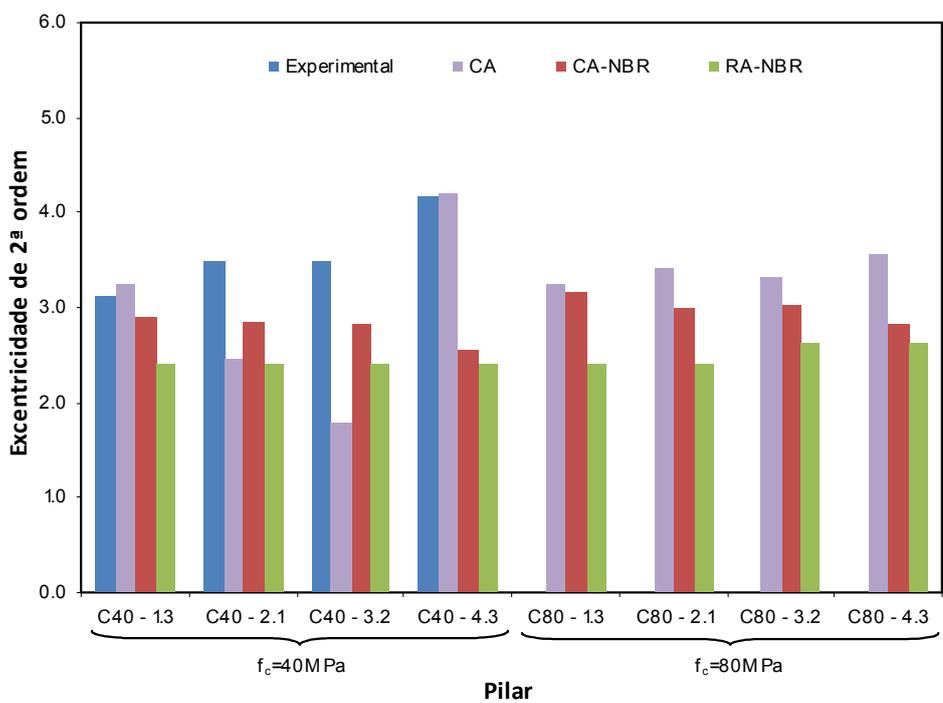


Figura 4.25 – Comparação entre as excentricidades totais

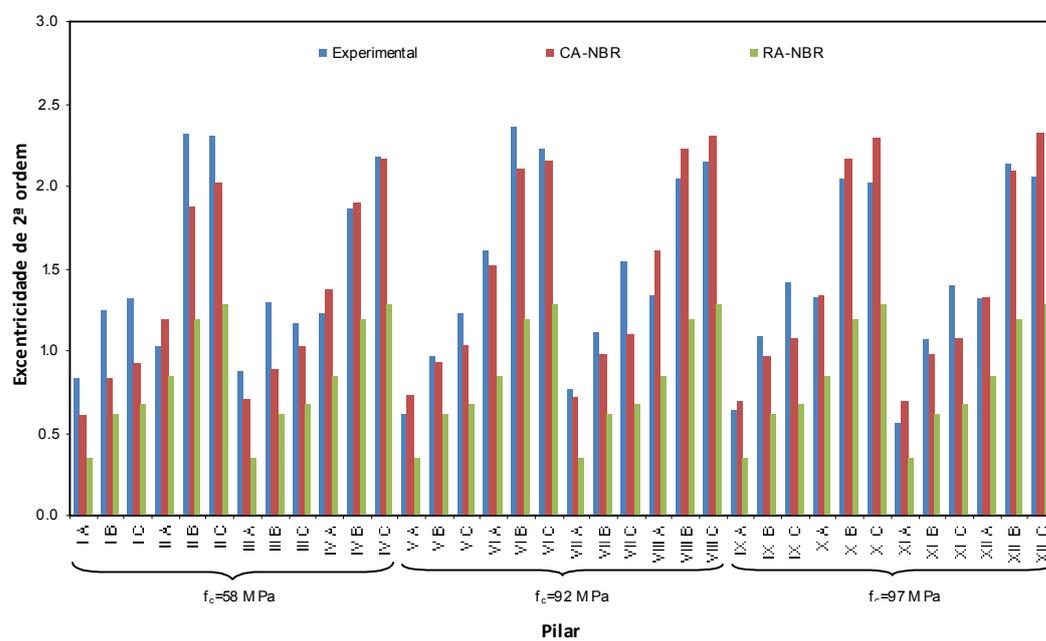


Figura 4.26 – Comparação entre as excentricidades de 2ª ordem (LLOYD e RANGAN, 1996)

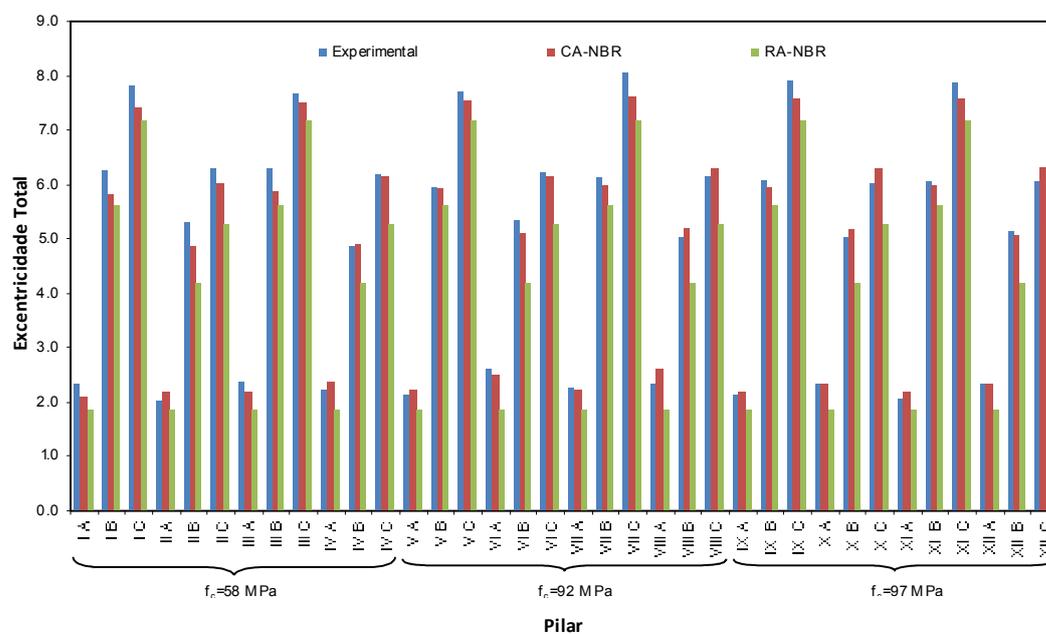


Figura 4.27 – Comparação entre as excentricidades totais (LLOYD e RANGAN, 1996)

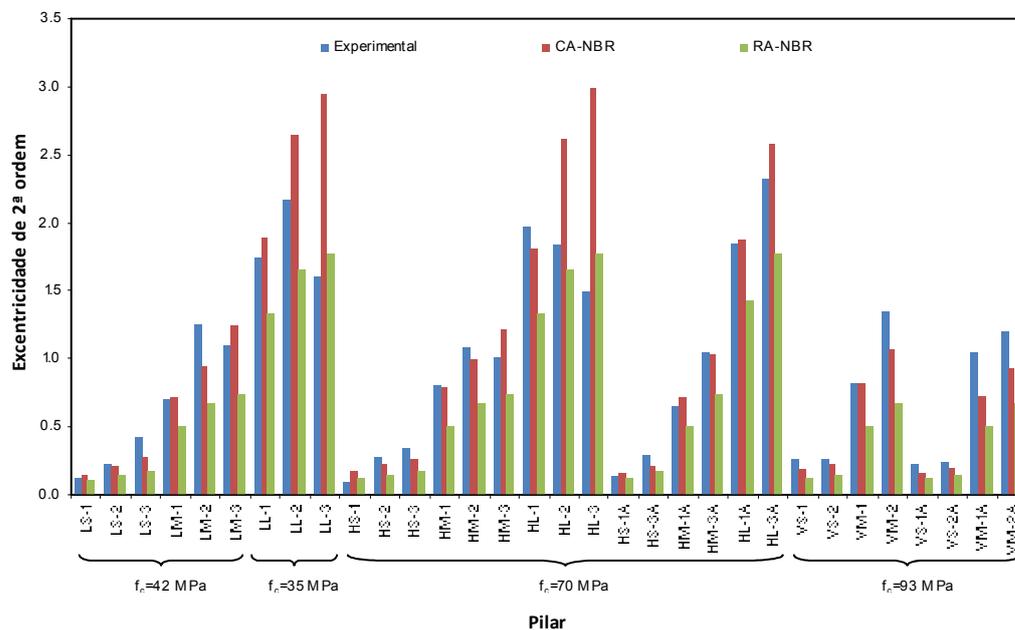


Figura 4.28 – Comparação entre as excentricidades de 2ª ordem (LEE e SON, 2000)

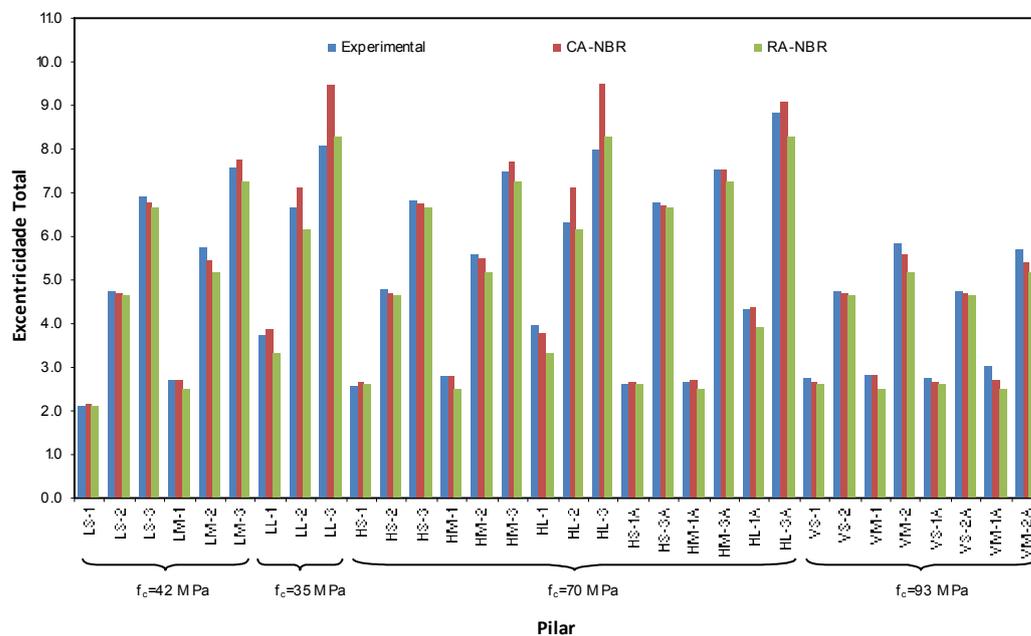


Figura 4.29 – Comparação entre as excentricidades totais (LEE e SON, 2000)

### 4.5.2 Resistência dos pilares

Para a comparação dos resultados foram construídos diagramas de interação  $v - \mu$ . Foram empregados os dados obtidos da caracterização do concreto e do aço apresentados nas tabelas 3.5 e 3.14, respectivamente. Os diagramas de interação foram calculados usando a relação tensão-deformação do concreto indicada pelo CEB-90 dada na figura 4.30.

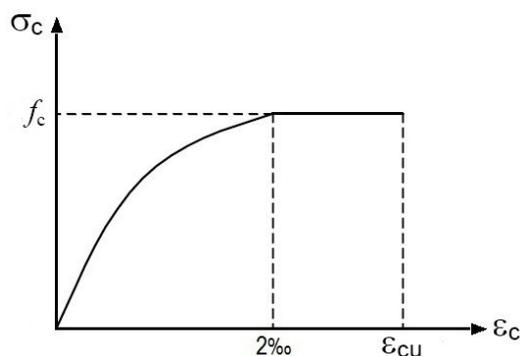


Figura 4.30 – Diagrama tensão – deformação do concreto

A deformação última  $\epsilon_{cu}$  é dada por:

$$\epsilon_{cu} = -0.0035 \quad \text{Para } f_c < 50 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

$$\epsilon_{cu} = -0.0035 \cdot \left( \frac{50}{f_c} \right) \quad \text{Para } 50 \text{ MPa} \leq f_c \leq 80 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

As tensões de compressão no concreto são determinadas pelas expressões:

$$\sigma_c = 0 \quad \text{Para } \epsilon_c > 0 \quad (4.5)$$

$$\sigma_c = f_c \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{\epsilon_c}{0.002} \right) - \left( \frac{\epsilon_c}{0.002} \right)^2 \right] \quad \text{Para } -0.002 < \epsilon_c \leq 0 \quad (4.6)$$

$$\sigma_c = -f_c \quad \text{Para } \epsilon_{cu} \leq \epsilon_c \leq -0.002 \quad (4.7)$$

Os parâmetros adimensionais utilizados nos diagramas são:

Taxa mecânica de armadura

$$\omega = \frac{A_s f_y}{b h f_c} \quad (4.8)$$

Força normal

$$v = \frac{F}{bh f_c} \quad (4.9)$$

Momento fletor

$$\mu = \frac{F \cdot e}{bh^2 f_c} \quad (4.10)$$

onde a excentricidade  $e$  é a soma da excentricidade de 1ª ordem ( $e_1$ ), mais excentricidade de 2ª ordem ( $e_2$ ) que é igual a  $\delta_{(L/2)}$ , dada na expressão 4.1.

$$e = e_1 + e_2 \quad (4.11)$$

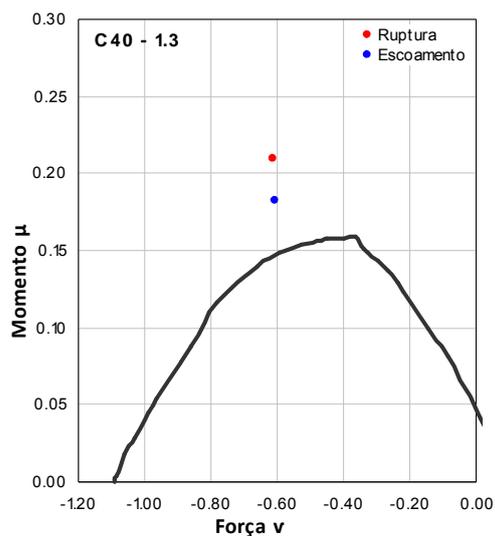
Na tabela 4.2 observam-se os resultados adimensionais dos pilares para a força de ruptura e a força correspondente ao escoamento da armadura mais comprimida.

Tabela 4.2 – Resultados adimensionais dos pilares ensaiados

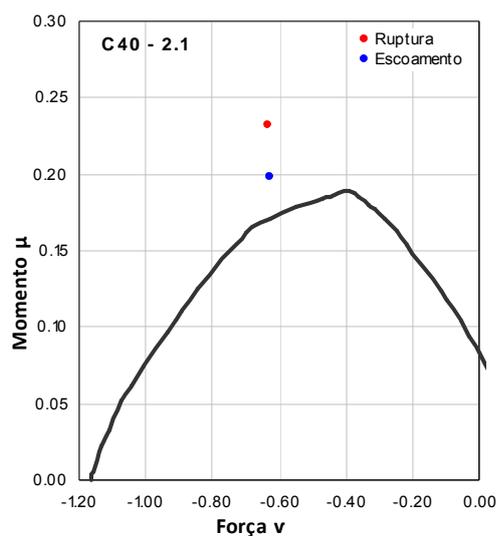
Série	Pilar	$\omega$	Ruptura				Escoamento			
			$F_u$	$e$	$v_u$	$\mu_u$	$F_y$	$e_y$	$v_y$	$\mu_y$
I	C40 - 1.3	0,13	1235	5,12	-0,61	0,21	1215	4,53	-0,60	0,18
	C40 - 2.1	0,24	1168	5,50	-0,63	0,23	1151	4,76	-0,63	0,20
	C40 - 3.2	0,37	1147	5,48	-0,65	0,24	-	-	-	-
	C40 - 4.3	0,48	1412	6,18	-0,77	0,32	1405	5,70	-0,77	0,29
II	C80 - 1.3	0,08	1769	5,25	-0,53	0,18	-	-	-	-
	C80 - 2.1	0,14	1823	5,43	-0,58	0,21	-	-	-	-
	C80 - 3.2	0,21	1783	6,32	-0,58	0,24	-	-	-	-
	C80 - 4.3	0,30	1920	6,56	-0,65	0,28	-	-	-	-

Nas figuras 4.31 e 4.32 apresentam-se os diagramas de interação  $v - \mu$  dos pilares da série I e da série II, respectivamente. São traçados também os valores experimentais da ruptura e o escoamento, apresentados na tabela 4.2.

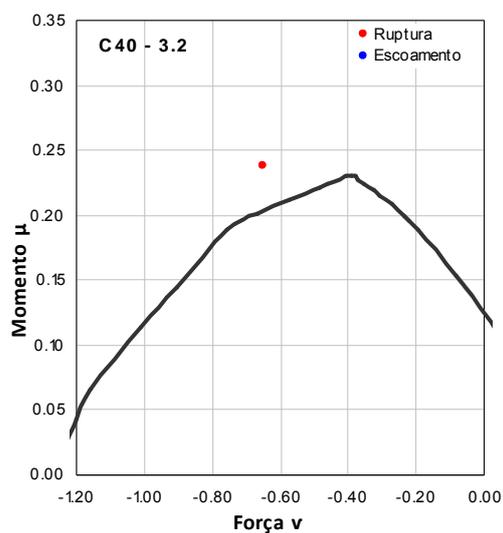
Como se observa na figura 4.31 da série I, em todos os pilares os valores experimentais correspondentes à ruptura e escoamento da armadura encontram-se fora do diagrama de resistências teóricas, excepto no pilar C40-3.2 que rompeu antes que as barras de aço atingissem a deformação de escoamento.



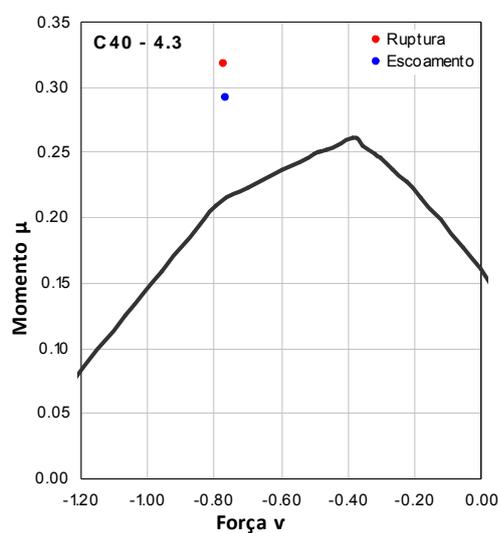
a) Pilar C40 – 1.3



b) Pilar C40 – 2.1



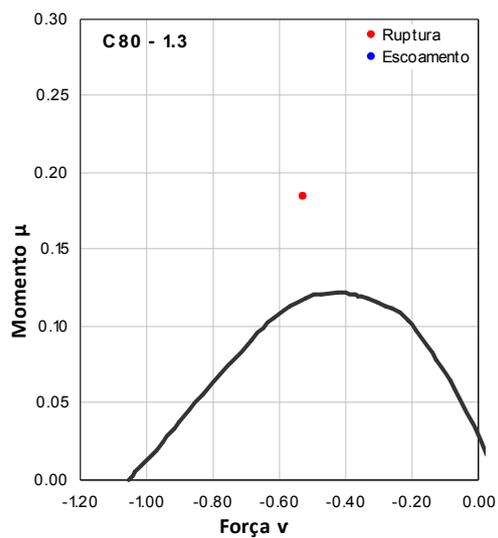
c) Pilar C40 – 3.2



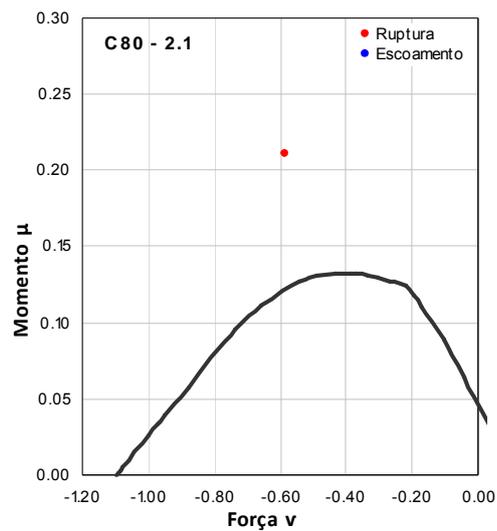
d) Pilar C40 – 4.3

Figura 4.31 – Diagrama de interação  $v-\mu$  e dados experimentais da série I

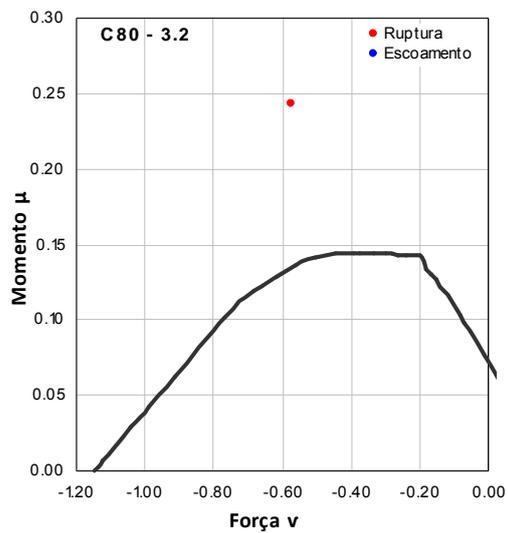
Na figura 4.32 mostram-se os diagramas de interação  $v - \mu$  da série II. Observa-se que todos os pilares tiveram resistências experimentais maiores que as teóricas. A ruptura destes pilares se deu antes que as barras de aço mais comprimidas alcançassem a deformação de escoamento.



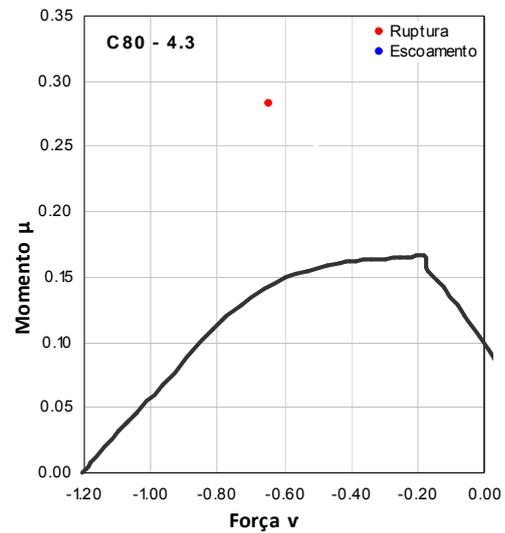
a) Pilar C80 – 1.3



b) Pilar C80 – 2.1



c) Pilar C80 – 3.2



d) Pilar C80 – 4.3

Figura 4.32 – Diagrama de interação  $v$ - $\mu$  e dados experimentais da série II