

4 Análise dos Resultados

4.1. Comportamento dos pilares

Pilar E1,5-p0,4% - 290 kN

A idade do concreto do pilar no início do ensaio era de 166 dias, e o tempo de aplicação da carga foi de 45 minutos até atingir a carga desejada de 290kN. Neste ensaio os extensômetros 2 e 3 não funcionaram.

Após o sexto dia de ensaio a célula de carga apresentou problemas de estabilidade nas leituras. A partir daí tomou-se a decisão de não mais ajustar a carga aplicada e continuar as leituras das deformações e flechas. Obviamente os resultados ficaram prejudicados, pois a carga real aplicada teve um decréscimo contínuo ao longo do tempo. Este ensaio foi interrompido no 37º dia.

As deformações e o deslocamento transversal medidos durante o ensaio estão mostrados nas Figura 4.1 e 4.2, respectivamente.

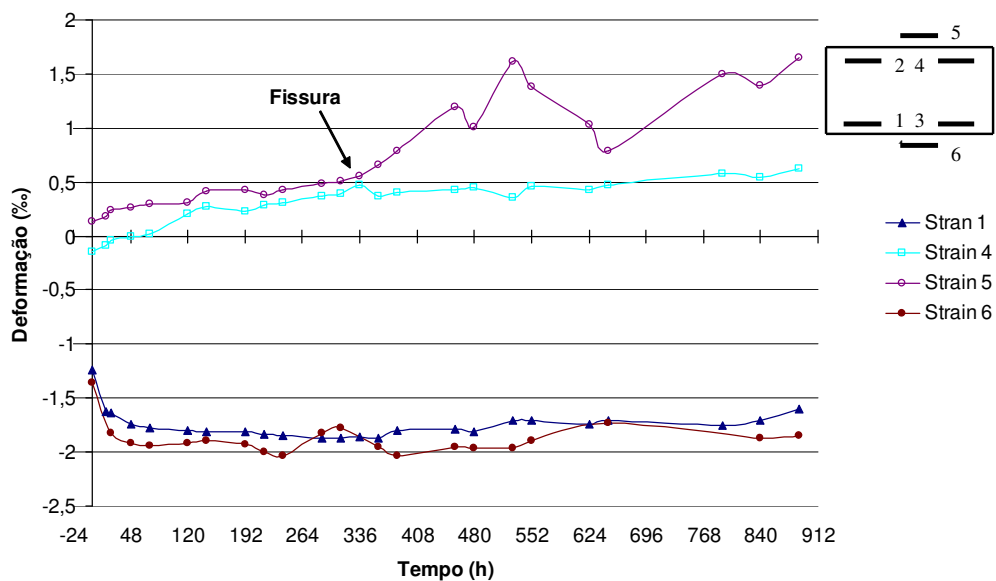


Figura 4.1 – Deformações no pilar E1,5-p0,4%.

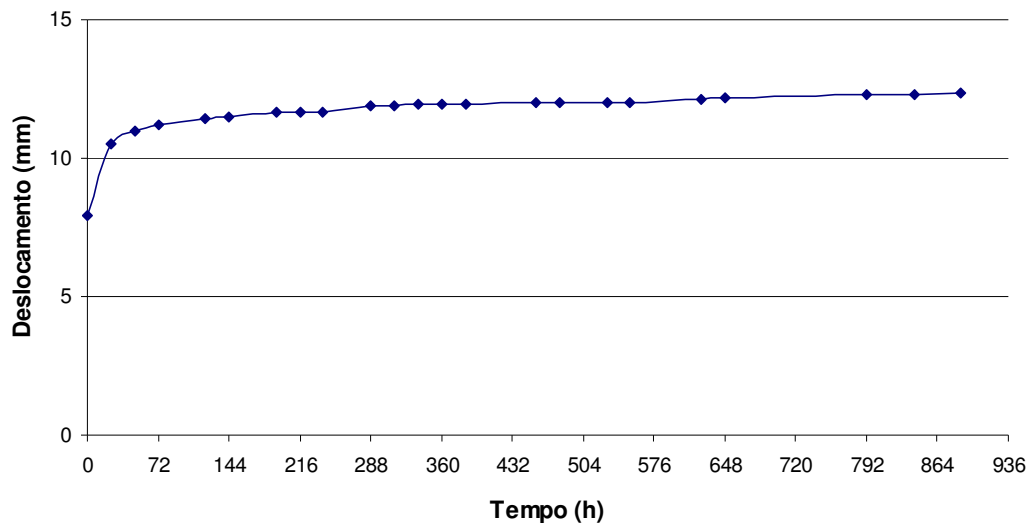


Figura 4.2 – Evolução do deslocamento transversal (flecha) no pilar E1,5-p0,4%.

Pilar E2,0-p0,4% - 260 kN

O ensaio foi iniciado aos 185 dias de idade do concreto. A aplicação da carga durou 55 minutos até atingir o valor de 260 kN. Aproximadamente após 40 horas de ensaio foram observadas as primeiras fissuras numa das faces do pilar, e devido a essas fissuras o extensômetro 5 se partiu após 89 horas, perdendo-se assim suas leituras. Este pilar rompeu por esmagamento do concreto da zona comprimida após 115 horas (4,8 dias) do início do ensaio. As fissuras apresentaram um espaçamento médio entre elas de 6 cm, e a zona esmagada foi de aproximadamente 13 cm.

Nas Figuras 4.3 e 4.4 nota-se que as deformações e a flecha aumentam mais acentuadamente a partir de $t = 96$ até a ruptura do pilar. É importante observar que as deformações fornecidas pelo extensômetro colado no concreto na face tracionada (Extensômetro 5 da Figura 4.3) não têm significado após a fissuração.

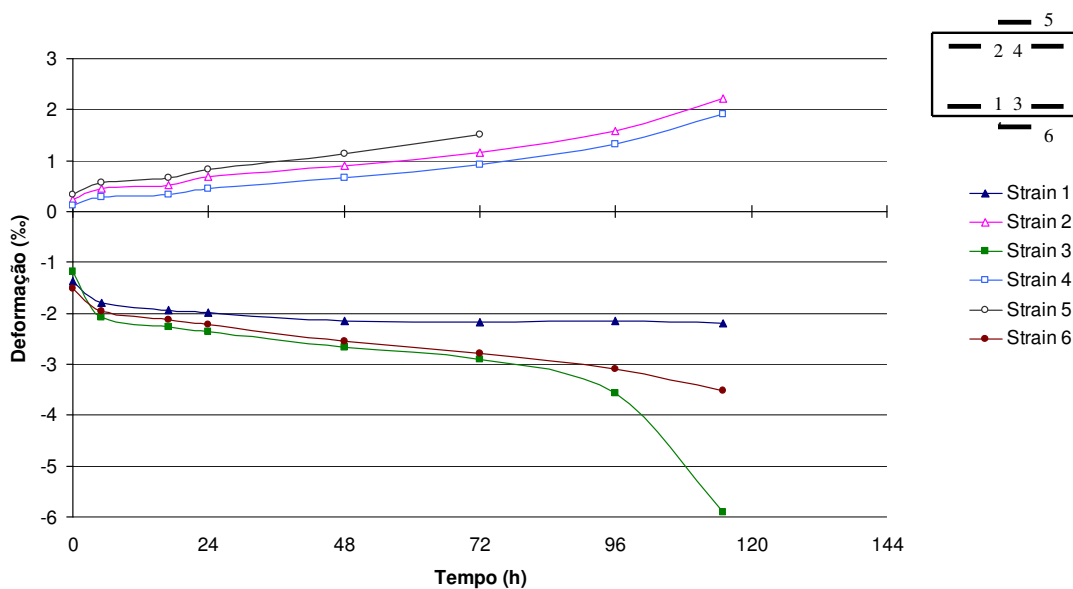


Figura 4.3 – Deformações no pilar E2,0-p0,4%.

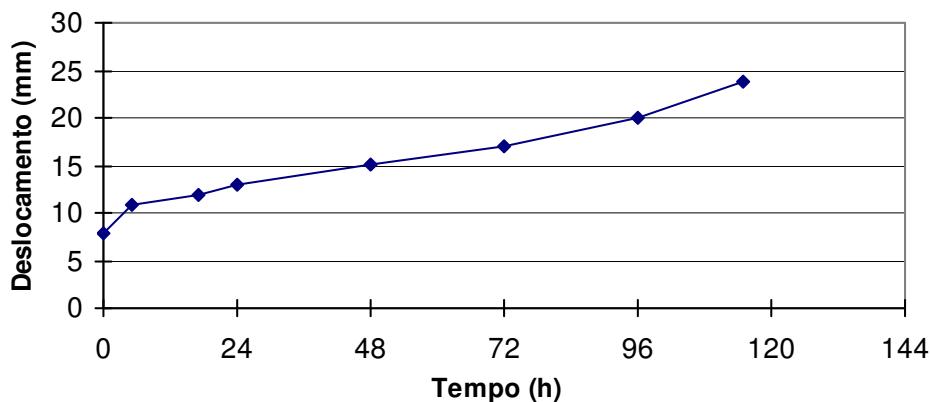


Figura 4.4 – Evolução do deslocamento transversal (flecha) no pilar E2,0-p0,4%.

Pilar E2,5-p0,4% - 240 kN

O ensaio do pilar foi iniciado aos 189 dias de idade, e o tempo necessário para a aplicação da carga de 240 kN foi de 20 minutos. Com 24 horas de ensaio as primeiras fissuras já eram observadas, e, devido a essas fissuras, o extensômetro 5 se partiu após 648 horas, perdendo-se assim suas leituras. Este pilar também rompeu na seção média por esmagamento do concreto da zona comprimida após 696 horas (29º dia) do início do ensaio. As fissuras tiveram um

espaçamento médio entre elas de 6 cm, e a zona esmagada foi de aproximadamente 10 cm.

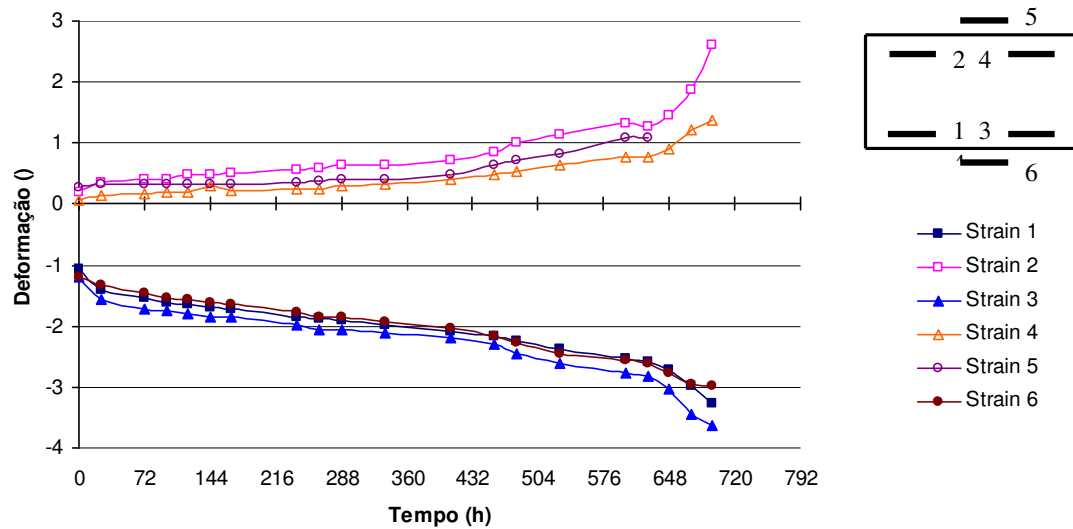


Figura 4.5 – Deformações no pilar E2,5-p0,4%.

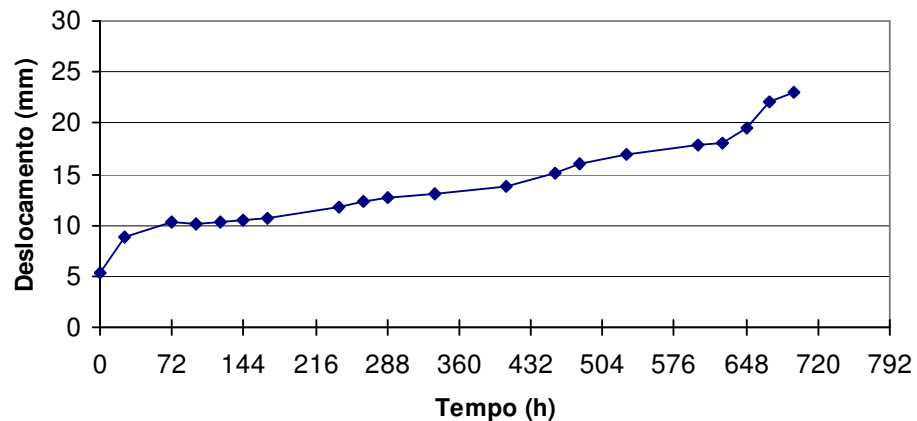


Figura 4.6 – Evolução do deslocamento transversal (flecha) no pilar E2,5-p0,4%.

Pilar E1,5-p4% - 530 kN

O ensaio do pilar foi iniciado aos 206 dias de idade, e o tempo de aplicação de carga foi de 20 minutos até atingir a carga de 530 kN. As primeiras fissuras foram observadas logo após 48 horas do término do carregamento.

A Figura 4.7 mostra que houve um aumento expressivo das deformações na zona comprimida (extensômetros 1, 3 e 6), com a deformação no concreto atingindo o valor de 4 ‰.

A flecha inicial medida no tempo $t = 0$, logo após o término da aplicação da carga (doravante referida como flecha instantânea) foi de 9,75 mm. Após 720 horas o valor da flecha atingiu 20 mm (Fig. 4.8).

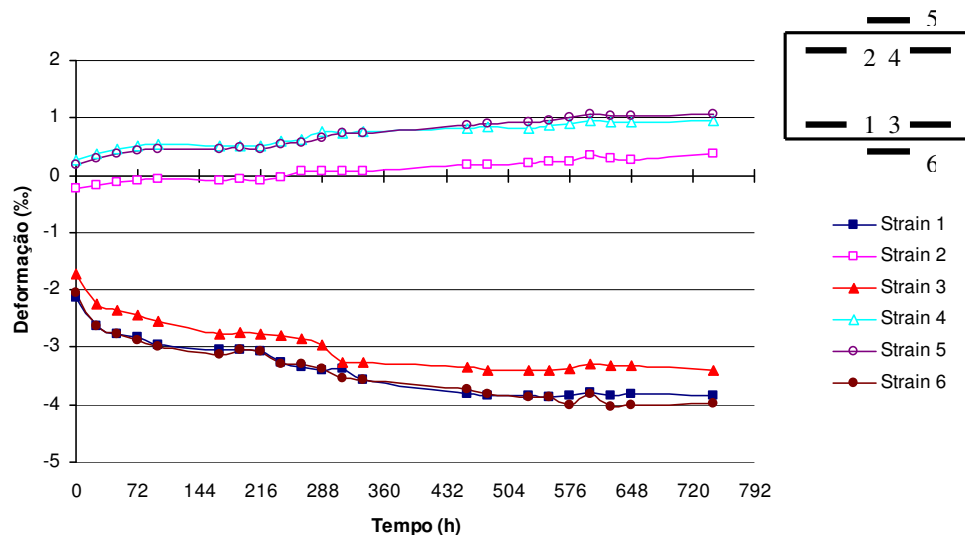


Figura 4.7 – Deformações no pilar E1,5-p4%.

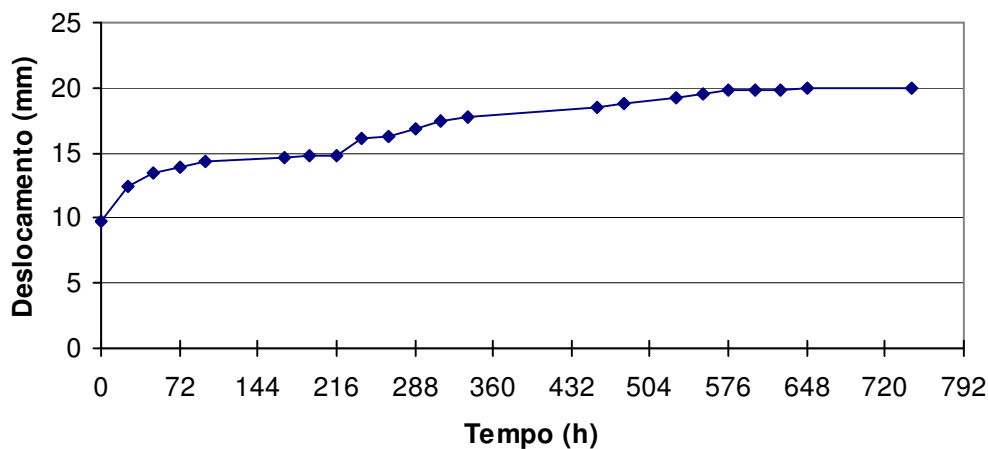


Figura 4.8 – Evolução do deslocamento transversal (flecha) no pilar E1,5-p4%.

Pilar E2,0-p4% - 490 kN

A idade do pilar no início do ensaio era de 201 dias e a aplicação da carga durou 40 minutos. As primeiras fissuras foram observadas logo após o término do carregamento.

Neste ensaio, o extensômetro 4 passou a apresentar problemas após 300 horas e seus valores devem ser desconsiderados.

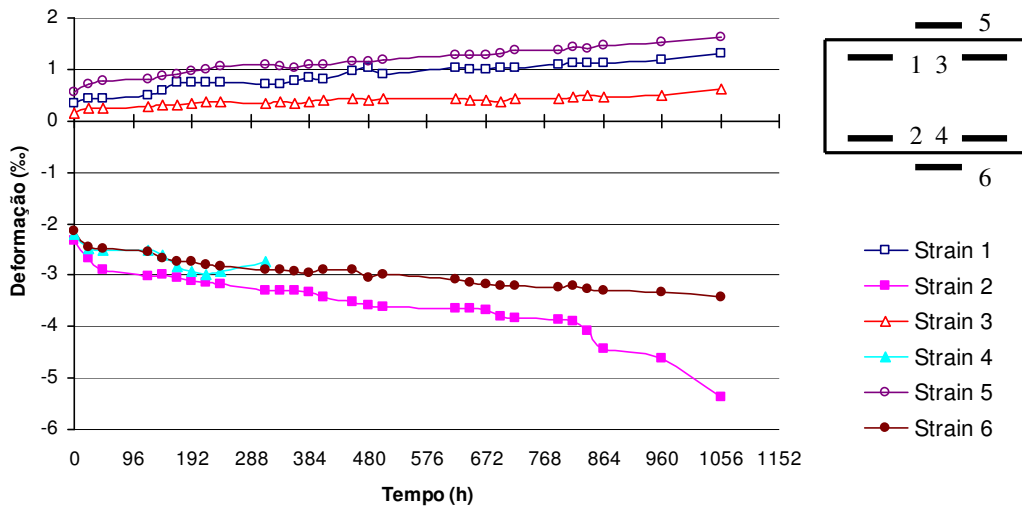


Figura 4.9 – Deformações no pilar E2,0-p4%.

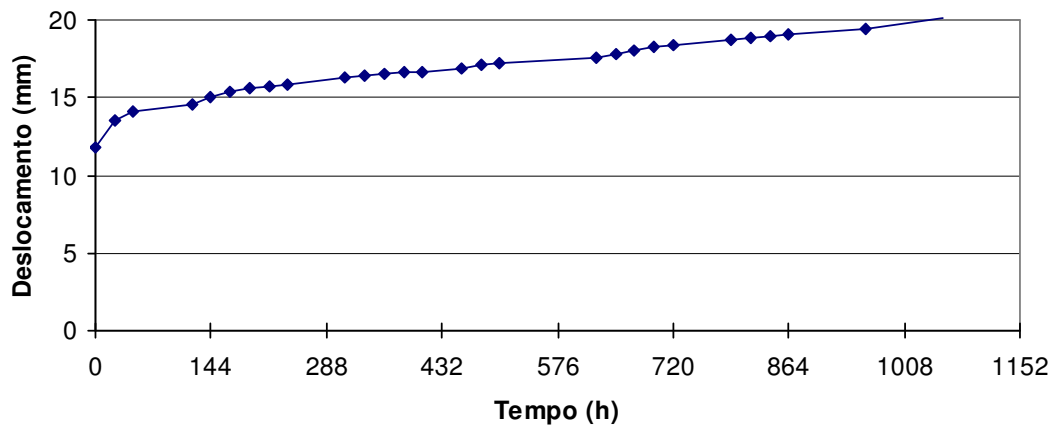


Figura 4.10 – Evolução do deslocamento transversal (flecha) no pilar E2,0-p4%.

Pilar 2,5-p4% - 460 kN

O ensaio do pilar foi iniciado aos 195 dias de idade, com tempo de aplicação da carga de 35 minutos até atingir a carga de 460 kN. As primeiras fissuras foram observadas logo após o término da aplicação da carga.

Os extensômetros 1 e 3 não funcionaram adequadamente neste pilar.

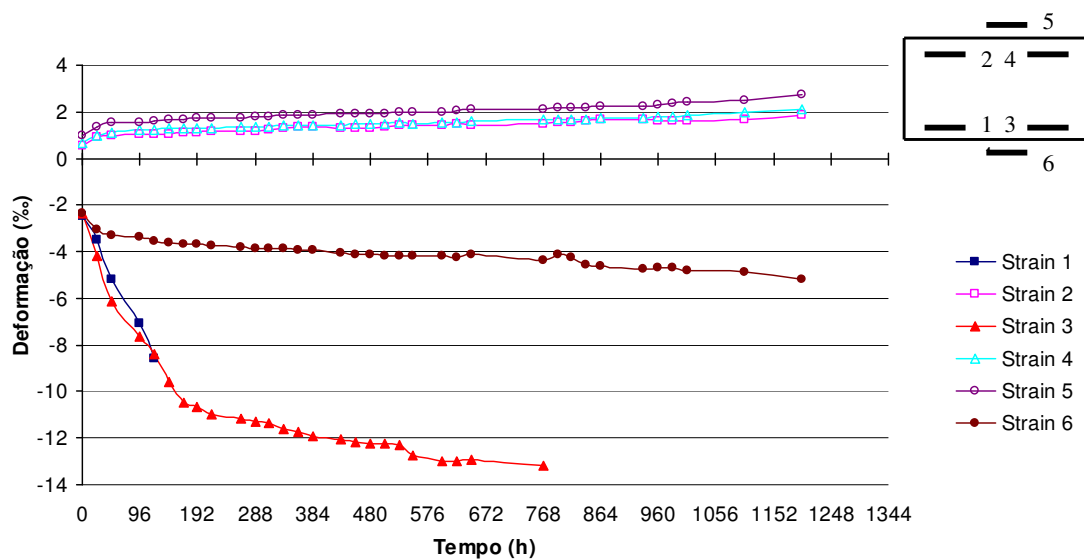


Figura 4.11 – Deformações no pilar E2,5-p4%.

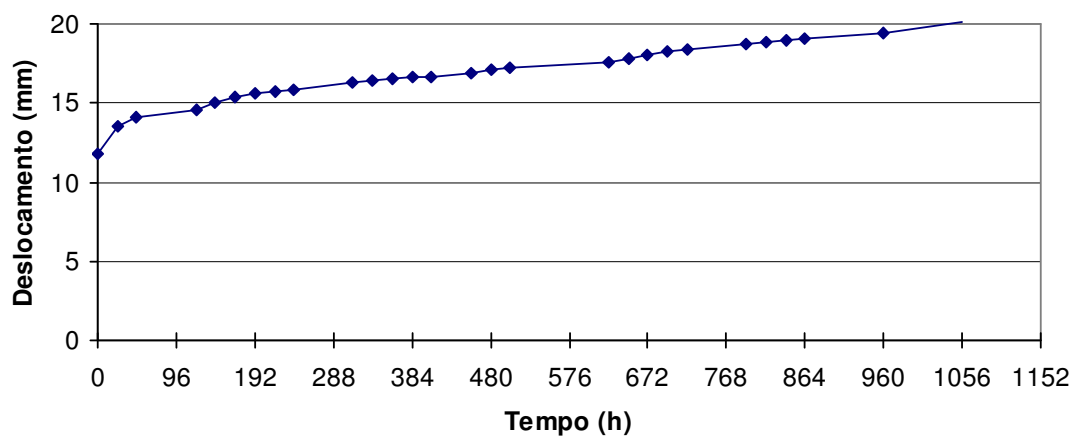


Figura 4.12 – Evolução do deslocamento transversal (flecha) no pilar E2,5-p4%.

4.2.
Influência da Excentricidade

A Figura 4.13 mostra o aumento da excentricidade de 2ª ordem e_2 nos pilares com taxa de armadura $\rho = 0,4\%$. Ao contrário do que se poderia esperar, a excentricidade e_2 cresceu mais rapidamente no pilar com excentricidade de primeira ordem e_1 igual a 2 cm (Pilar E2,0- $\rho 0,4\%$) do que no pilar com $e_1 = 2,5$ cm. Nos pilares com $\rho = 4\%$ (Fig. 4.14), por outro lado, o maior crescimento na excentricidade e_2 foi observado no pilar com a maior excentricidade e_1 (Pilar E2,5- $\rho 4\%$). Os resultados do pilar E1,5- $\rho 0,4\%$ forma desconsiderados.

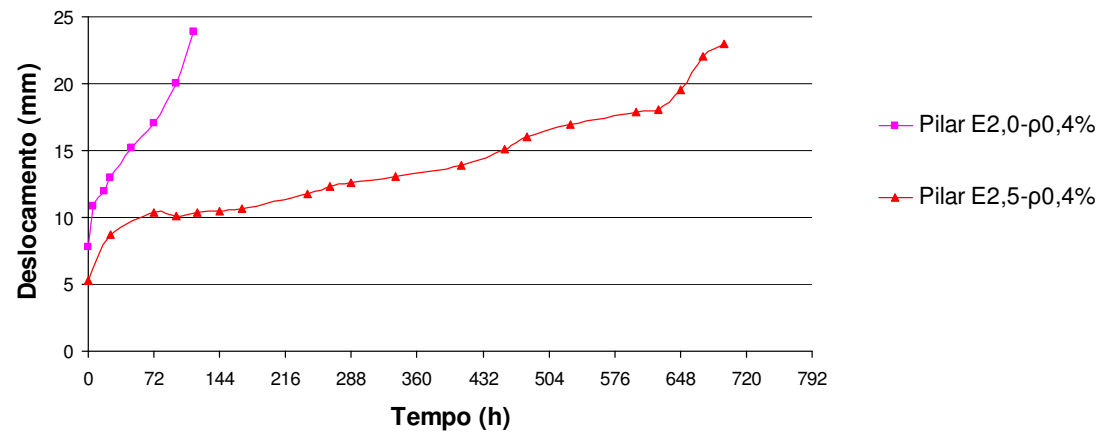


Figura 4.13 – Influência da excentricidade na flecha dos pilares com taxa de armadura $\rho=0,4\%$.

Tabela 4.1 – Comparação dos resultados dos pilares com taxa de armadura $\rho=0,4\%$.

	Pilar E1,5- $\rho 0,4\%$	Pilar E2,0- $\rho 0,4\%$	Pilar E2,5- $\rho 0,4\%$
Carga aplicada	290kN	260kN	240kN
Idade de carregamento	166 dias	185 dias	189 dias
Tempo para carregar	45 min	55 min	20 min
Flecha em t =0	7,92 mm	7,81 mm	5,28 mm
Início da fissuração	72 h	40 h	24 h
Deformação inferior em t = 0	1,36 ‰	1,515 ‰	1,19 ‰
Deformação superior em t = 0	0,132 ‰	0,325 ‰	0,276 ‰

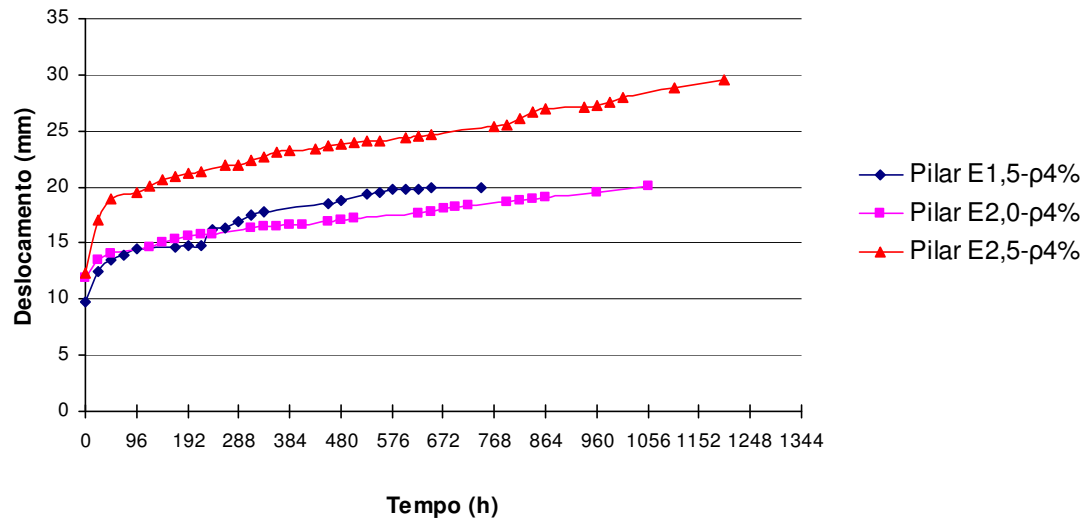


Figura 4.14 – Influência da excentricidade na flecha dos pilares com taxa de armadura $\rho=4\%$.

Tabela 4.2 – Comparação dos resultados dos pilares com taxa de armadura $\rho=4\%$.

	Pilar E1,5- $\rho 4\%$	Pilar E2,0- $\rho 4\%$	Pilar E2,5- $\rho 4\%$
Carga aplicada	530kN	490kN	460kN
Idade de carregamento	206 dias	201 dias	195 dias
Tempo para carregar	20 min.	40 min.	35 min.
Flecha em t = 0	9,75 mm	11,84 mm	12,39 mm
Flecha em t = 624 h	19,85 mm	17,63 mm	24,53 mm
Início da fissuração	48 h	instantânea	instantânea
Deformação inferior em t = 0	2,056 ‰	2,154 ‰	2,362 ‰
Deformação superior em t = 0	0,18 ‰	0,566 ‰	0,985 ‰
Deformação inferior em t = 624 h	-4,035	-3,090	-4,224
Deformação superior em t = 624 h	1,033	1,292	2,041

Nesta comparação observar-se um comportamento diferente entre os grupos de pilares com taxas de armaduras diferentes, as flechas iniciais para os pilares com $\rho = 0,4\%$ diminuiram com o aumento da excentricidades do carregamento, e para os pilares com $\rho = 4\%$ ocorreu o inverso, a flecha inicial aumentou com o aumento da excentricidade do carregamento.

4.3.
Influência da taxa de armadura

A comparação entre os resultados obtidos nos ensaios dos pilares com mesma excentricidade inicial e taxas de armadura de 0,4% e 4%, é feita nas Figuras 4.15 a 4.17 e nas Tabelas 4.3 a 4.5. Com exceção do pilar E1,5-p0,4 (Fig. 4.15), cujos resultados não devem ser considerados, como já mencionado anteriormente, observa-se que a taxa de crescimento do deslocamento transversal (flecha) é maior nos pilares com menor taxa de armadura, como era de se esperar.

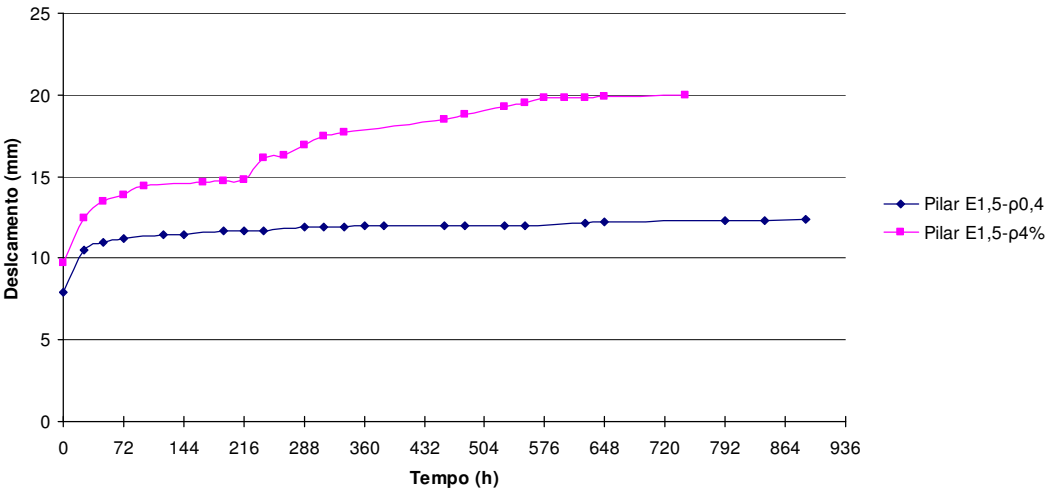


Figura 4.15 – Influência da taxa de armadura nas flechas dos pilares com excentricidade de 1ª ordem de 1,5 cm.

Tabela 4.3 – Resultados dos pilares com excentricidade de 1ª ordem de 1,5 cm.

	Pilar E1,5-p0,4%	Pilar E1,5-p4%
Carga aplicada	290kN	530kN
Idade de carregamento	166 dias	206 dias
Tempo para carregar	45 min.	20 min.
Flecha instantânea em t = 0	7,92 mm	9,75 mm
Flecha em t = 192 h	11,64 mm	14,73 mm
Início da fissuração	72 h	48 h
Deformação inferior em t = 0	1,36 ‰	2,056 ‰
Deformação superior em t = 0	0,132 ‰	0,18 ‰
Deformação inferior em t = 192 h	1,924 ‰	3,049 ‰
Deformação superior em t = 192 h	0,425 ‰	0,478 ‰

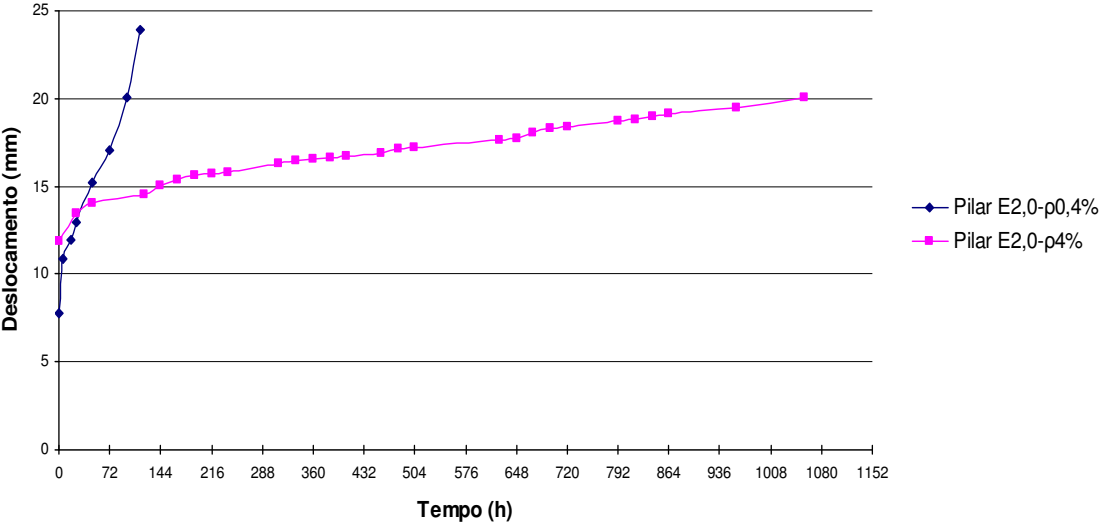


Figura 4.16 – Influência da taxa de armadura nas flechas dos pilares com excentricidade de 1ª ordem de 2,0 cm.

Tabela 4.3 – Resultados dos pilares com excentricidade de 1ª ordem de 2,0 cm.

	Pilar E2,0-p0,4%	Pilar E2,0-p4%
Carga aplicada	260 kN	490 kN
Idade de carregamento	185 dias	201 dias
Tempo para carregar	55 min.	40 min.
Flecha em t = 0	7,81 mm	11,84 mm
Flecha em t = 48 h	15,18 mm	14,06 mm
Início da fissuração	40 h	instantânea
Deformação inferior em t = 0	1,515 ‰	2,154 ‰
Deformação superior em t = 0	0,325 ‰	0,566 ‰
Deformação inferior em t = 48 h	2,562 ‰	2,494 ‰
Deformação superior em t = 48 h	1,142 ‰	0,762 ‰

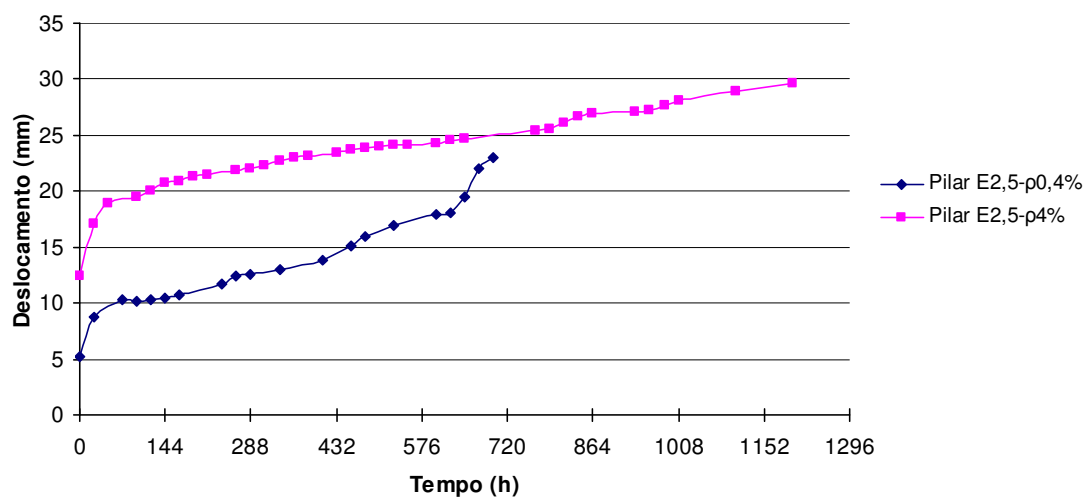


Figura 4.17 – Influência da taxa de armadura nas flechas dos pilares com excentricidade de 1ª ordem de 2,5 cm.

Tabela 4.4 – Resultados dos pilares com excentricidade de 1ª ordem de 2,5 cm.

	Pilar E2,5- ρ 0,4%	Pilar E2,5- ρ 4%
Carga aplicada	240 kN	460 kN
Idade de carregamento	189 dias	195 dias
Tempo para carregar	55 min.	40 min.
Flecha instantânea	5,28 mm	12,39 mm
Flecha em t = 120 h	10,34 mm	20,06 mm
Início da fissuração	instantânea	instantânea
Deformação inferior em t = 0	1,19 ‰	2,362 ‰
Deformação superior em t = 0	0,276 ‰	0,985 ‰
Deformação inferior em t = 120 h	1,567 ‰	3,528 ‰
Deformação superior em t = 120 h	0,327 ‰	1,601 ‰

Os pilares do grupo com $\rho = 4\%$ apresentaram flechas instantâneas e flechas e_2 ao longo do tempo maiores do que os pilares do grupo com $\rho = 0,4\%$, devido aos momentos de 1ª e 2ª ordens maiores do que os pilares do grupo com $\rho = 0,4\%$ provocados por maiores carregamentos.

Tabela 4.5 – Resultados gerais obtidos nos ensaios.

	E1,5-p0,4%	E2,0-p0,4%	E2,5-p0,4%	E1,5-p4%	E2,0-p4%	E2,5-p4%
Carga aplicada (kN)	290	260	240	530	490	460
Idade de carregamento (dias)	166	185	189	206	201	195
Tempo para carregar (min)	45	55	20	20	40	35
Flecha instantânea em t = 0 (mm)	7,92	7,81	5,28	9,75	11,84	12,39
Deformação inferior em t = 0 (‰)	- 1,36	- 1,515	- 1,19	- 2,056	- 2,154	- 2,362
Deformação superior em t = 0 (‰)	0,147	0,325	0,276	- 0,224	0,566	0,985
Início da fissuração (h)	72	40	24	48	instantâneo	instantâneo
Idade de ruptura (dias)	-	5	29	-	-	-
Deformação inferior na ruptura ‰	-	- 3,515	- 2,985	-	-	-
Deformação superior na ruptura ‰	-	2,507	2,554	-	-	-
Flecha na ruptura (mm)	-	23,93	22,97	-	-	-

- Comparação com resultados analíticos

O processo analítico aqui apresentado adota as seguintes hipóteses:

- o coeficiente de fluência independe da intensidade da tensão aplicada;
- a relação tensão-deformação específica do concreto é representada pelo diagrama parábola-retângulo da NBR6118;
- o efeito da fluência é levado em conta por meio de uma transformação afim do diagrama tensão-deformação específica, com os valores das deformações deslocando-se de $\phi \varepsilon_{cc}$ como mostra a Figura 2.16 (ver, p.e., Fusco [30]), onde $\phi = \varepsilon_{cc} / \varepsilon_c$ é o coeficiente de fluência, ε_c é a deformação específica imediata e ε_{cc} é deformação específica de fluência;
- a deformada do pilar é descrita por uma função senoidal e, como consequência, a amplitude máxima (excentricidade máxima de 2ª ordem) é dada por

$$e_2 = \frac{l_e^2}{10} \frac{1}{r} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde $1/r$ é a curvatura, dada por

$$\left(\frac{1}{r} \right)_{total} = \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_{c,total}}{d} = \frac{\varepsilon_s + (1 + \phi) \varepsilon_c}{d} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

onde ε_s é a deformação específica na armadura tracionada (grande excentricidade) ou menos comprimida (pequena excentricidade).

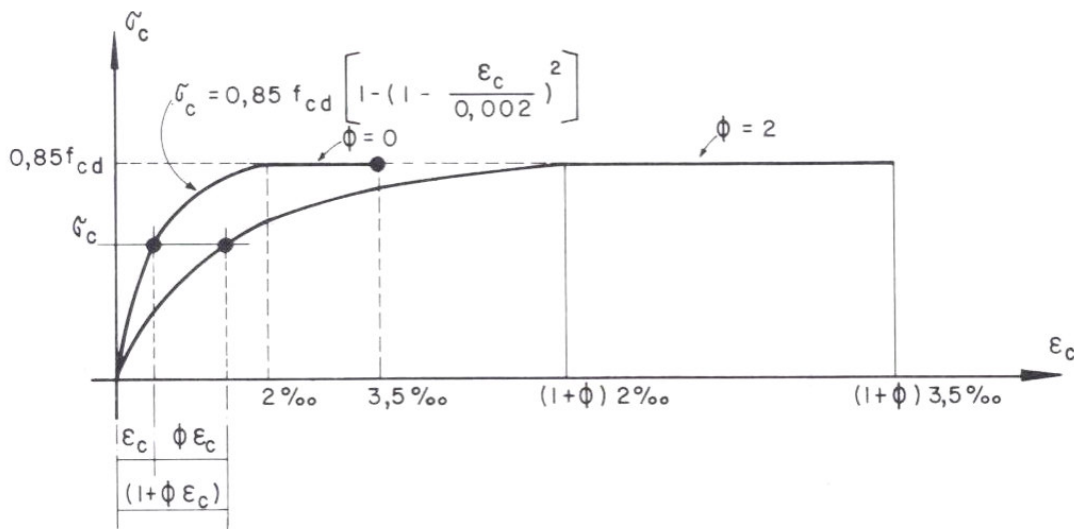


Figura 4.18 – Diagrama tensão-deformação específica do concreto considerando a fluência.

O processo envolve os seguintes passos:

1º Passo

Dada a carga aplicada e sua excentricidade, calculam-se as deformações específicas imediatas ϵ_s e ϵ_c (tomando-se $\phi = 0$). Esse cálculo é realizado empregando-se a rotina de cálculo feita no programa Mathcad, considerando-se a não linearidade física do material.

Caso de flexo-compressão com pequena excentricidade

FLEXÃO COMPOSTA RETA - Pequena excentricidade - Análise não linear de tensões

$f_c := 4.94 \text{ kN/cm}^2$	Arm. comp.	$A1_s := 3.75 \text{ cm}^2$	$N := 530 \text{ kN}$	(Aplicada no cg da seção)
$d1 := 1.25 \text{ cm}$	Arm. trac.	$A_s := 3.75 \text{ cm}^2$	$e := 2.364$	$e =$ excentricidade da carga ao cg
$d := 11.25 \text{ cm}$		$E_s := 21 \text{ kN/cm}^2$	$M := N \cdot e$	kN.cm
$b := 15 \text{ cm}$		$f_{yd} := 43.5 \text{ kN/cm}^2$	$\phi := 0$	$\phi =$ coeficiente de fluência

$$\begin{aligned}
 x &:= 15 & \epsilon_c &:= 2 & \epsilon_s &:= 0.5 & \epsilon1_s &:= 1.1 & h &:= d + d1 & \epsilon_{yd} &:= \frac{f_{yd}}{E_s} & \epsilon_{yd} &= 2.071 \\
 \sigma_s(\epsilon_s) &:= \begin{cases} \epsilon_s \cdot E_s & \text{if } \epsilon_s \leq \epsilon_{yd} \\ f_{yd} & \text{if } \epsilon_s > \epsilon_{yd} \end{cases} & \sigma_c(y, \epsilon_c, x) &:= \begin{cases} \frac{0.8f_c}{4} \cdot \left[4 \cdot \frac{\epsilon_c}{(1+\phi) \cdot x} \cdot y - \frac{\epsilon_c^2}{(1+\phi)^2 \cdot x^2} \cdot y^2 \right] & \text{if } \frac{(1+\phi) \cdot \epsilon_c}{x} \cdot y \leq (1+\phi) \cdot 2 \\ 0.8f_c & \text{if } \frac{(1+\phi) \cdot \epsilon_c}{x} \cdot y > (1+\phi) \cdot 2 \end{cases} \\
 \sigma1_s(\epsilon1_s) &:= \begin{cases} \epsilon1_s \cdot E_s & \text{if } \epsilon1_s \leq \epsilon_{yd} \\ f_{yd} & \text{if } \epsilon1_s > \epsilon_{yd} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Given

$$\begin{aligned}
 \int_{x-h}^x \sigma_c(y, \epsilon_c, x) \cdot b \cdot dy + A1_s \sigma1_s(\epsilon1_s) + A_s \cdot \sigma_s(\epsilon_s) &= N & (1+\phi) \cdot \epsilon_c &= \frac{x}{x-d} \cdot \epsilon_s \\
 \int_{x-h}^x \sigma_c(y, \epsilon_c, x) \cdot b \cdot (y-x+d) \cdot dy + A1_s \sigma1_s(\epsilon1_s) \cdot (d-d1) &= N \cdot \left(\frac{d-d1}{2} \right) + M & x &= \frac{(1+\phi) \cdot \epsilon_c \cdot d1}{\epsilon_c - \epsilon1_s}
 \end{aligned}$$

$$\text{vec} := \text{Find}(x, \epsilon_c, \epsilon_s, \epsilon1_s)$$

Resultado

$$\text{vec} = \begin{pmatrix} 12.18 \\ 1.441 \\ 0.11 \\ 1.293 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{ll} x := \text{vec}_0 & x = 12.18 \\ \epsilon_c := \text{vec}_1 & \epsilon_c = 1.441 \\ \epsilon_s := \text{vec}_2 & \epsilon_s = 0.11 \\ \epsilon1_s := \text{vec}_3 & \epsilon1_s = 1.293 \end{array}$$

Caso de flexo-compressão com grande excentricidade

FLEXÃO COMPOSTA RETA - Grande excentricidade - Análise não linear de tensão:

$$\begin{array}{llll}
 f_c := 4.12 \text{ kN/cm}^2 & \text{Arm. comp.} & A_{l_s} := 0.38 \text{ cm}^2 & N := 240 \text{ kN} \\
 d_l := 1.25 \text{ cm} & \text{Arm. trac.} & A_s := 0.38 \text{ cm}^2 & e_s := 7.5 \text{ cm} \\
 d := 11.25 \text{ cm} & & E_s := 21 \text{ kN/cm}^2 & e_s = \text{excentricidade em relação a } A \\
 b := 15 \text{ cm} & h := d + d_l & f_{yd} := 43.5 \text{ kN/cm}^2 &
 \end{array}$$

$$x := 5 \quad \epsilon_c := 1.2 \quad \epsilon_s := 0.5 \quad \epsilon_{l_s} := 1.1 \quad \epsilon_{yd} := \frac{f_{yd}}{E_s} \quad \epsilon_{yd} = 2.071$$

$$\sigma_s(\epsilon_s) := \begin{cases} (\epsilon_s) \cdot E_s & \text{if } \epsilon_s \leq \epsilon_{yd} \\ f_{yd} & \text{if } \epsilon_s > \epsilon_{yd} \end{cases} \quad \sigma_c(y, \epsilon_c, x) := \begin{cases} \frac{0.85f_c}{4} \cdot \left[4 \frac{\epsilon_c}{x} \cdot y - \frac{(\epsilon_c)^2}{x^2} \cdot y^2 \right] & \text{if } \frac{\epsilon_c}{x} \cdot y \leq 2 \\ 0.85f_c & \text{if } \frac{\epsilon_c}{x} \cdot y > 2 \end{cases}$$

Given

$$\int_0^x \sigma_c(y, \epsilon_c, x) \cdot b \, dy + A_{l_s} \sigma_{l_s}(\epsilon_{l_s}) = A_s \cdot \sigma_s(\epsilon_s) + N \quad \epsilon_c = \frac{x}{d-x} \cdot \epsilon_s$$

$$\int_0^x \sigma_c(y, \epsilon_c, x) \cdot b \cdot (d-x+y) \, dy + A_{l_s} \sigma_{l_s}(\epsilon_{l_s}) \cdot (d-d_l) = N \cdot e_s \quad x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c - \epsilon_{l_s}} \cdot d_l$$

$$\text{vec} := \text{Find}(x, \epsilon_c, \epsilon_s, \epsilon_{l_s})$$

$$\text{Resultado} \quad \text{vec} = \begin{pmatrix} 10.963 \\ 0.966 \\ 0.025 \\ 0.856 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{ll} x := \text{vec}_0 & x = 10.963 \\ \epsilon_c := \text{vec}_1 & \epsilon_c = 0.966 \\ \epsilon_s := \text{vec}_2 & \epsilon_s = 0.025 \\ \epsilon_{l_s} := \text{vec}_3 & \epsilon_{l_s} = 0.856 \end{array}$$

2º Passo

Com os valores das deformações específica ϵ_c e ϵ_s obtidos no passo anterior, calcula-se a excentricidade e_2 pela Eq. 4.1. Esta é a excentricidade imediata correspondente ao tempo $t = 0$.

3º Passo

Para um dado tempo t obtém-se o valor do coeficiente de fluência ϕ de acordo o método da NBR6118:2003, descrito no capítulo 2, seção 2.11, novos valores de ϵ_c e ϵ_s são calculados empregando-se as mesmas rotinas apresentadas no 1º passo.

4º Passo

Repete-se o passo 2 para se obter a excentricidade no tempo t do passo anterior.

A comparação entre os valores experimentais e teóricos calculados pelo processo descrito acima, das deformações específicas ε_c e das excentricidades e_2 é mostrada nas Figuras 4.19 a 4.23 e nas Figuras 4.24 a 4.28, respectivamente.

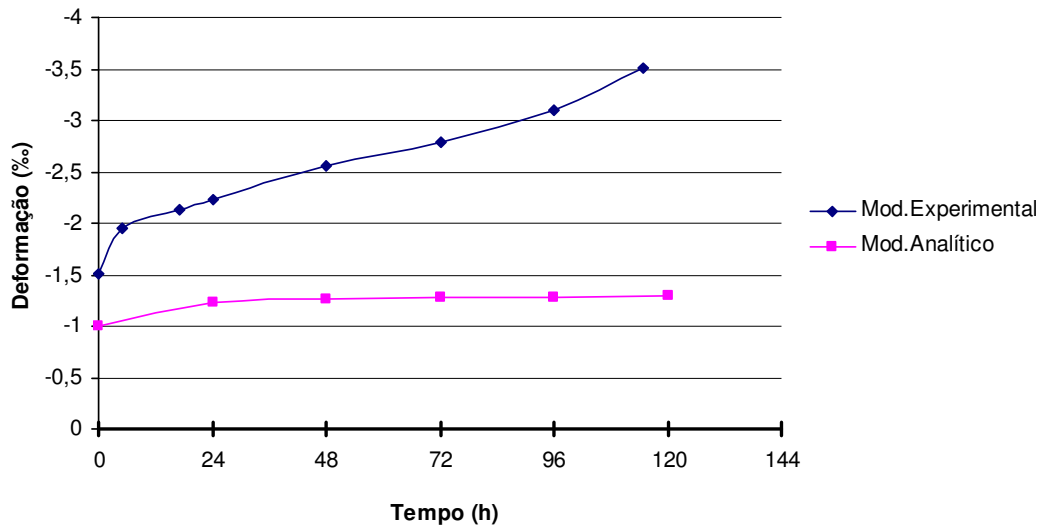


Figura 4.19 – Deformações específicas ε_c teóricas e experimentais no pilar E2,0-p0,4%.

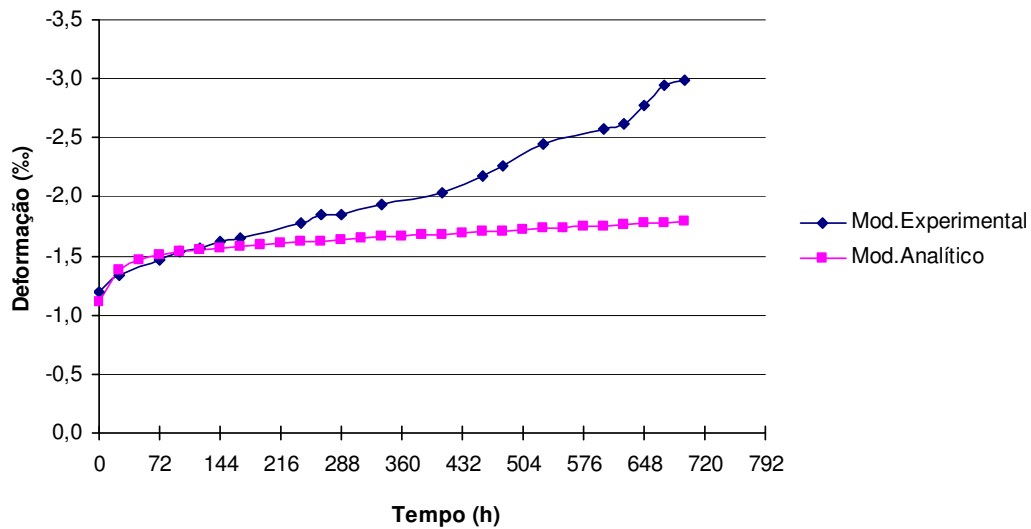


Figura 4.20 – Deformações específicas ε_c teóricas e experimentais no pilar E2,5-p0,4%

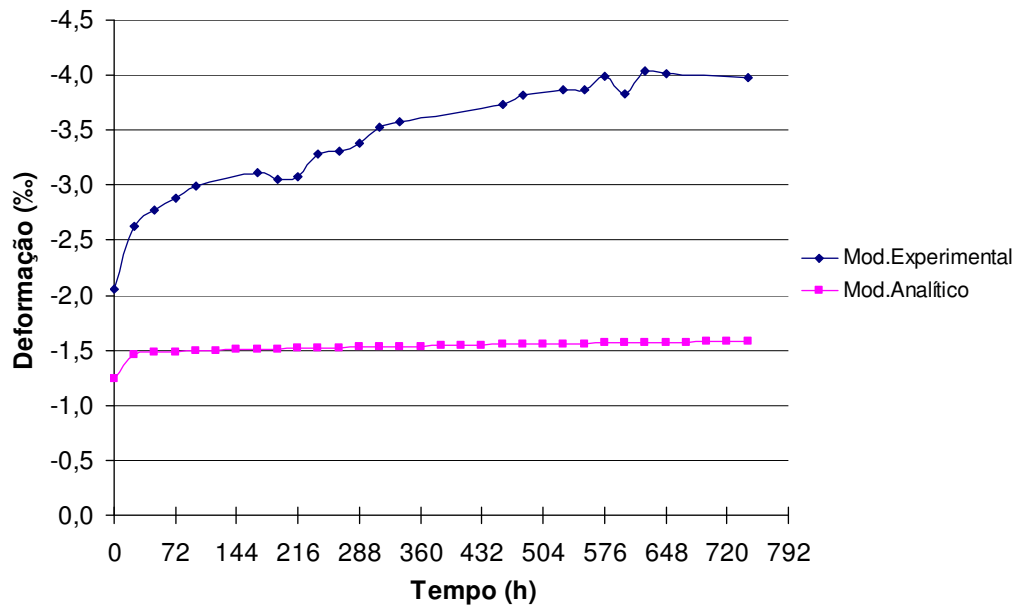


Figura 4.21 – Deformações específicas ε_c teóricas e experimentais no pilar E1,5-p4%.

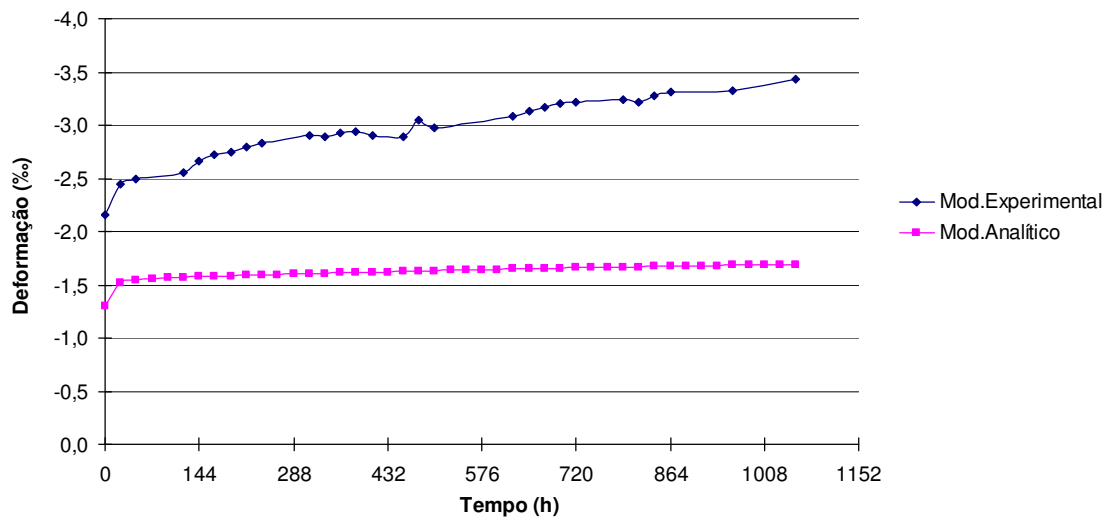


Figura 4.22 – Deformações específicas ε_c teóricas e experimentais no pilar E2,0-p4%.

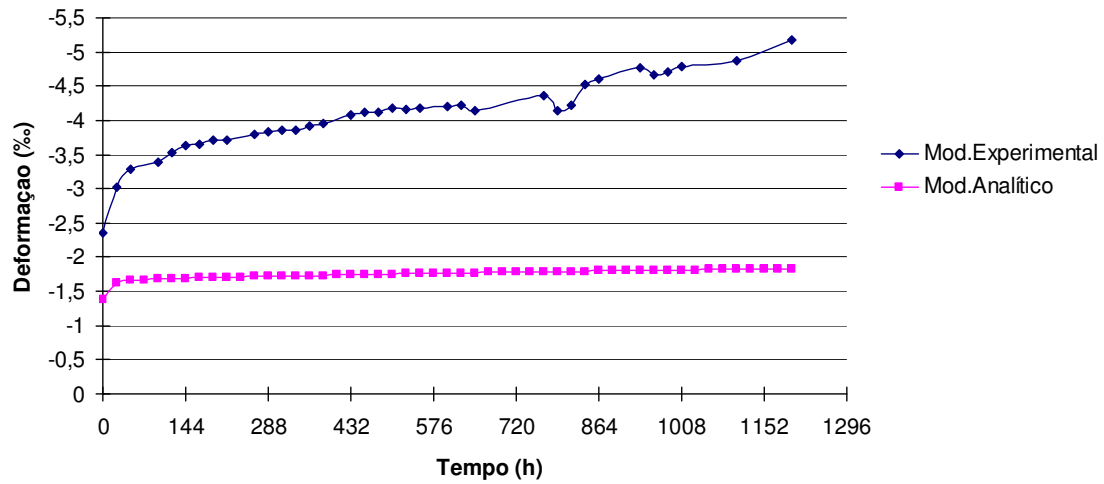


Figura 4.23 – Deformações específicas ε_c teóricas e experimentais no pilar E2,5-p4%.

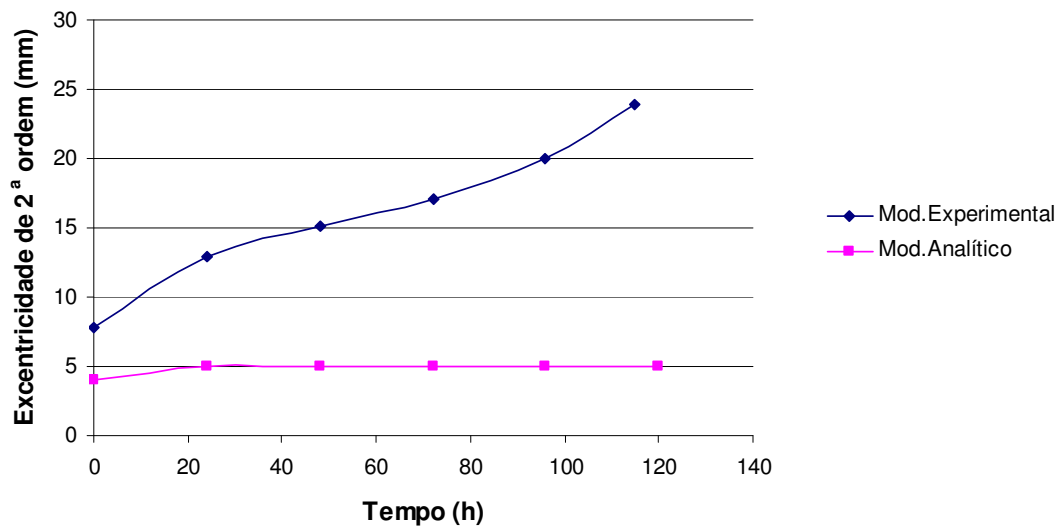


Figura 4.24 – Excentricidades e_2 teóricas e experimentais no pilar E2,0-p0,4%.

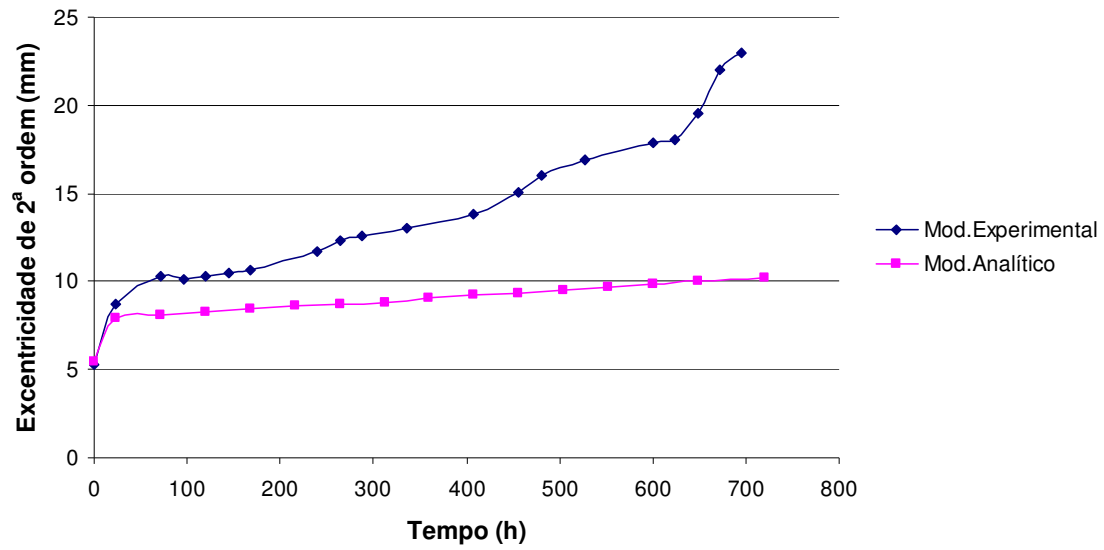


Figura 4.25 – Excentricidades e_2 teóricas e experimentais no pilar E2,5-p0,4%.

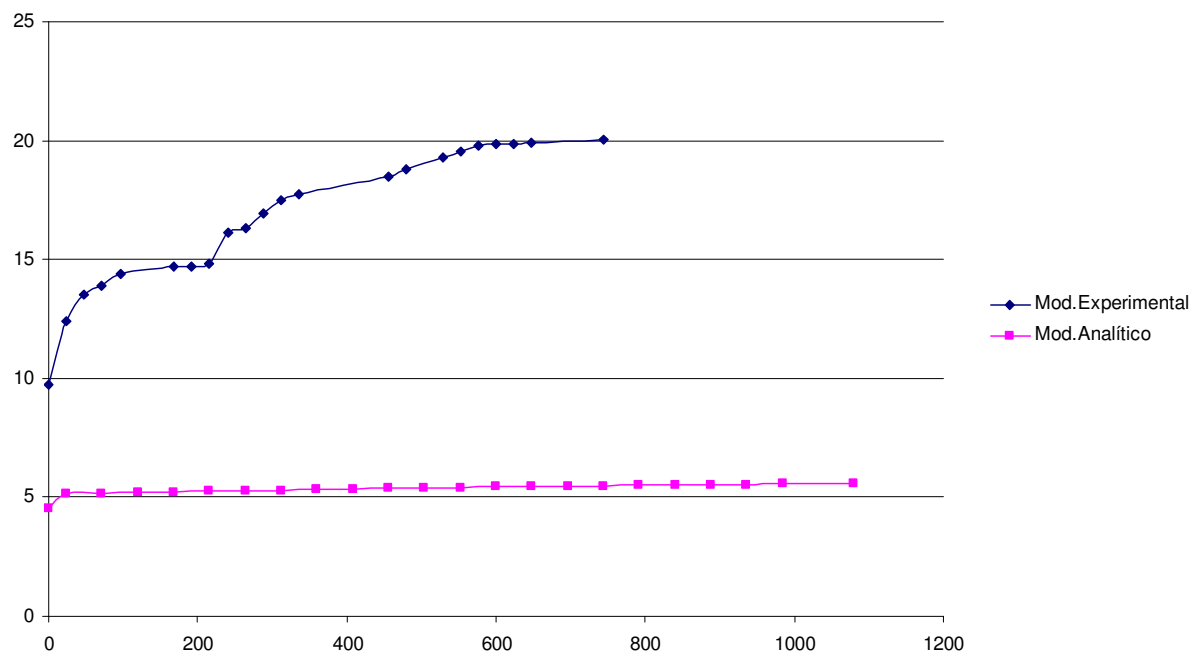


Figura 4.26 – Excentricidades e_2 teóricas e experimentais no pilar E1,5-p4%.

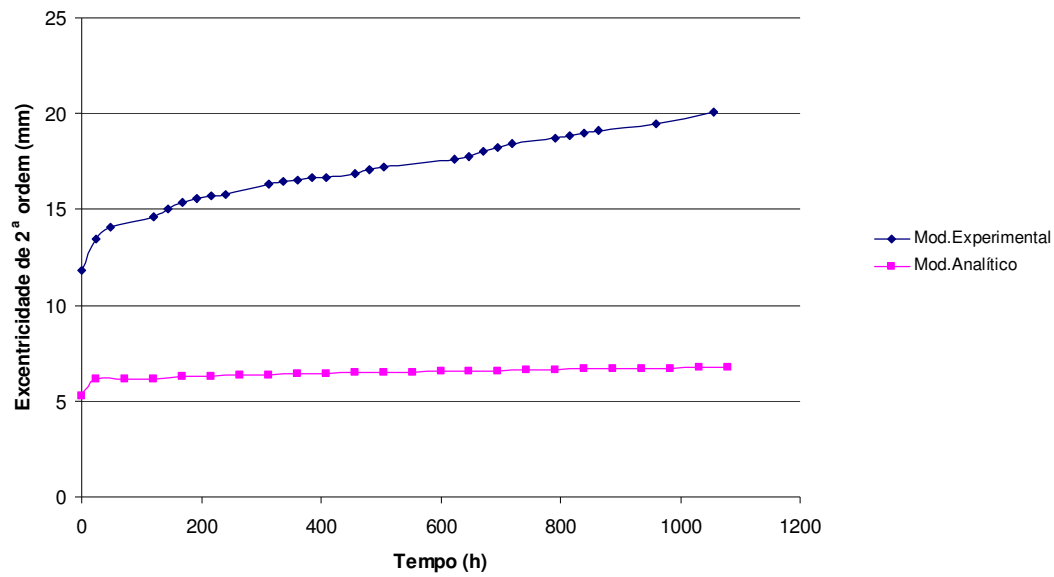


Figura 4.27 – Excentricidades e_2 teóricas e experimentais no pilar E2,0-p4%.

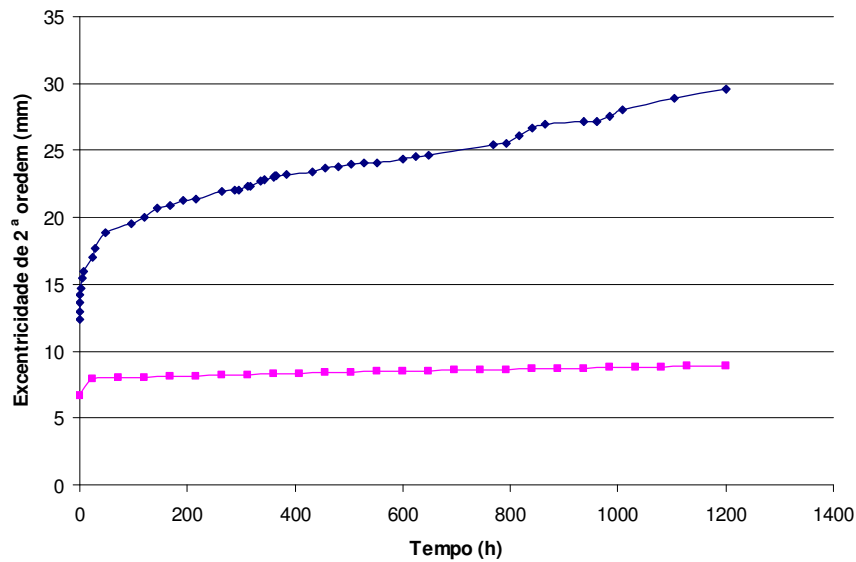


Figura 4.28 – Excentricidades e_2 teóricas e experimentais no pilar E2,5-p4%.

Tabela 4.6 – Resultados gerais obtidos pelo processo analítico.

	Deformação Instantânea em $t = 0$		Deformação Final	
Pilares	ϵ_c	ϵ_s	ϵ_c	ϵ_s
E1,5-p0,4%	- 1,02 ‰	- 0,143 ‰	- 1,403 ‰	- 0,216 ‰
E2,0-p0,4%	- 1,03 ‰	- 0,047 ‰	- 1,297 ‰	- 0,046 ‰
E2,5-p0,4%	- 1,175 ‰	0,228 ‰	- 1,819 ‰	0,797 ‰
E1,5-p4%	- 1,325 ‰	- 0,213 ‰	- 1,7 ‰	- 0,32 ‰
E2,0-p4%	- 1,389 ‰	- 0,285 ‰	- 1,791 ‰	- 0,12 ‰
E2,5-p4%	- 1,54 ‰	0,111 ‰	- 1,999 ‰	0,199 ‰

- Comparação com o processo da NBR 6118/2003

São comparadas as deformações específicas ϵ_c obtidas experimentalmente e as obtidas pelo modelo da NBR 6118:2003, apesar desta consideração ser obrigatória somente para pilares com esbeltez $\lambda = l_e / i \geq 90$.

Os cálculos foram feitos de modo iterativo considerando-se a excentricidade de segunda ordem e o efeito da fluência.

- 1º Passo:

Os dados iniciais são colocados em uma rotina de cálculo feita no programa Mathcad, considerando-se a não linearidade física do material.

FLEXÃO COMPOSTA RETA - Pequena excentricidade - Análise não linear de tensões

$f_c := 4.94 \text{ kN/cm}^2$	Arm. comp.	$A_{l_s} := 3.75 \text{ cm}^2$	$N := 530 \text{ kN}$	(Aplicada no cg da seção)
$d1 := 1.25 \text{ cm}$	Arm. trac.	$A_s := 3.75 \text{ cm}^2$	$e := 2.364$	$e = \text{excentricidade da carga ao cg}$
$d := 11.25 \text{ cm}$		$E_s := 21 \text{ kN/cm}^2$	$M := N \cdot e$	kN.cm
$b := 15 \text{ cm}$		$f_{yd} := 43.5 \text{ kN/cm}^2$	$\phi := 0$	$\phi = \text{coeficiente de fluência}$

$$\begin{aligned}
 x &:= 15 & \epsilon_c &:= 2 & \epsilon_s &:= 0.5 & \epsilon_{l_s} &:= 1.1 & h &:= d + d1 & \epsilon_{yd} &:= \frac{f_{yd}}{E_s} & \epsilon_{yd} &= 2.071 \\
 \sigma_s(\epsilon_s) &:= \begin{cases} \epsilon_s \cdot E_s & \text{if } \epsilon_s \leq \epsilon_{yd} \\ f_{yd} & \text{if } \epsilon_s > \epsilon_{yd} \end{cases} & \sigma_c(y, \epsilon_c, x) &:= \begin{cases} \frac{0.85 f_c}{4} \left[4 \frac{\epsilon_c}{(1+\phi) \cdot x} \cdot y - \frac{\epsilon_c^2}{(1+\phi)^2 \cdot x^2} \cdot y^2 \right] & \text{if } \frac{(1+\phi) \cdot \epsilon_c}{x} \cdot y \leq (1+\phi) \cdot 2 \\ 0.85 f_c & \text{if } \frac{(1+\phi) \cdot \epsilon_c}{x} \cdot y > (1+\phi) \cdot 2 \end{cases} \\
 \sigma_{l_s}(\epsilon_{l_s}) &:= \begin{cases} \epsilon_{l_s} \cdot E_s & \text{if } \epsilon_{l_s} \leq \epsilon_{yd} \\ f_{yd} & \text{if } \epsilon_{l_s} > \epsilon_{yd} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Given

$$\begin{aligned}
 \int_{x-h}^x \sigma_c(y, \epsilon_c, x) \cdot b \cdot dy + A_{l_s} \sigma_{l_s}(\epsilon_{l_s}) + A_s \cdot \sigma_s(\epsilon_s) &= N & (1+\phi) \cdot \epsilon_c &= \frac{x}{x-d} \cdot \epsilon_s \\
 \int_{x-h}^x \sigma_c(y, \epsilon_c, x) \cdot b \cdot (y-x+d) \cdot dy + A_{l_s} \sigma_{l_s}(\epsilon_{l_s}) \cdot (d-d1) &= N \cdot \left(\frac{d-d1}{2} \right) + M & x &= \frac{(1+\phi) \cdot \epsilon_c}{\epsilon_c - \epsilon_{l_s}} \cdot d1
 \end{aligned}$$

$$\text{vec} := \text{Find}(x, \epsilon_c, \epsilon_s, \epsilon_{l_s})$$

$$\text{Resultado} \quad \text{vec} = \begin{pmatrix} 12.18 \\ 1.441 \\ 0.11 \\ 1.293 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{ll} x := \text{vec}_0 & x = 12.18 \\ \epsilon_c := \text{vec}_1 & \epsilon_c = 1.441 \\ \epsilon_s := \text{vec}_2 & \epsilon_s = 0.11 \\ \epsilon_{l_s} := \text{vec}_3 & \epsilon_{l_s} = 1.293 \end{array}$$

- 2º Passo:

Obtém-se uma deformação inicial, e em seguida calcula-se a excentricidade de segunda ordem que é somada a excentricidade inicial:

$$e_2 = \frac{1}{r} \frac{l_e^2}{10} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

onde $1/r$ é a curvatura da peça.

- 3º Passo:

Calcular a excentricidade adicional devido fluência considerada pela norma:

$$e_{cc} = \left(\frac{M_{Sg}}{N_{Sg}} - e_a \right) (2,718^{\frac{\phi N_{Sg}}{N_e - N_{Sg}}} - 1) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde N_e é a carga da flambagem de Euler, M_{Sg} e N_{Sg} são os momentos e forças permanentes respectivamente, e e_a é a excentricidade accidental.

Sendo então:

$$e_T = e_1 + e_2 + e_{cc} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

- 4º Passo:

Repete-se esse processo até a idade para a qual a estrutura esta sendo considerada.

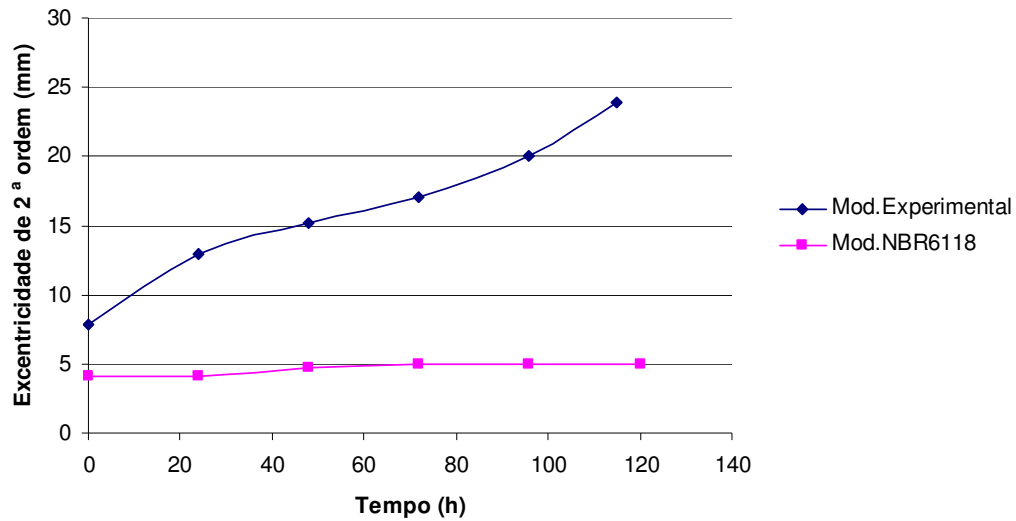


Figura 4.26 – Excentricidades e_2 experimentais e obtidas pelo processo da NBR6118 para o pilar E2,0-p0,4%.

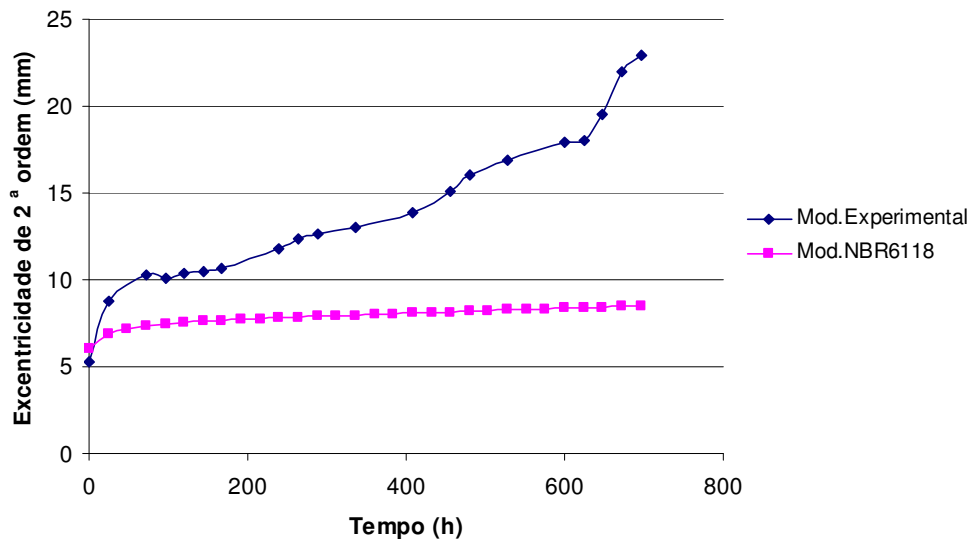


Figura 4.27 – Excentricidades e_2 experimentais e obtidas pelo processo da NBR6118 para o pilar E2,5-p0,4%.

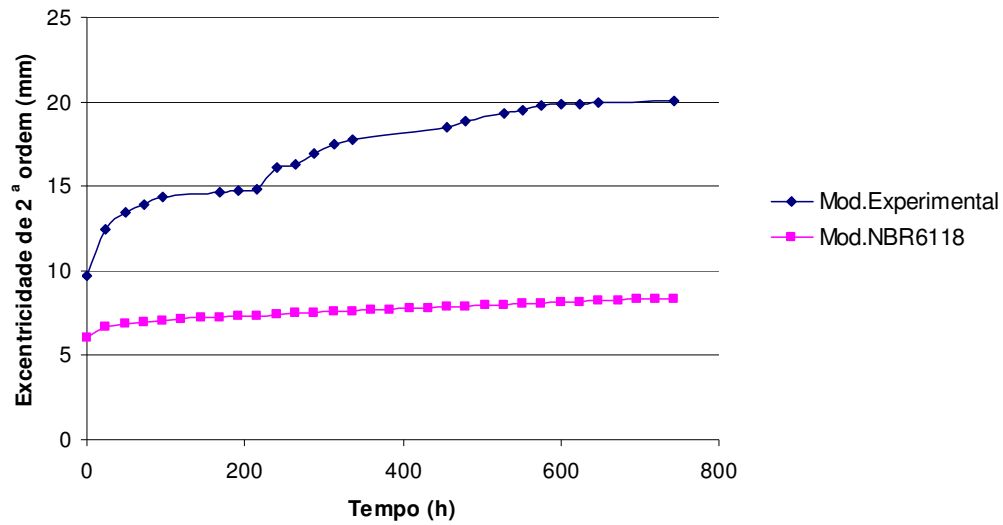


Figura 4.28 – Excentricidades e_2 experimentais e obtidas pelo processo da NBR6118 para o pilar E1,5-p4%.

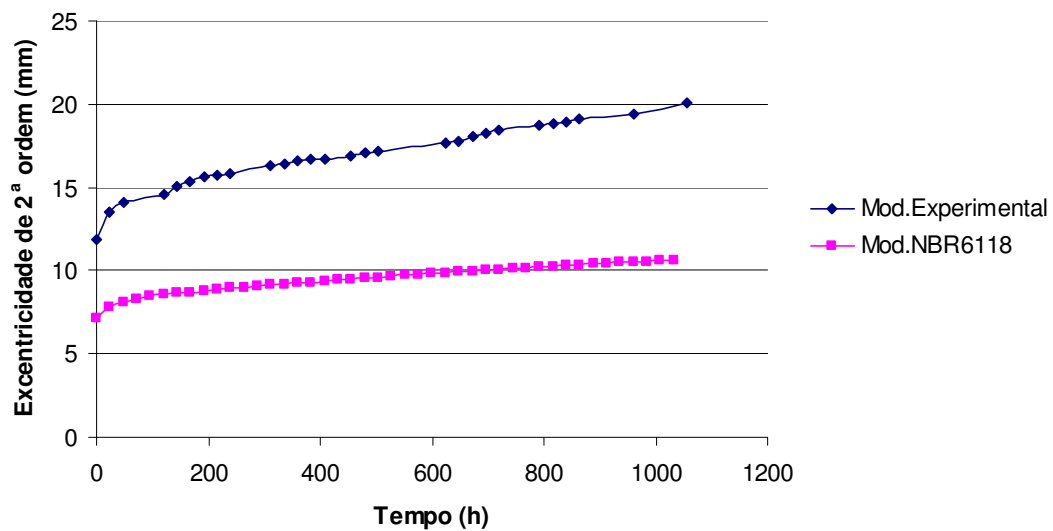


Figura 4.29 – Excentricidades e_2 experimentais e obtidas pelo processo da NBR6118 para o pilar E2,0-p4%.

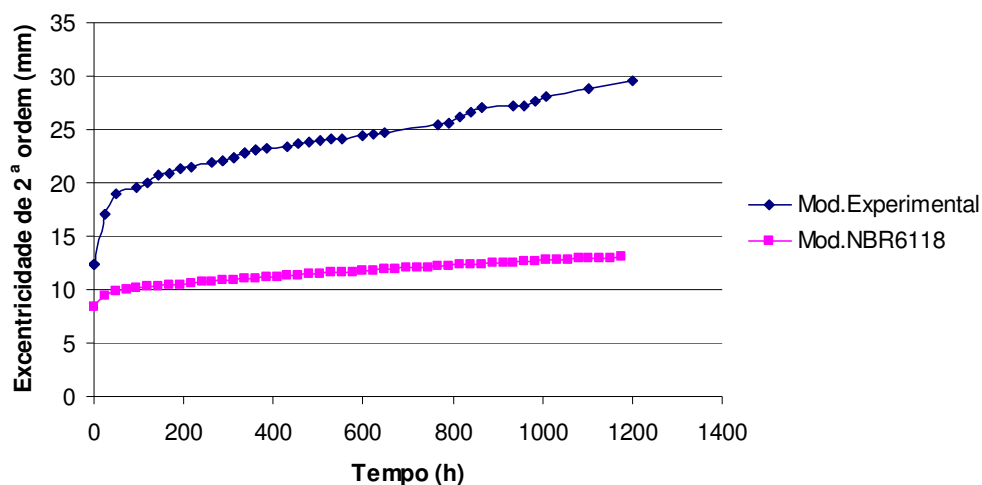


Figura 4.30 – Excentricidades e_2 experimentais e obtidas pelo processo da NBR6118 para o pilar E1,5-p4%.

Tabela 4.7 – Resultados gerais obtidos pelo modelo da NBR 6118/2003.

Pilares	Deformação Instantânea em $t = 0$		Deformação Final	
	ϵ_c	ϵ_s	ϵ_c	ϵ_s
E1,5-p0,4%	- 0,993 ‰	- 0,131 ‰	- 1,067 ‰	- 0,085 ‰
E2,0-p0,4%	- 1,005 ‰	- 0,029 ‰	- 1,096 ‰	0,052 ‰
E2,5-p0,4%	- 1,105 ‰	- 0,155 ‰	- 1,328 ‰	0,404 ‰
E1,5-p4%	- 1,244 ‰	- 0,227 ‰	- 1,441 ‰	- 0,11 ‰
E2,0-p4%	- 1,303 ‰	- 0,098 ‰	- 1,563 ‰	0,086 ‰
E2,5-p4%	- 1,388 ‰	0,043 ‰	- 1,743 ‰	0,336 ‰

De um modo geral, as deformações obtidas analiticamente foram menores do que as observadas nos ensaios. A principal razão dessa diferença reside no fato de que os modelos teóricos são válidos nos casos em que o nível de tensão no concreto é baixo, algo em torno de 50% da resistência. No presente estudo as tensões máximas no concreto ultrapassaram 80% da sua resistência.