

## Influência do efeito de confinamento na capacidade resistente de pilares mistos tubulares circulares

Thiago Damasceno Silva<sup>1\*</sup>, Tarniê Vilela Nunes Narques<sup>2</sup> e André Luis Christoforo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, damasceno.tds@gmail.com

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, tarnie.projetos@gmail.com

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, alchristoforo@ufscar.br

### Concrete confinement effect on filled composite steel and concrete columns

#### Resumo

Neste trabalho apresenta-se uma análise comparativa sobre a influência do efeito de confinamento do concreto em pilares mistos tubulares circulares, considerando as especificações técnicas propostas pelas normas de dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto ABNT NBR 8800:2008 e EN 1994-1-1 (Eurocode 4). O dimensionamento de um pilar misto tubular circular com esbelteza variável é desenvolvido, cuja força axial resistente de cálculo é obtida a partir dos procedimentos apresentados pelas duas normas, sendo verificada a contribuição na capacidade resistente possibilitada pelo modelo de confinamento do Eurocode 4. A partir da consideração do modelo de confinamento, maiores forças resistentes de compressão axial foram obtidas para pilares curtos, com esbelteza relativa inferior a 0,5, devido ao efeito de confinamento do concreto.

**Palavras-chave:** efeito de confinamento do concreto, pilares mistos tubulares, dimensionamento estrutural.

#### Abstract

*This work presents a comparative analysis on the influence of the concrete confinement effect on circular concrete-filled steel tube (CFST) columns, considering the technical specifications proposed by ABNT NBR 8800:2008 and EN 1994-1 (Eurocode 4). The design of a CFST column with variable slenderness is developed, whose resistance to compression is obtained from the procedures presented by both codes, and the contribution allowed by Eurocode 4 concrete confinement model is verified. With the consideration of the confinement model, higher resistances to compression were obtained for short columns, with a relative slenderness lower than 0.5, due to the confinement effect of the concrete.*

**Keywords:** concrete confinement effect, concrete filled columns, structural design.

\* autor correspondente

## 1 Introdução

Pilares mistos de aço e concreto são elementos estruturais formados por perfil de aço e concreto armado que trabalham conjuntamente. A classificação dos pilares mistos ocorre em função da distribuição do concreto em relação ao perfil de aço, sendo considerados como parcialmente ou totalmente revestidos por concreto, ou, no caso dos perfis tubulares de aço, como completamente preenchidos por concreto (ABNT, 2008).

A grande vantagem das estruturas mistas de aço e concreto é o aumento de resistência e rigidez que proporcionam em relação às estruturas isoladas e típicas de aço e concreto armado, o que pode contribuir para o melhor aproveitamento dos materiais (JOHNSON, 2004).

Os pilares mistos podem ser aplicados com eficiência no caso de edifícios de andares múltiplos (FAKURY; SILVA; CALDAS, 2016), principalmente nos níveis mais baixos de térreo e subsolo, locais em que as solicitações chegam aos pilares com maior intensidade.

Devido à superior capacidade resistente e considerando as necessidades de suportar solicitações consideráveis, as dimensões proporcionadas pela seção transversal do pilar misto podem ser menores que as de um pilar convencional em concreto armado, sendo possível notar que muitos edifícios altos construídos nas últimas décadas empregam pilares mistos de aço e concreto. Apesar disso, a aplicação dos pilares mistos não deve ser observada como restrita a edifícios altos, pois além da capacidade estrutural, a adoção desse sistema é favorável para a velocidade construtiva e economia de materiais (BAHRAMI; BADARUZZAMAN; OSMAN, 2013).

Em relação a pilares mistos com seção transversal preenchida, constituídos por perfis tubulares metálicos preenchidos com concreto, diversas vantagens podem ser verificadas. O perfil tubular de aço possibilita confinamento do núcleo de concreto, o que pode conferir maior resistência à compressão e capacidade de deformação desse material (DE NARDIN; EL DEBS, 2007). Por esse motivo, a capacidade resistente axial dos pilares mistos preenchidos pode ser entendida como superior à soma das capacidades isoladas do tubo de aço e do núcleo de concreto. Outro detalhe importante se refere à

atuação do tubo como fôrma e sua capacidade para suportar cargas iniciais de construção, o que contribui para reduzir o custo total de execução (GUPTA, 2014).

As seções transversais típicas de pilares mistos preenchidos são indicadas na Figura 1, e essencialmente dependem do perfil tubular empregado, que pode ser retangular (Figura 1a) ou circular (Figura 1b).

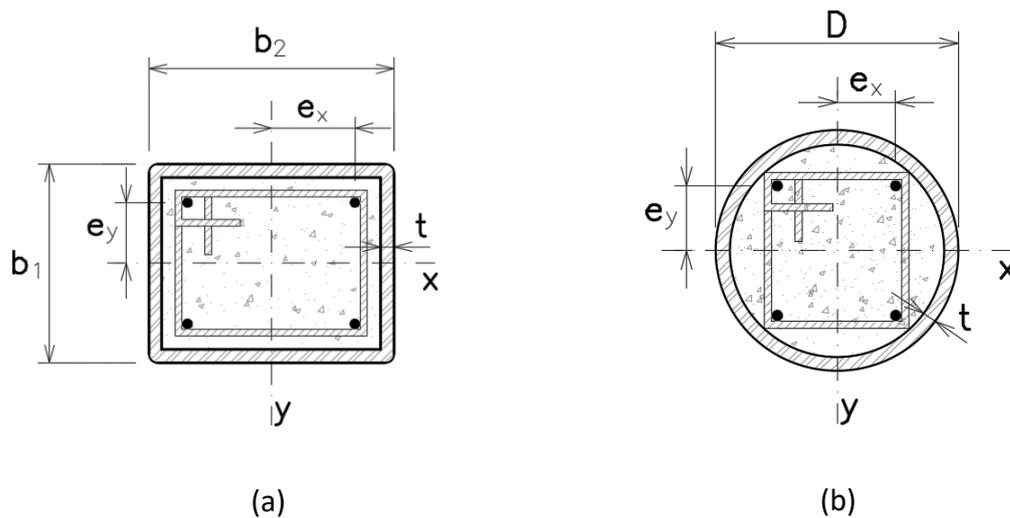


Figura 1 – Seções transversais de pilares mistos preenchidos com perfil tubular de aço retangular (a) e circular (b)

Um dos critérios que influencia diretamente o comportamento de pilares mistos preenchidos é o efeito de confinamento do núcleo de concreto promovido pelo perfil tubular de aço. Esse efeito provoca uma modificação nos estados de tensão do núcleo de concreto e do tubo de aço, influenciando a capacidade resistente do pilar misto (XIAO; HE; CHOI, 2005).

O efeito de confinamento do concreto nos pilares mistos preenchidos tem sido investigado por meio de estudos teóricos e experimentais, e algumas normas técnicas de dimensionamento de estruturas mistas adotam modelos para sua consideração. É o caso da norma europeia EN 1994-1-1 (Eurocode 4), que propõe modelo de confinamento para pilares mistos com perfil tubular circular preenchido e esbeltez relativa menor ou igual a 0,5. Já a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, por outro lado, não menciona modelos específicos para consideração do confinamento do concreto em pilares mistos no geral, conforme também foi observado por Lubas et al. (2012).

Neste trabalho é apresentada uma comparação dos critérios normativos da ABNT NBR 8800:2008 e do EN 1994-1-1 relacionados ao efeito de confinamento do concreto em pilares mistos com seção transversal tubular de aço preenchida com concreto, com base numa abordagem numérica. É apresentado o dimensionamento de um pilar misto tubular circular com esbeltez variável, efetuado de acordo com os procedimentos de cálculo apresentados nas duas normas, em que a força resistente do pilar é calculada em função da esbeltez reduzida e o efeito do confinamento proposto pela norma europeia é numericamente avaliado. O objetivo do trabalho é verificar se o efeito de confinamento do concreto pode provocar diferenças consideráveis na capacidade resistente de um pilar com as propriedades mencionadas.

## **2 Efeito de confinamento do concreto em pilares mistos preenchidos**

Nos pilares mistos preenchidos, o efeito do confinamento surge devido ao estado triaxial de tensões desenvolvido no núcleo de concreto. O perfil de aço não exerce confinamento sobre o núcleo de concreto nos primeiros estágios de carregamento, uma vez que o coeficiente de Poisson do aço é superior ao do concreto (HU et al., 2003). Com o aumento da sollicitação e das deformações longitudinais, a expansão lateral do concreto é maior que a do aço e originam-se pressões radiais na interface entre os dois materiais. A partir disso, o concreto envolvido pelo perfil tubular permanece sob estado triplo de tensões, enquanto o perfil tubular permanece em estado duplo de tensões. Adicionalmente, o perfil de aço passa a transferir esforços para o núcleo de concreto por não conseguir manter sua resistência ao escoamento devido ao estado duplo de tensões.

Em geral, o grau de acréscimo proporcionado pelo efeito de confinamento na capacidade resistente dos pilares mistos preenchidos depende de vários fatores, principalmente das dimensões do perfil tubular, do índice de esbeltez do pilar misto, da excentricidade da força, da resistência dos materiais e da forma da seção transversal (DE NARDIN; EL DEBS, 2007).

Em termos de forma, o perfil tubular circular é considerado mais eficiente em relação à contribuição do confinamento do concreto para a capacidade resistente do pilar, pois a pressão de confinamento é uniformemente distribuída nessa seção (Figura 2a).

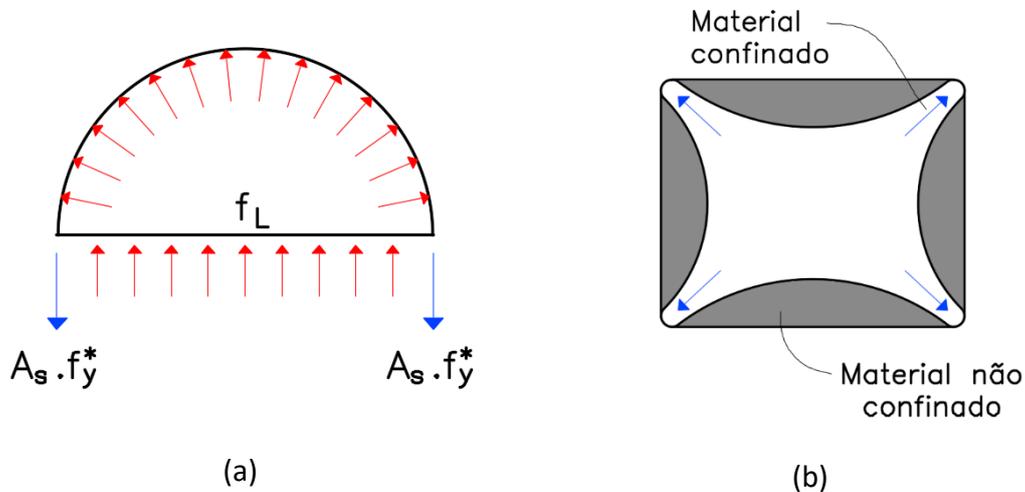


Figura 2 – Comportamento quanto ao confinamento do concreto conforme (a) perfil tubular circular e (b) perfil tubular retangular

No caso de pilares com perfil tubular quadrado ou retangular, como a distribuição de tensão não apresenta configuração uniforme, ocorre um arqueamento do concreto confinado na região central e concentração nos cantos (Figura 2b). Investigações experimentais sugerem que o confinamento promovido pelos perfis tubulares quadrados ou retangulares contribui muito pouco para a capacidade resistente do pilar misto preenchido (HUANG; LONG; CAI, 2008).

Após estudos analíticos do efeito de confinamento nos pilares mistos preenchidos, Gardner e Jacobson (1967) apresentaram a Equação 1 para o cálculo da pressão radial interna de confinamento  $\sigma_r$ . Nessa equação,  $t$  é a espessura do perfil tubular,  $r$  é o raio do perfil tubular e  $\sigma_t$  é a tensão anelar no perfil tubular.

$$\sigma_r = \frac{t}{r} \cdot \sigma_t \quad (1)$$

A tensão anelar no tubo  $\sigma_t$  é calculada a partir do critério da máxima tensão cisalhante, conforme Equação 2. Nessa equação,  $f_y$  representa a resistência do aço do perfil tubular ao escoamento, enquanto  $\sigma_{si}$  é a tensão atuante no perfil.

$$\sigma_t = f_y - \sigma_{si} \quad (2)$$

A resistência à compressão do concreto confinado  $f_{cc}$  é determinada conforme Equação 3, em função da resistência à compressão uniaxial  $f_c$  e da pressão radial  $\sigma_r$  multiplicada por um parâmetro empírico  $k$ .

$$f_{cc} = f_c + k \cdot \sigma_r \quad (3)$$

A partir das equações anteriores é possível determinar a capacidade resistente do pilar com perfil tubular circular preenchido com concreto considerando o efeito do confinamento, conforme Equação 4. As áreas de seção transversal do perfil de aço e do núcleo de concreto são indicadas por  $A_a$  e  $A_c$ , respectivamente, e  $P$  é a força axial resistente.

$$P = A_a \cdot \sigma_{si} + A_c \cdot f_{cc}$$

$$P = A_a \cdot \sigma_{si} + A_c \cdot f_c + A_c \cdot k \cdot \sigma_t \cdot \frac{t}{r} \quad (4)$$

$$P = A_a \cdot \sigma_{si} + A_c \cdot f_c \cdot \left[ 1 + k \cdot \frac{t}{r} \cdot \frac{(f_y - \sigma_{si})}{f_c} \right]$$

Os modelos de confinamento de concreto em pilares mistos preenchidos geralmente são baseados na Equação 4, inclusive o modelo proposto no Eurocode 4, como será visto adiante.

Segundo Schneider (1998), o efeito de confinamento do concreto não é verificado no comportamento de pilares mistos esbeltos, uma vez que o núcleo de concreto e o tubo de aço trabalham independentemente nesse caso. Oliveira et al. (2009) observaram que as tensões de compressão são menores na seção de pilares esbeltos, sendo que a falha por instabilidade pode ocorrer antes da plastificação dos componentes da seção mista, não proporcionando deformações suficientes para mobilizar o efeito de confinamento.

### 3 Especificações normativas

Nesta seção são apresentadas as especificações técnicas relacionadas à capacidade resistente axial e ao efeito de confinamento do concreto nos pilares tubulares circulares preenchidos, propostas pelas normas de dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto ABNT NBR 8800:2008 e EN 1994-1-1 (Eurocode 4).

### 3.1 Norma brasileira ABNT NBR 8800:2008

Na atual norma brasileira de dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto, o efeito de confinamento do concreto não é previsto na determinação dos esforços resistentes dos pilares mistos preenchidos ou nas verificações de segurança.

Na determinação da capacidade resistente do pilar misto preenchido, a norma brasileira permite considerar 95% da resistência à compressão de cálculo do concreto ( $f_{cd}$ ), sendo empregado um coeficiente ( $\alpha$ ) com valor igual a 0,95, que multiplica  $f_{cd}$ . Para demais seções, incluindo seções tubulares retangulares preenchidas com concreto, o coeficiente  $\alpha$  sugerido é igual a 0,85. Logo, o pilar misto com perfil tubular circular é mais vantajoso nesse aspecto, devido à variação possibilitada de 10% no valor de  $f_{cd}$ . Além disso, a norma brasileira menciona que o pilar misto com seção preenchida pode ser executado sem qualquer armadura longitudinal, ao contrário dos pilares mistos revestidos, que necessitam de armaduras para evitar a fissuração do concreto.

Assim, no caso do pilar misto com seção transversal circular preenchida com concreto, a força axial de compressão resistente de cálculo à plastificação total ( $N_{pl,Rd}$ ) assume a forma indicada na Equação 5.

$$N_{pl,Rd} = f_{yd} \cdot A_a + 0,95 \cdot f_{cd} \cdot A_c + f_{sd} \cdot A_s \quad (5)$$

Na Equação 5, o valor de cálculo da resistência ao escoamento do aço é representado por  $f_{yd}$ , enquanto  $f_{cd}$  é a resistência à compressão de cálculo do concreto e  $f_{sd}$  é a resistência de cálculo das armaduras longitudinais ao escoamento. As áreas de seção transversal do perfil de aço, do concreto e das armaduras longitudinais, são representadas por  $A_a$ ,  $A_c$  e  $A_s$ , respectivamente.

### 3.2 Norma europeia EN 1994-1-1 (Eurocode 4)

Diferente da norma brasileira, a norma europeia EN 1994-1-1 admite o valor integral da resistência à compressão de cálculo do concreto na determinação de  $N_{pl,Rd}$  no caso dos pilares mistos preenchidos, de acordo com a Equação 6. Contudo, o mesmo valor de  $\alpha$  é adotado no cálculo de pilares mistos parcialmente ou totalmente revestidos.

$$N_{pl,Rd} = f_{yd} \cdot A_a + f_{cd} \cdot A_c + f_{sd} \cdot A_s \quad (6)$$

A norma europeia permite considerar a resistência no caso de pilares mistos com perfil tubular circular preenchido, conforme Equação 7, quando  $\bar{\lambda} \leq 0,5$  e  $e/d \leq 0,1$ . Nesse caso,  $\bar{\lambda}$  é a esbeltez relativa do pilar misto,  $e$  é a excentricidade definida pela relação entre os valores de cálculo do momento fletor e da força axial de compressão que solicitam o pilar ( $M_{ed}/N_{ed}$ ), e  $d$  é o diâmetro externo do pilar. Os parâmetros  $\eta_a$  e  $\eta_c$  são definidos como coeficientes de confinamento.

$$N_{pl,Rd} = \eta_a \cdot f_{yd} \cdot A_a + \left(1 + \eta_c \cdot \frac{t}{d} \cdot \frac{f_y}{f_{ck}}\right) \cdot f_{cd} \cdot A_c + f_{sd} \cdot A_s \quad (7)$$

Excluindo a influência da armadura de aço longitudinal, é possível notar a semelhança entre a Equação 7 e a expressão analítica discutida na Equação 4.

O quadrado da esbeltez relativa  $\bar{\lambda}$  é a relação entre a força característica de plastificação total da seção ( $N_{pl,Rk}$ ) e a força crítica de flambagem em relação ao eixo mais desfavorável ( $N_{cr}$ ). O valor de  $\bar{\lambda}$  é calculado a partir da Equação 8. Representativamente, esse parâmetro de esbeltez é equivalente ao índice de esbeltez reduzido  $\lambda_0$  indicado na norma brasileira. Observa-se que a condição  $\bar{\lambda} \leq 0,5$  é referente a pilares relativamente curtos ou robustos, uma vez que o valor da esbeltez relativa não ultrapassa um quarto do valor máximo permitido, pois pilares com  $\bar{\lambda} > 2,0$  não são previstos pela norma europeia.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \quad (8)$$

Na condição de excentricidade nula ( $e = 0$ ), os coeficientes de confinamento  $\eta_a$  e  $\eta_c$  são calculados a partir das Equações 9 e 10, respectivamente. Nesse caso, considera-se  $\eta_a = \eta_{ao}$  e  $\eta_c = \eta_{co}$ .

$$\eta_{ao} = 0,25 \cdot (3 + 2 \cdot \bar{\lambda}) \quad \eta_{ao} \leq 1,0 \quad (9)$$

$$\eta_{co} = 4,9 - 18,5 \cdot \bar{\lambda} + 17 \cdot \bar{\lambda}^2 \quad \eta_{co} \geq 0 \quad (10)$$

Atribuindo valores para a esbeltez reduzida, é possível identificar a variação dos coeficientes de confinamento proposta pela norma europeia. As curvas de variação dos coeficientes de confinamento associados a pilares mistos com perfil tubular circular

preenchido são representadas graficamente na Figura 3, para a condição de excentricidade nula. Observa-se que o coeficiente  $\eta_a$  pode variar entre 0,75 e 1,0, enquanto a variação do coeficiente  $\eta_c$  ocorre no intervalo entre 4,5 e 0 de acordo com o aumento da esbeltez. Dessa forma, o efeito de confinamento produz aumento na resistência do núcleo de concreto e, simultaneamente, uma menor contribuição da resistência do perfil tubular de aço é obtida. Também é possível notar que  $\eta_{ao} = \eta_{co} \cong 0,9$  quando  $\bar{\lambda} = 0,3$ , sendo o ponto em que as duas curvas se cruzam, aproximadamente, no gráfico.

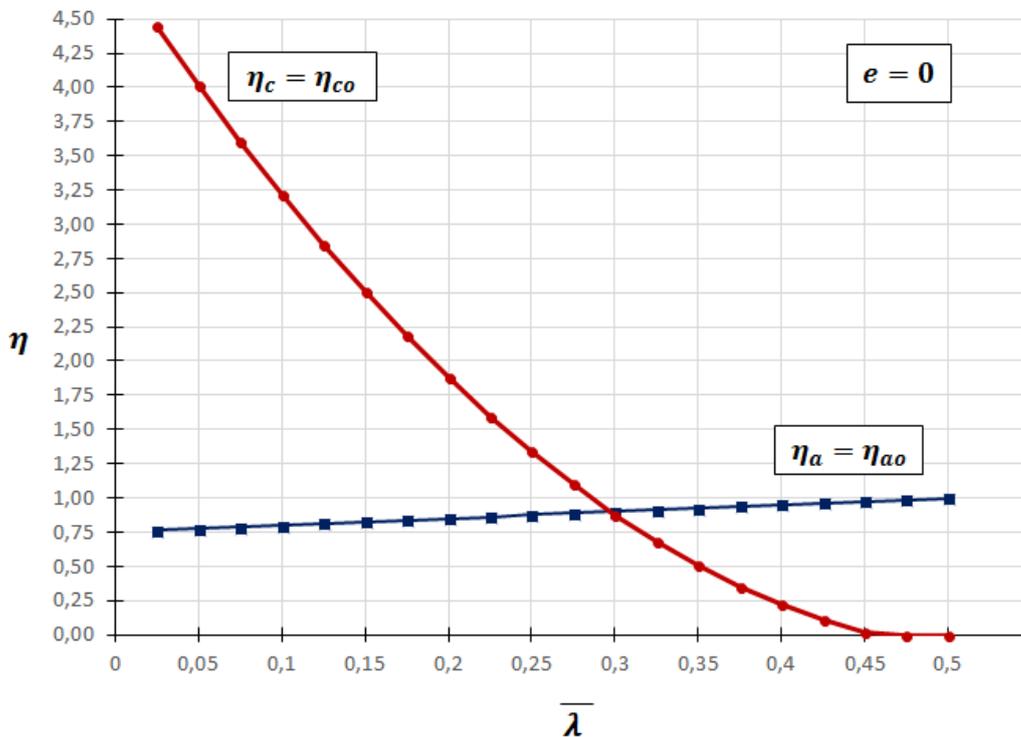


Figura 3 – Variação dos coeficientes de confinamento  $\eta_a$  e  $\eta_c$  na condição de excentricidade nula ( $e = 0$ )

Quando  $0 < e/d \leq 0,1$ , os coeficientes de confinamento  $\eta_a$  e  $\eta_c$  são calculados a partir das Equações 11 e 12, respectivamente.

$$\eta_a = \eta_{ao} + (1 - \eta_{ao}) \cdot \left(10 \cdot \frac{e}{d}\right) \quad (11)$$

$$\eta_c = \eta_{co} \cdot \left(1 - 10 \cdot \frac{e}{d}\right) \quad (12)$$

As curvas de variação do coeficiente de confinamento  $\eta_a$  são apresentadas na Figura 4, considerando acréscimos de 0,02 na relação entre a excentricidade e o diâmetro do perfil ( $e/d$ ). A variação de  $\eta_a$  em função de  $\bar{\lambda}$  é linear, segundo as Equações 9 e 11.

Quando a relação  $e/d$  atinge o limite máximo permitido ( $e/d = 0,1$ ), o coeficiente de confinamento  $\eta_a$  torna-se unitário para todo valor de  $\bar{\lambda}$  ( $\eta_a = 1$ ).

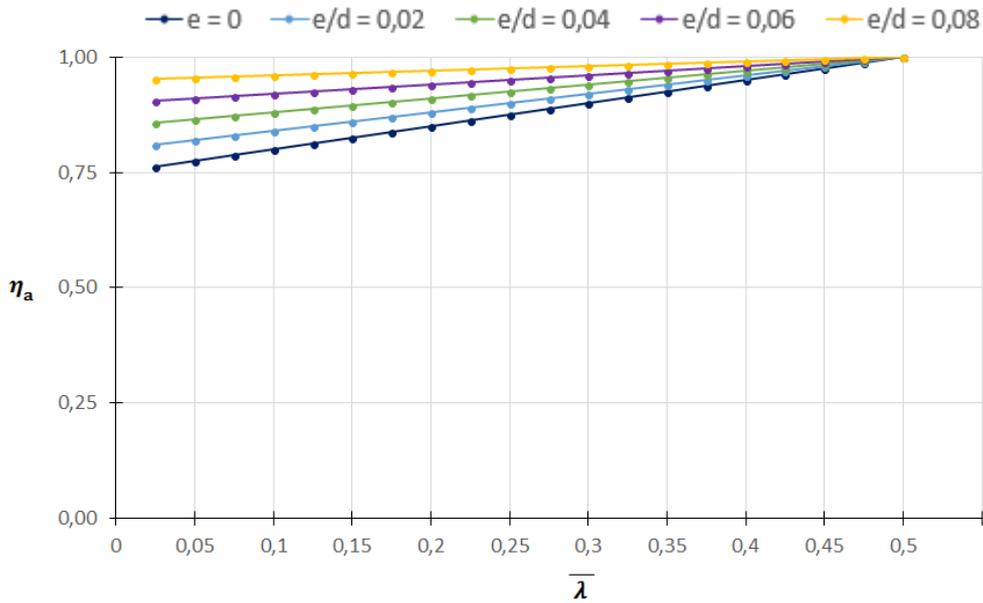


Figura 4 – Curvas de variação dos coeficientes de confinamento  $\eta_a$  considerando excentricidade

A mesma representação é feita para as curvas de variação do coeficiente de confinamento  $\eta_c$ , indicadas na Figura 5, considerando a relação  $e/d$  também variando 0,02. A variação  $\eta_c$  em função de  $\bar{\lambda}$  é quadrática, de acordo com as Equações 10 e 12. O coeficiente de confinamento  $\eta_c$  é nulo para todo valor de  $\bar{\lambda}$  ( $\eta_c = 0$ ) quando a relação  $e/d$  atinge o limite máximo permitido ( $e/d = 0,1$ ).

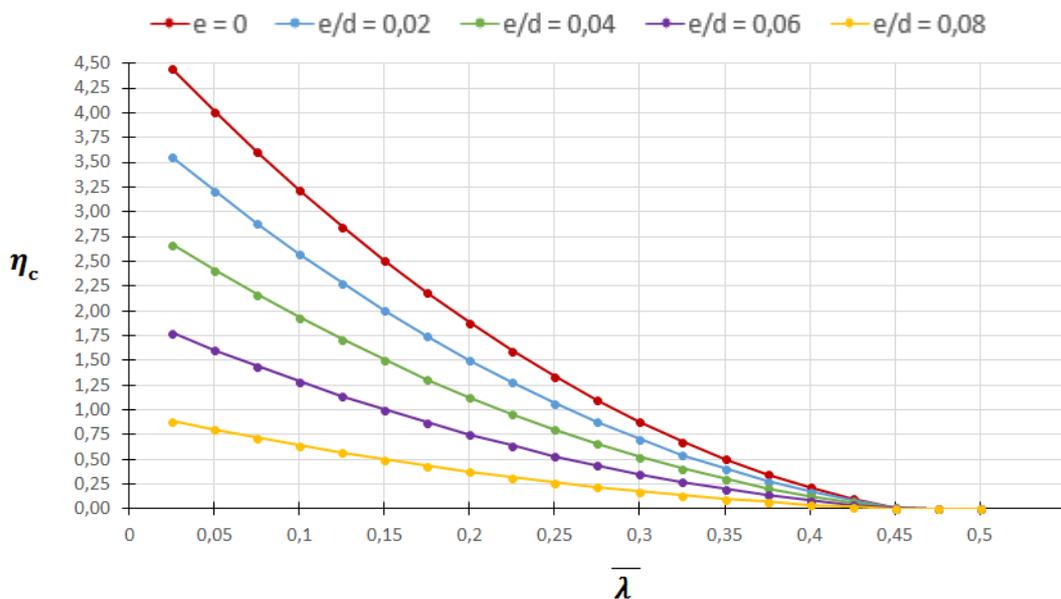


Figura 5 – Curvas de variação dos coeficientes de confinamento  $\eta_c$  considerando excentricidade

#### 4 Verificação do efeito do confinamento do concreto

Nesta seção é apresentado o dimensionamento de pilar misto com perfil tubular circular preenchido por concreto com esbeltez variável. A força de compressão resistente de cálculo desse pilar é determinada de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 e o Eurocode 4. Para analisar o efeito de confinamento na capacidade resistente, a esbeltez relativa do pilar varia entre 0,1 até o valor máximo de 0,5 admitido pela norma europeia.

As propriedades do pilar misto preenchido são indicadas na Figura 6, sendo considerados apenas o perfil tubular circular e núcleo de concreto sem o emprego de armadura longitudinal. O perfil tubular utilizado, Tubo 323,8 x 10,0, é fabricado em aço ASTM A501 Grau A, com resistência ao escoamento ( $f_y$ ) igual a 25 kN/cm<sup>2</sup> e módulo de elasticidade longitudinal ( $E_a$ ) igual a 20.000 kN/cm<sup>2</sup>. O concreto se enquadra na classe de resistência C25, possuindo resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) igual a 2,5 kN/cm<sup>2</sup> e módulo de elasticidade longitudinal ( $E_c$ ) igual a 2.380 kN/cm<sup>2</sup>.

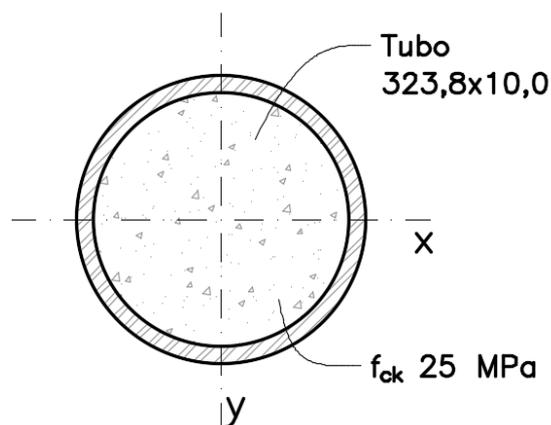


Figura 6 – Propriedades da seção transversal do pilar misto preenchido

As propriedades físicas e geométricas da seção do pilar misto são agrupadas na Tabela 1, com base nas dimensões indicadas na Figura 6.

A rigidez à flexão efetiva da seção transversal pode ser determinada a partir da Equação 13, adotando, de forma conservadora,  $E_{c,red} = 0,4 \cdot E_c$ .

$$(EI)_{ef} = E_a \cdot I_a + 0,6 \cdot (0,4 \cdot E_c) \cdot I_c \quad (13)$$

Tabela 1 – Propriedades físicas e geométricas da seção transversal do pilar misto

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
$D$	Diâmetro externo do tubo	32,38	cm
$d_i$	Diâmetro interno do tubo	30,38	cm
$t$	Espessura do tubo	1,00	cm
$A_a$	Área de aço (do tubo)	98,60	cm <sup>2</sup>
$I_a$	Momento de inércia do aço (eixos x e y)	12.147	cm <sup>4</sup>
$A_c$	Área de concreto (do núcleo)	724,88	cm <sup>2</sup>
$I_c$	Momento de inércia do concreto (eixos x e y)	41.814	cm <sup>4</sup>
$(EI)_{ef}$	Rigidez à flexão efetiva da seção transversal	$2,668 \cdot 10^8$	kN · cm <sup>2</sup>

A partir do valor obtido para a rigidez à flexão efetiva, é possível calcular os valores de força crítica de flambagem. Dessa forma, o comprimento efetivo do pilar misto, com a seção transversal e as propriedades mecânicas indicadas, pode variar entre 100 cm e 450 cm, aproximadamente, para respeitar o intervalo de esbeltez relativa considerado anteriormente.

Uma vez definidas as propriedades físicas e geométricas da seção, é possível aplicar as equações propostas pelas normas técnicas para determinação da força axial resistente de cálculo do pilar misto.

#### 4.1 Cálculo segundo ABNT NBR 8800:2008

A força axial de compressão resistente de cálculo à plastificação total de pilares mistos preenchidos é calculada empregando a Equação 5, seguindo os critérios da ABNT NBR 8800:2008. O valor de  $N_{pl,Rd}$  não varia com a alteração da esbeltez do pilar nesse caso, pois a norma brasileira não aborda modelos de confinamento.

O fator de contribuição do perfil de aço é calculado a partir da Equação 14. A norma brasileira recomenda que seu valor seja superior a 0,2 e inferior a 0,9.

$$\delta = \frac{f_{yd} \cdot A_a}{N_{pl,Rd}} \rightarrow 0,2 < \delta < 0,9 \quad (14)$$

Os valores obtidos para a força axial de compressão resistente de cálculo à plastificação total e o fator de contribuição do perfil de aço são indicados na Tabela 2. O fator de contribuição respeita o intervalo admitido pela norma brasileira.

Tabela 2 – Parâmetros do pilar misto calculados a partir da ABNT NBR 8800:2008

<b>Símbolo</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
$N_{pl,Rd}$	Força axial resistente de cálculo à plastificação total	3.470,6	kN
$\delta$	Fator de contribuição do perfil de aço	0,65	-

Determinada a força de plastificação total da seção e o fator de contribuição do perfil de aço, os valores do fator de redução da resistência podem ser calculados conforme a Equação 15, tendo em vista que a esbeltez reduzida não ultrapassa 0,5. Para valores de  $\lambda_0$  entre 0,1 e 0,5, o fator de redução  $\chi$  varia entre 1,0 e 0,9, ou seja, há uma redução da capacidade resistente de no máximo 10%.

$$\chi = 0,658(\lambda_0^2) \quad (15)$$

A força axial de compressão resistente de cálculo ( $N_{Rd}$ ) do pilar misto preenchido é determinada conforme a Equação 16, sendo o produto entre o fator de redução ( $\chi$ ) e a força axial de compressão resistente de cálculo à plastificação total ( $N_{pl,Rd}$ ).

$$N_{Rd} = \chi \cdot N_{pl,Rd} \quad (16)$$

A variação da força axial de compressão resistente de cálculo do pilar misto preenchido em função da esbeltez reduzida, determinada segundo a norma brasileira, é indicada na Figura 7. O menor valor obtido para a força resistente foi de 3125,8 kN, relacionado ao índice de esbeltez reduzido de 0,5.

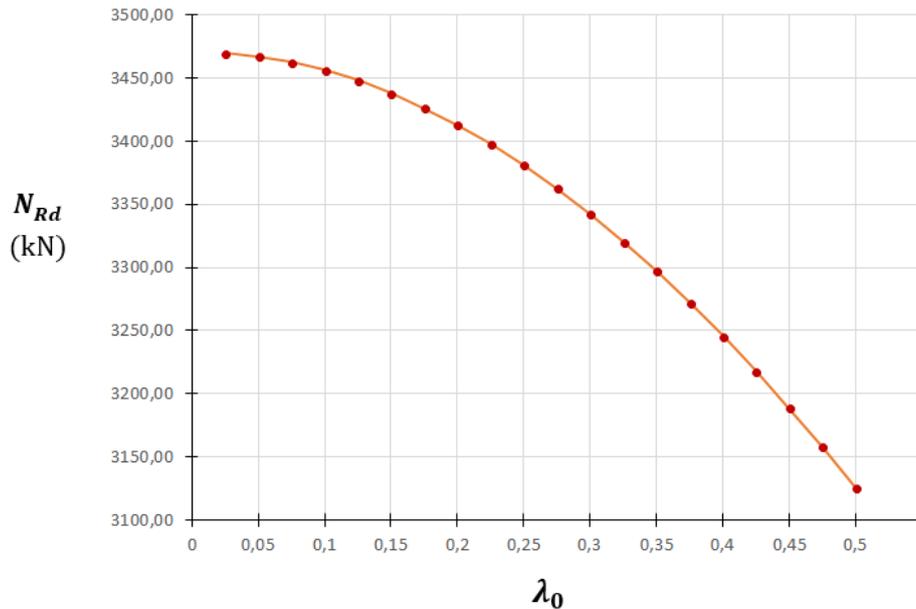


Figura 7 – Variação de  $N_{Rd}$  determinada a partir da norma brasileira em função da esbeltez reduzida

#### 4.2 Cálculo segundo EN 1994-1-1 (Eurocode 4)

As fórmulas propostas pelo Eurocode 4 para determinação da força axial de compressão resistente de cálculo à plastificação total dos pilares mistos preenchidos foi apresentada nas Equações 6 e 7. Como o pilar misto proposto atende aos requisitos de perfil tubular circular, o efeito do confinamento pode ser considerado e aplicada a Equação 7 para o cálculo de  $N_{pl,Rd}$ . Para a excentricidade de carregamento nula, a variação dos coeficientes de confinamento é definida conforme as Equações 9 e 10 e a Figura 3. Considerando a excentricidade e a relação  $e/d$  variando até o valor limite de 0,1, esses coeficientes são definidos segundo as Equações 11 e 12 e Figuras 4 e 5.

Os procedimentos para cálculo do fator de contribuição do perfil de aço ( $\delta$ ), do fator de redução ( $\chi$ ) e da força axial de compressão resistente de cálculo ( $N_{Rd}$ ) são os mesmos apresentados na seção anterior, nas Equações 15, 16 e 17, uma vez que são similares nas duas normas.

A variação da força axial de compressão resistente de cálculo do pilar misto preenchido em função da esbeltez reduzida, determinada segundo a norma europeia, é indicada na Figura 8. Nesse caso, foi desconsiderada a excentricidade da força ( $e = 0$ ), logo os coeficientes de confinamento são  $\eta_a = \eta_{a0}$  e  $\eta_c = \eta_{c0}$ . O menor valor obtido para a

força resistente segundo esses cálculos foi de 3184,1 kN, relacionado ao maior valor de esbeltez reduzida (0,5).

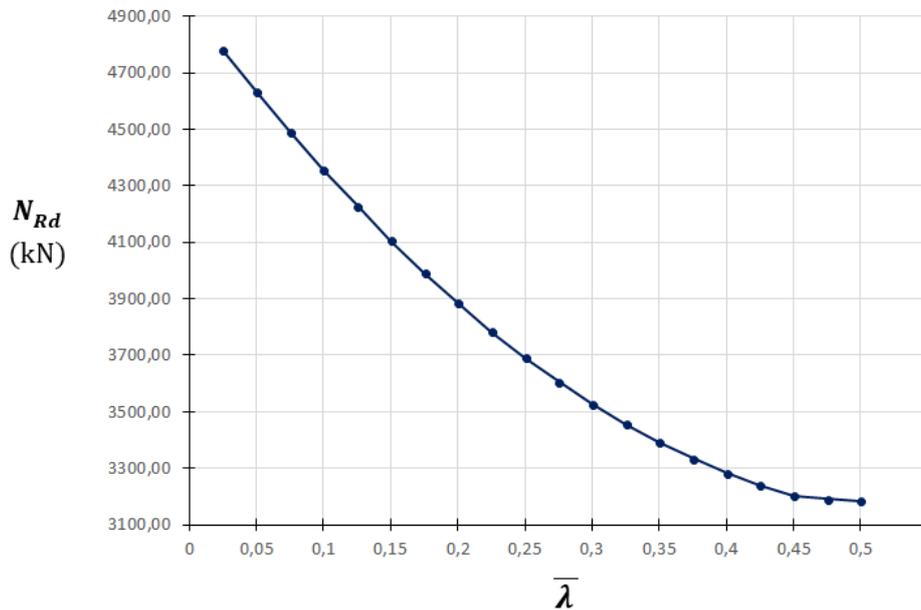


Figura 8 – Variação de  $N_{Rd}$  obtida a partir da norma europeia ( $e = 0$ )

Caso seja considerada a excentricidade da força, os valores obtidos para força axial resistente de cálculo serão menores. Quanto maior a relação  $e/d$ , menor é o valor de  $N_{Rd}$ . Dessa forma, na Figura 9 são apresentadas quatro curvas de variação de  $N_{Rd}$ , para relação  $e/d$  de 0,02, 0,04, 0,06 e 0,08. Observa-se que quando  $e/d$  atinge o valor limite de 0,1, a Equação 7 recai na Equação 6 e o efeito de confinamento não contribui para a capacidade resistente do pilar misto preenchido.

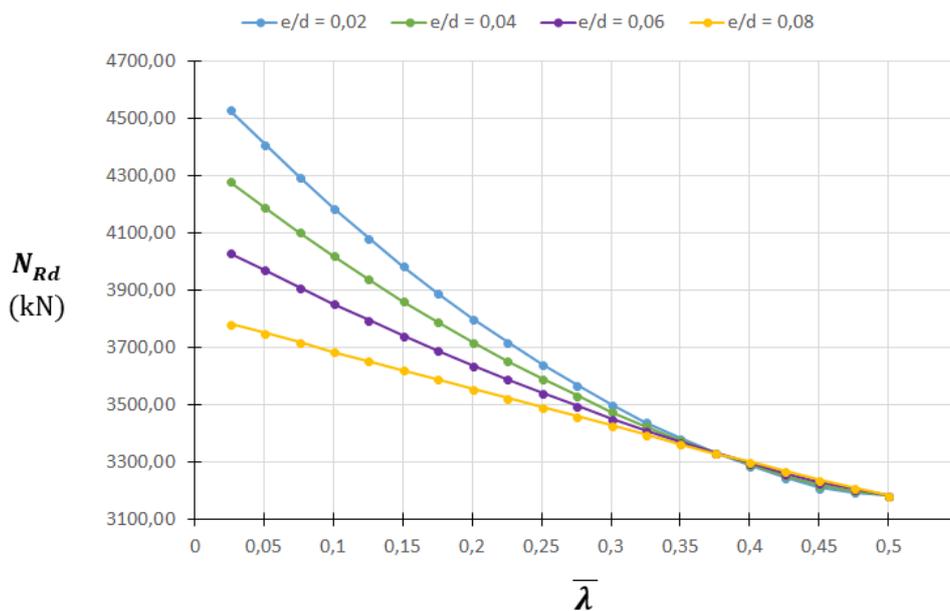


Figura 9 – Variação de  $N_{Rd}$  obtida a partir da norma europeia ( $e \neq 0$ )

### 4.3 Discussão sobre a análise comparativa

As curvas de variação da força axial de compressão resistente de cálculo ( $N_{Rd}$ ) determinadas nessa seção são agrupadas no gráfico da Figura 10. Em geral, observa-se que quanto maior a relação  $e/d$ , menor é o efeito do confinamento do concreto e menor é a força resistente proporcionada pelo pilar segundo o modelo proposto pelo Eurocode 4. Além disso, é possível notar que o cálculo da força resistente do pilar misto a partir da ABNT NBR 8800:2008 é mais conservador para todos os valores de esbelteza relativa, uma vez que o efeito do confinamento do concreto não é previsto nas diretrizes da norma brasileira. Mesmo nos casos em que a excentricidade da força foi considerada, a força resistente determinada de acordo com a norma europeia foi maior em relação à obtida conforme metodologia da norma brasileira. Apesar disso, quando a esbelteza relativa assume o valor limite de 0,5 para aplicação do modelo de confinamento, a variação notada é pouco significativa, menor que 2%.

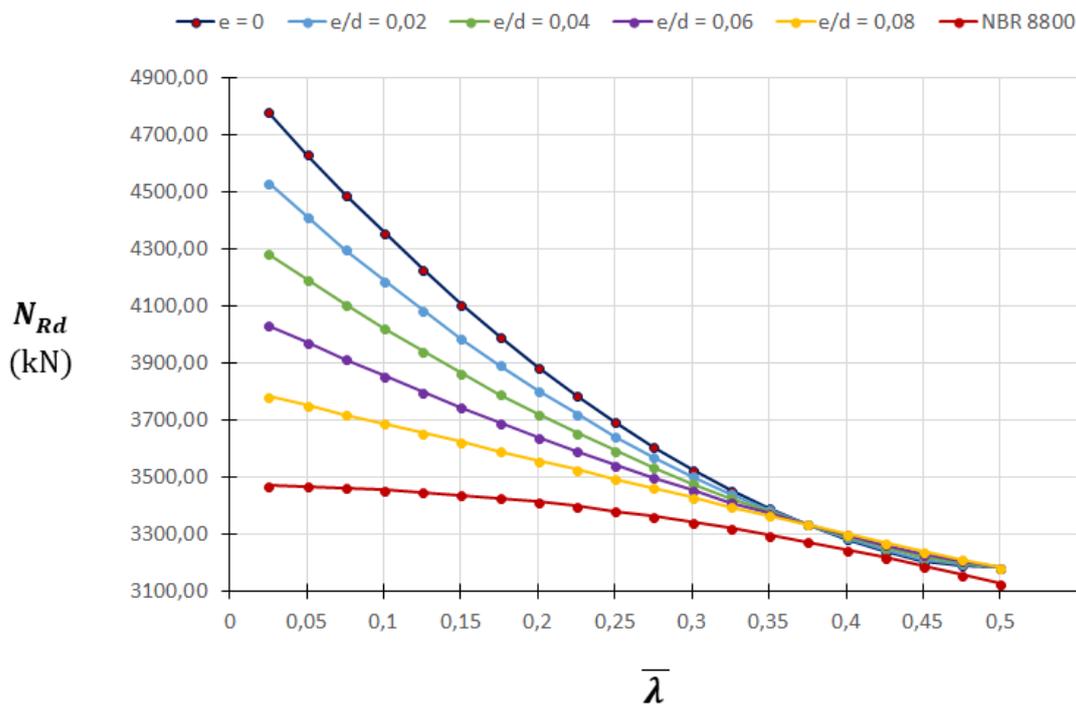


Figura 10 – Variação de  $N_{Rd}$  segundo as normas ABNT NBR 8800:2008 e Eurocode 4

A variação percentual da força resistente determinada a partir das duas normas é indicada na Tabela 3, em que foram considerados dez valores de esbelteza relativa, enquanto a diferença percentual foi calculada em relação aos valores obtidos a partir da norma brasileira. Verifica-se que a consideração do modelo de confinamento gera

contribuição significativa na capacidade de pilares curtos, chegando a uma variação de 26% em pilares com esbeltez relativa de 0,1. Contudo, a viabilidade de pilares com esbeltez tão reduzida é questionável no caso de edifícios, uma vez que podem apresentar pouca eficiência em termos de aproveitamento de material e de espaço.

Tabela 3 – Variação percentual de  $N_{Rd}$  conforme ABNT NBR 8800:2008 e Eurocode 4

$\bar{\lambda}$	ABNT NBR 8000:2008 $N_{Rd}$ (kN)	Eurocode 4 $N_{Rd}$ (kN)	$\Delta$ (%)
0,10	3456,09	4356,05	26,0%
0,15	3438,06	4106,67	19,5%
0,20	3412,96	3885,11	13,8%
0,25	3380,97	3692,01	9,2%
0,30	3342,28	3527,58	5,5%
0,35	3297,13	3391,68	2,9%
0,40	3245,78	3283,77	1,2%
0,45	3188,55	3202,97	0,5%
0,50	3125,79	3184,08	1,9%

#### 4.4 Resultados experimentais obtidos por Schneider (1998)

A capacidade resistente de pilares mistos preenchidos foi testada experimentalmente por Schneider (1998), considerando tubos de aço com forma circular, retangular e quadrada. Na avaliação dos pilares mistos com tubo circular, foi constatada influência do confinamento do concreto nos modelos com menor esbeltez. As propriedades desses modelos, denominados C1, C2 e C3, são indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades dos pilares mistos preenchidos com tubo circular

Modelo	$D$ cm	$t$ cm	$D/t$	$(EI)_{eff}$ kN · cm <sup>2</sup>	$L/D$	$L$ cm	$f_y$ MPa	$f_c$ MPa	$\lambda_0$
C1	14	0,30	46,67	$8,17 \cdot 10^6$	4,3	6,05	285	28,18	0,184
C2	14	0,65	21,54	$1,43 \cdot 10^7$	4,3	6,05	313	23,81	0,172
C3	14	0,68	20,59	$1,49 \cdot 10^7$	4,4	6,20	537	28,18	0,220

Fonte: Adaptado de Schneider (1998)

No gráfico da Figura 11 são indicados os valores de forças últimas, obtidas experimentalmente para os modelos C1, C2 e C3, e as respectivas forças resistentes estimadas a partir dos procedimentos normativos do Eurocode 4 e ABNT NBR 8800:2008.

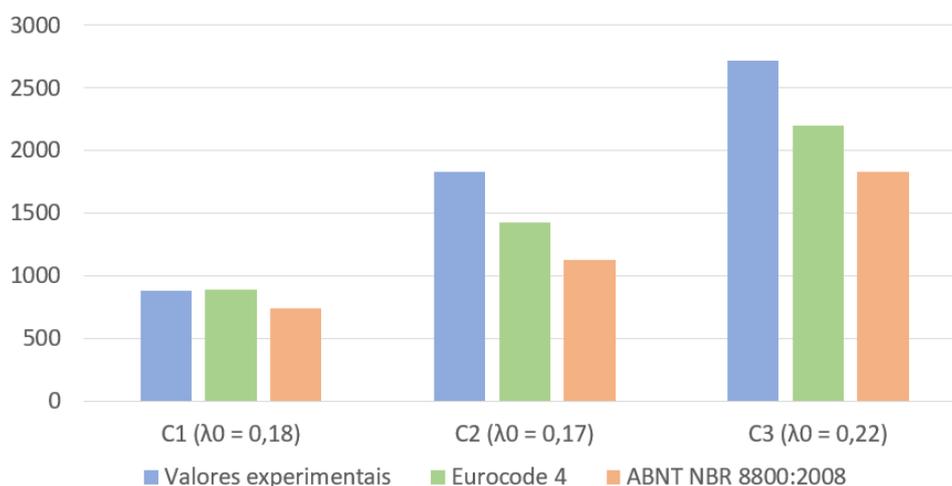


Figura 11 – Comparação entre os valores experimentais e estimados da resistência

Com base nos resultados acima (Figura 11), nota-se que a estimativa da capacidade resistente proposta pelo Eurocode 4 é menos conservadora que a ABNT NBR 8800:2008, no caso dos pilares mistos testados com  $\bar{\lambda} \leq 0,22$ . Devido ao efeito do confinamento, houve variação de até 21%, comparando-se as estimativas das duas normas.

#### 4.5 Discussão final

Apesar do efeito de confinamento ser notável apenas nos casos de pilares mistos curtos, e com perfil tubular com forma circular, eventualmente as próximas revisões da atual norma brasileira de dimensionamento de estruturas mistas poderão apresentar modelo de confinamento voltado para pilares mistos preenchidos, de forma semelhante ao que é feito na norma europeia. Isso se justifica pelos estudos experimentais realizados nas últimas décadas, como o trabalho de Schneider (1998), que comprovam a contribuição do efeito de confinamento na capacidade resistente de pilares preenchidos curtos, e pela iniciativa de normas internacionais adotarem modelos específicos para esse parâmetro. No geral, a consideração do modelo de confinamento do concreto pode contribuir para uma melhor representação da capacidade resistente dos pilares mistos curtos.

## 5 Conclusão

Nesse trabalho foi apresentado um estudo sobre o efeito de confinamento do concreto em pilares mistos com seção transversal tubular de aço preenchida com concreto. Foram verificadas as especificações normativas da ABNT NBR 8800:2008 e do Eurocode 4 nesse contexto, e foi desenvolvido o dimensionamento de um pilar misto preenchido com geometria variável segundo as duas metodologias. A força axial resistente de compressão de cálculo foi determinada considerando variação do índice de esbeltez reduzido do pilar entre 0,1 e 0,5.

O modelo de confinamento proposto pelo Eurocode 4 é válido para pilares mistos com perfil tubular circular preenchido com concreto, que possua esbeltez relativa menor ou igual a 0,5 e relação entre a excentricidade da força e o diâmetro do tubo menor ou igual a 0,1. A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, ao contrário da norma europeia, não sugere modelos específicos para consideração do confinamento do concreto. Foi observado que a estimativa da força de compressão resistente de cálculo pelo Eurocode 4 é menos conservadora que pela NBR 8800, uma vez que a contribuição do confinamento é considerada na capacidade resistente do pilar misto dimensionado segundo a norma europeia. Houve variação de até 26% no valor da força resistente estimada segundo as duas metodologias, embora o efeito de confinamento tenha apresentado maior contribuição na capacidade resistente de pilares curtos, com valores reduzidos de índice de esbeltez relativo. Nesse contexto, resultados experimentais obtidos por Schneider (1998) também mostraram que a estimativa a partir do Eurocode 4 é menos conservadora que a alcançada pela norma brasileira.

Dessa forma, sugere-se que, para as próximas revisões da norma brasileira de dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto, sejam realizadas novas discussões sobre a possibilidade de incluir um modelo de confinamento voltado para pilares mistos preenchidos, semelhante à norma europeia. Isso possibilitará a estimativa de esforços resistentes maiores, mesmo que ligeiramente, uma vez que o efeito de confinamento do concreto nos pilares mistos preenchidos tem sido observado experimentalmente em diversos estudos nas últimas décadas e poderia ser considerado no dimensionamento estrutural desses pilares.

## 6 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

BAHRAMI, A.; BADARUZZAMAN, W. H. W.; OSMAN, S. A. Behaviour of stiffened concrete-filled steel composite (CFSC) stub columns. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 10, n. 2, pp.409-440, 2013.

DE NARDIN, S.; EL DEBS, A. L. H. C. Axial load behaviour of concrete-filled steel tubular columns. **Structures and Buildings**, v. 160, p. 13-22, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1994-1-1**. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for building. Brussels: 2004.

FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. C.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

GARDNER, N. J.; JACOBSON, E. R. Structural behavior of concrete filled steel tubes. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 64, n. 11, p. 404-413, 1967.

GUPTA, P. K. Numerical study of confinement in short concrete filled steel tube columns. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v.11, n.8, 2014.

HU, H. T.; HUANG, C. S.; WU, M. H.; WU, Y. M. Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect. **Journal of Structural Engineering**, v. 129, n. 10, p. 1322-1329, 2003.

HUANG, Y. S.; LONG, Y. L. ; CAI, J. Ultimate strength of rectangular concrete-filled steel tubular (CFT) stub columns under axial compression. **Steel and Composite Structures**, v. 8, n. 2, p. 115-128, 2008.

JOHNSON, R. P. **Composite structures of steel and concrete: beams, slabs, columns and frames for buildings**. 3. ed. Oxford: Blackwell, 2004.

LUBAS, P. H.; SILVA, V. P.; NETO, J. M. Dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto conforme ABNT NBR 8800:2008. **Revista da Estrutura de Aço**, v. 1, n. 1, p. 1-19, 2012.

OLIVEIRA, W. L. A.; DE NARDIN, S; EL DEBS, A. L. H. C.. Dimensionamento de pilares preenchidos de seção circular submetidos à compressão simples, segundo a NBR 8800:2008 e Eurocode 4:2004: comparação com resultados experimentais. **Revista Escola de Minas**, v.62, n.1, p.73-85, 2009.

SCHNEIDER, S.P. Axially loaded concrete-filled steel tubes. **Journal of Structural Engineering**. ASCE, v.124, n.10, p. 1125-1138, 1998.

XIAO, Y.; HE, W.; CHOI, K. Confined concrete-filled tubular columns. **Journal of Structural Engineering**, v. 131, n. 3, p. 488-497, 2005.