

Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto

PERFIS TUBULARES MISTOS DE AÇO E CONCRETO: COMPARATIVO PRELIMINAR PARA O DIMENSIONAMENTO ENTRE AS NORMAS NBR 8800:2008, NBR 16239:2013 E EUROCODE4:2007

Vanessa da Silva de Azevedo¹
Luciano Rodrigues Ornelas de Lima²
Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco³

Resumo

Por aproximadamente uma década foram desenvolvidas pesquisas relacionadas diretamente ao uso de estruturas metálicas no processo construtivo de maneira mais ampla, onde investigou-se o comportamento das estruturas frente aos esforços solicitantes, os tipos de ligações dos elementos estruturais e finalmente, revisão e implementação das normas técnicas pertinentes ao assunto, de modo complementar às lacunas ainda existentes sobre o mesmo. Dos estudos desenvolvidos neste espaço de tempo, pode-se observar uma evolução significativa no que diz respeito à construção metálica tubular devido ao apelo arquitetônico dos perfis. Também é possível observar o desdobramento da utilização deste tipo de perfil metálico quando se trata da interação aço concreto, quando se utilizam estruturas mistas. Como o sistema misto apresenta vantagens estruturais devido à combinação da capacidade resistente do aço e a robustez do concreto, e uma vez que o estudo sobre colunas mistas tubulares de aço está um pouco mais aprofundado em termos experimentais de utilização de estruturas mistas tubulares sem costura, neste trabalho apresenta-se uma ideia preliminar de comparação analítica entre às normas aplicáveis ao dimensionamento de perfis tubulares circulares, adotando-se perfis com costura. Essa comparação se fará quando da utilização dos mesmos como colunas mistas, a fim de que o desdobramento da pesquisa possa indicar o comportamento deste tipo de perfil.

Palavras-chave: Perfis Tubulares; Estruturas Mistas; Pilares Mistos de Aço e Concreto

* Contribuição técnica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

COMPOSITE TUBULAR SECTIONS OF STEEL AND CONCRETE: PRELIMINARY COMPARISON BETWEEN NORMS NBR 8800: 2008, NBR 16239: 2013 AND EUROCODE 4: 2007

Abstract

For about a decade were developed research related directly to the use of metal structures in the construction process more broadly, where the behavior of the front structures are investigated to internal forces, types of connections of structural members and finally, review and implementation of standards the relevant technical subject in a complementary way to the remaining gaps on it. From the studies made in this time, one can observe a significant evolution with respect to the tubular metal construction due to architectural appeal of the profiles. It is also possible to observe the unfolding of the use of such metal profile when it comes to interact concrete steel, when using composite structures. As the mixed system presents structural advantages due to the combination of resistant steel capacity and strength of concrete, and since the study of tubular composite steel columns are a bit further in experimental terms of use of tubular composite structures seamless, this paper presents a preliminary idea of analytical comparison between the rules applicable to the design of circular hollow sections, adopting sewing with profiles. This comparison will be made when using the same columns as mixed, so that the deployment of the search may indicate the behavior of this type of profile.

Keywords: Tubular sections; Composite Structures; Steel and Concrete Composite Columns.

¹Engenheira Civil, MSc em Engenharia Civil, Doutoranda em Engenharia Civil, PGECIV UERJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro e Brasil.

² Engenheiro Civil, DSc em Engenharia Civil, Professor, Departamento de Estruturas, PGECIV UERJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro e Brasil.

³ Engenheiro Civil, PhD em Engenharia Civil, Professor, Departamento de Estruturas, PGECIV UERJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro e Brasil.

1. INTRODUÇÃO

Observa-se atualmente o aprofundamento contínuo na pesquisa para utilização de estruturas tubulares de aço no processo construtivo. De forte apelo arquitetônico, os tubos de aço circulares reúnem elegância, versatilidade e características estruturais específicas que fortalecem as condições de vantagem na relação vantagem x desvantagem de seu uso na construção civil.

Amplamente utilizado na construção civil em estruturas espaciais, tais como treliças e grandes coberturas (Figura 1), o tubo de aço circular prossegue sendo explorado também como elemento estrutural de maior capacidade resistente, como colunas, abandonando uma ideia superficial de focar seu uso como elemento estético e possibilitando que o mesmo seja visto como um elemento estrutural de uso prático no processo construtivo.

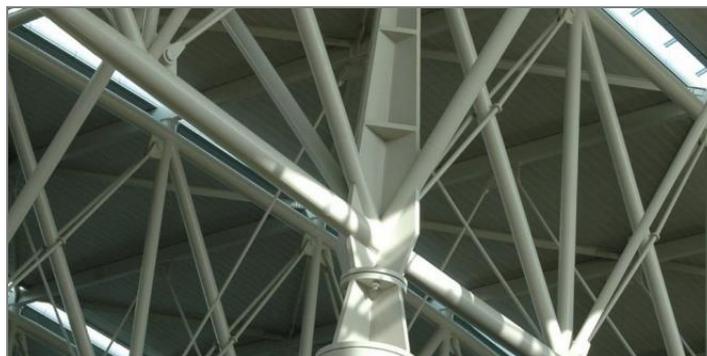


Figura 1: Estrutura espacial.
Fonte: Tetric [1].

Uma forma de se perceber este atributo prático relaciona-se às diversas pesquisas realizadas quanto ao uso de perfis tubulares circulares de aço associados ao concreto, caracterizando-se como estruturas mistas, onde a integração dos dois materiais se complementa e permite que se obtenha um elemento estrutural complexo e de características distintas provenientes de ambos os materiais.

A combinação da capacidade de trabalhar à compressão do concreto e da capacidade de trabalhar à tração do aço conferem ao sistema misto um atrativo ímpar, porém se faz necessário que haja uma interação entre o concreto e o aço para que o sistema funcione de forma efetiva.

1.1 Apresentação do Trabalho

Aprofundando-se na interação entre aço e concreto e concebendo-se sua utilização em um sistema misto (Figura 2), é possível perceber uma estrutura igualmente resistente aos sistemas construtivos convencionais (aço e concreto utilizados isoladamente), no entanto, de peso próprio e volume reduzidos, onde podem ser dispensados o uso de fôrmas e escoramentos, visto que a seção de aço atua como fôrma para o concreto e esta não necessita de escoramento em virtude do processo de cura.

Além destas propriedades se verifica uma melhora no comportamento da estrutura em situações de incêndio e também na resistência à corrosão.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Dentre esses pontos de destaque busca-se ainda na construção civil, desenvolver sistemas construtivos que permitam que o processo se desenvolva de modo que este seja econômico, limpo e sustentável, o que implica em elementos estruturais que possam estar contemplados em um plano de montagem, tal como acontece com elementos de aço e pré-moldados de concreto.

É possível delinear uma síntese mais aprofundada entre estas prerrogativas quando se trata do comportamento de colunas mistas de seção tubular circular quando submetidas à compressão. Analisando inicialmente o comportamento estrutural deste tipo de elemento quando aplicado um esforço axial e detalhando-se as premissas necessárias à interação do conjunto aço/concreto visualiza-se de um modo mais amplo as vantagens da utilização deste sistema.



Figura 2: Pilar misto circular de aço e concreto.

Fonte: De Nardin et al. [2]

1.2 Objetivos

Este estudo tem seu foco voltado para a análise de colunas tubulares mistas como elemento estrutural e dirige suas observações para uma comparação analítica inicial entre as curvas de flambagem apresentadas nas normas brasileiras NBR 8800:2008 – Projeto de Estrutura de Aço e de Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios, NBR 16239:2013 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares e Eurocode 4:2004 – Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-1 General Rules and Rules for Buildings.

Atenta-se para o processo de fabricação dos perfis. Perfis de aço formados a quente e os formados a frio, mais comumente conhecidos como tubos sem costura e tubos com costura, identificando as peculiaridades pertencentes às normas que apontem diferenças no processo de fabricação dos perfis quanto ao dimensionamento das colunas mistas.

1.3 Justificativa

Devido às diferenças existentes no processo de fabricação dos perfis tubulares laminados a quente sem costura e dobrados a frio com costura, e devido ao significativo avanço no estudo da utilização dos perfis tubulares laminados à quente como elemento estrutural do sistema misto já estabelecidos, se abordará o uso dos perfis tubulares dobrados a frio como objeto de estudo, a fim de se apontar inicialmente as diferenças essenciais existentes entre os dois tipos de perfis.

Verifica-se que a NBR 8800:2008 [3] não faz menção à diferença existente no processo de fabricação dos perfis tubulares, podendo ser aplicada a qualquer seção tubular, entretanto, a

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

NBR 16239:2013 [4] no item 1.3.b prevê um procedimento específico para o dimensionamento de barras submetidas à força axial de compressão constituídas de perfis tubulares, laminados a quente sem costura ou tratados termicamente para alívio de tensões com ou sem costura.

O tratamento térmico para alívio de tensões, que tem como objetivo obter condições metalúrgicas equivalentes às dos tubos laminados a quente, pode ser feito aquecendo-se os tubos a uma temperatura igual ou superior a 450 °C, com posterior resfriamento ao ar livre, conforme a norma CSA G40.20-04 (General Requirements for Rolled or Welded Structural Quality Steel).

Desta forma, garantindo-se que haja o tratamento térmico adequado tal como regem as diretrizes normativas, há o precedente de que se utilizem os perfis laminados à frio com costura, não excluindo seu uso como elemento estrutural misto.

Percebe-se ainda que o Eurocode 3:2003 - Design of Steel Structures – Part 1-1 General Rules and Rules for Buildings:2003 [5] trata os perfis de seção tubular formados à quente e formados à frio de maneira diferente, estabelecendo para estas curvas de flambagem diferentes, ou seja, adota critério onde há uma curva de flambagem para cada tipo de formação de perfil, seja à quente, seja à frio. Já o EC-4:2004 [6] trata as seções mistas de acordo com o modo de interação entre os materiais (aço e concreto), estabelecendo as curvas de flambagem para as seções mistas tais como as seções transversais de aço totalmente revestidas de concreto, as seções transversais de aço parcialmente revestidas de concreto, as seções transversais de aço preenchidas de concreto e algumas variações de seção compostas com perfil I.

1.4 Revisão da literatura

Instintivamente, uma das primeiras impressões sobre a escolha do uso do perfil tubular de aço em estruturas mistas se apoia sobre sua geometria. Em termos de praticidade e semelhança aos elementos estruturais de concreto armado aponta-se na utilização de perfis tubulares quadrados e retangulares, uma vez que se projeta um comparativo de modo visual com a maioria das estruturas encontradas no cotidiano.

No entanto, aprofundando-se no comportamento estrutural mediante às solicitações de carregamento externo e observando as características mecânicas de ambos os materiais (aço e concreto), percebe-se que a resposta do elemento estrutural às solicitações de carregamento também depende da geometria do mesmo, o que amplia a visão inicial para perfis tubulares de formato circular.

Corroborar-se esta ideia pois, ao se incorporar o aspecto geométrico na determinação da escolha do perfil tubular entende-se que a seção circular é a única seção que mantém simetria em qualquer direção que passe pelo seu centro de gravidade, mantendo a simetria em relação a qualquer posição em que se encontrem os eixos coordenados de referência, ou seja, uma simetria radial.

Além desta propriedade geométrica, a seção circular coincide seu centro de gravidade com seu centro de cisalhamento e devido à sua simetria radial, quando submetida a um esforço de compressão em seu centro geométrico perpendicular à sua seção, as tensões geradas são distribuídas de modo equivalente, não ocorrendo assimetria na distribuição ou ocorrência de direções preferenciais de flambagem.

Ainda que um perfil tubular de seção quadrada coincida seu centro de gravidade com seu centro de cisalhamento e tenha simetria em relação aos seus eixos coordenados, o mesmo não apresenta simetria radial, o que gera uma desvantagem de seu uso em relação ao perfil tubular de seção circular.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Estabelecidas as características geométricas da seção de aço da coluna, para que se garanta que esta seja classificada como um sistema misto é necessário que haja a interação entre ambos os materiais, aço e concreto. De acordo com Cardoso, Caldas et al [7], essa interação é obtida por meio do atrito, da aderência ou por meios mecânicos, onde a interação por meios mecânicos é feita por mecanismos de transferência de carga que podem vir a ser moedas, ressalto, conectores de cisalhamento entre outros.

1.4.1 Confinamento do concreto

Outro aspecto importante na utilização de perfis tubulares de aço em estruturas mistas de aço e concreto é o confinamento do concreto. Simões [8] acredita que o confinamento é um dos fatores em que deve haver grande importância no conhecimento e forma como o mesmo ocorre, pois se atribui ao confinamento a principal responsabilidade pelo aumento da capacidade resistente das colunas mistas, quando comparado com a soma das capacidades resistentes dos elementos que a compõem.

Para Chaves [9], por meio do modo experimental, já havia sido possível perceber esta característica quando este expõe que o fenômeno do confinamento do concreto em colunas mistas está relacionado à expansão dos materiais que compõem a coluna mista devido ao aço e o concreto apresentarem coeficientes de Poisson diferentes.

Chaves [9] explica sucintamente que em um carregamento moderado o aço expandirá mais que o concreto por apresentar um coeficiente de Poisson mais elevado, no entanto, para um carregamento maior o concreto se expandirá mais que o perfil de aço devido à fissuração do concreto, tornando o coeficiente de Poisson do concreto aparentemente maior que o do aço. A expansão relativa do núcleo de concreto é controlada pelo perfil tubular de aço, causando o confinamento e este surge, com efeito, apenas depois que o concreto começa a fissurar internamente, para deformações acima de 1%.

Colunas mistas também tem seu comportamento influenciado pela esbeltez. Segundo Oliveira & El Debs [10] a relação entre comprimento (L) e diâmetro externo (D) do pilar misto preenchido com concreto é uma característica que influencia tanto no confinamento quanto na capacidade resistente do pilar. Para Gupta et. al. apud Oliveira & El Debs [10], a capacidade resistente do elemento e o confinamento do concreto diminuem com o aumento do comprimento do pilar, ou seja, da relação L/D.

Oliveira & El Debs [10] apontam ainda que quando a relação L/D cresce, os valores de capacidade resistente com e sem considerar o efeito de confinamento aproximam-se do valor experimental. No caso dos elementos mais esbeltos, para aqueles com relação L/D igual a 10, os resultados obtidos em seus experimentos não apresentaram grandes diferenças considerando ou não o efeito de confinamento.

Embora a aplicabilidade das colunas mistas no processo construtivo seja atrativa e justificada pelo ganho de resistência em relação às colunas de aço ou concreto isoladamente, é possível perceber que, por se tratarem de dois materiais distintos há questões bem determinadas a serem observadas.

A escolha da geometria circular da coluna já aponta em efeitos característicos do concreto que agregam resistência à coluna, porém, as relações entre suas dimensões de projeto também afetam a maneira como o fenômeno ocorre. A interação entre os dois materiais é mais um fator determinístico do processo e nota-se que reforçar esta interação com agentes mecânicos torna-se dificultosa quando as dimensões da coluna são reduzidas.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com as normas que abordam o dimensionamento de colunas mistas, verifica-se que estas colunas podem ser analisadas basicamente de duas maneiras, seja como elementos estruturais de resistência aumentada em decorrência do trabalho conjunto com o concreto, seja como um elemento estrutural de concreto “encamisado” com uma armadura de aço diferenciada.

Haverá casos, como explica Campolina [11], em que a seção da coluna mista será reduzida à seção de aço, como a Norma Americana AISC-LRFD (1986) e casos em que será utilizado o cálculo para estruturas de concreto, como o ACI-318/92.

Enquanto o EC-4:2004 [6] faz uso da combinação de ambos os casos citados, a NBR 16239:2013 [4] trata as estruturas mistas com base no método dos estados-limites.

Os métodos de cálculo previstos no EC-4:2004 [6], tratam especificamente o Método Simplificado de Cálculo, que limita-se a estruturas mistas com seção de aço bissimétrica e uniforme ao longo do comprimento do elemento e o Método Geral de Cálculo por este considerar elementos estruturais mistos de seção transversal assimétrica ou não uniforme ao longo do comprimento do elemento.

O Método Simplificado utiliza as curvas de flambagem do EUROCODE para o dimensionamento de pilares de aço, que no caso de elementos estruturais sujeitos à compressão permite considerar, de um modo implícito, as imperfeições geométricas.

2.1 Método simplificado de cálculo

O Método Simplificado aplica-se a colunas mistas inseridas em estruturas reticuladas, nas quais os demais elementos estruturais são elementos mistos ou de aço.

Este método não se aplica unicamente a colunas mistas, mas sim a elementos estruturais mistos submetidos basicamente à compressão.

2.1.1 Fator de contribuição do aço

O dimensionamento de uma coluna mista deve atender a seguinte condição relativa à contribuição da seção de aço para a resistência total da seção transversal da coluna:

- $\delta < 0,2$ – Elemento de Concreto Armado
- $0,2 \leq \delta \leq 0,9$ – Elemento Misto de Aço e Concreto
- $\delta > 0,9$ – Elemento de Aço

Sendo δ a relação de contribuição da seção de aço estrutural, esta relação tem por objetivo garantir que o sistema estrutural seja efetivamente misto e deve ser analisada de acordo com a Equação 1.

$$\delta = \frac{A_a \times f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \quad (1)$$

As normas NBR8800:2008 [3], NBR16239:2013 [4] e EC-4:2004 [6] efetuam o cálculo do fator de contribuição de aço igualmente, considerando as mesmas variáveis, onde A_a corresponde à área da seção transversal do perfil de aço e f_{yd} corresponde à resistência de cálculo de escoamento do aço.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

O valor do esforço axial de compressão resistente de cálculo à plastificação total da seção mista, $N_{pl,Rd}$, é dado pela soma das forças axiais resistentes de cálculo de seus componentes, perfil de aço, concreto de preenchimento e armadura longitudinal, conforme a Equação 2:

$$N_{pl,Rd} = (A_a \times f_{yd}) + (A_c \times f_{cd} \times \alpha_c) + (A_s \times f_{sd}) \quad (2)$$

A_c corresponde à área da seção transversal do concreto e o coeficiente α_c é referente à tensão do concreto e deverá ser de valor igual a 0,95 para seções tubulares circulares de aço preenchidas com concreto de acordo com o item P.4 da NBR 8800:2008 [3]. A NBR 16239:2013 [4] acata as orientações da NBR 8800:2008 [3] e o EC-4:2004 [6] orienta a se considerar α_c com valor igual a 1,00 para seções tubulares circulares de aço preenchidas com concreto.

2.1.2 Flambagem local dos elementos de aço

A NBR 8800: 2008 [3] indica que, para o efeito de flambagem local, as seções tubulares mistas são analisadas de modo específico, considerando que as resistências de todos os materiais (perfil de aço, núcleo de concreto e armaduras) devem ser atingidas sem que ocorra a flambagem local dos elementos componentes do perfil de aço da seção transversal. Para isso, não pode ser ultrapassada a seguinte relação (Equação 3):

$$\lambda_{máx} = \frac{D}{t} máx \leq 0,15 \frac{E}{f_y} \quad (3)$$

A NBR 16239:2013 [4] mais uma vez segue a recomendação da NBR8800:2008 [3], entretanto o EC-4:2004 [6] indica que os efeitos de flambagem local podem ser ignorados para seções tubulares de aço preenchidas com concreto desde que se observe a seguinte condição, para o limite de esbeltez da seção mista, conforme Equação 4:

$$\lambda_{máx} = \frac{D}{t} máx = 90 \frac{235}{f_y} \quad (4)$$

2.1.3 Índice de esbeltez

As prescrições da NBR 8800:2008 prescrevem que o índice de esbeltez λ (Equação 5) é calculado em função das resistências características dos materiais e da força axial de flambagem elástica, N_e (Equação 6). A esbeltez relativa do pilar misto não pode ser maior que 2,0.

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_e}} \quad (5)$$

A força axial de flambagem elástica é dada por:

$$N_e = \frac{\pi^2 (EI)_e}{(KL)^2} \quad (6)$$

A rigidez efetiva à flexão $(EI)_e$ considera os efeitos de retração e fluência do concreto e pode ser expressa pela Equação 7:

$$(EI)_e = E_a I_a + 0,6 E_c I_c + E_s I_s \quad (7)$$

Os efeitos de retração e fluência do concreto podem ser simulados por uma redução do módulo de elasticidade do concreto E_c , onde o valor deste é substituído por $E_{c,red}$ (Equação 8).

$$E_{c,red} = \frac{E_c}{1 + \varphi \left(\frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \right)} \quad (8)$$

O coeficiente de fluência do concreto, φ deve ser obtido da NBR 6118: 2014 [12]. Simplificadamente, admite-se que esse coeficiente seja tomado igual a 2,5 nas seções total ou parcialmente revestidas com concreto e igual a zero nas seções tubulares preenchidas com concreto e que a relação entre a parcela de carregamento permanente do esforço normal, $N_{G,Ed}$, e o esforço normal de cálculo, N_{Ed} , seja igual a 0,6.

Sendo assim, percebe-se que no caso da seção mista dimensionada conforme estas orientações da NBR 8800:2008 [3], a rigidez efetiva à flexão da seção transversal perderá 40% do valor correspondente ao concreto devido às suas características, no que concerne aos efeitos da fluência e retração do mesmo.

A NBR 16239:2013 [4] diverge da NBR 8800:2008 [3] no que concerne ao cálculo da rigidez efetiva à flexão $(EI)_e$ e considera os efeitos de retração e fluência do concreto e pode ser expressa pela Equação 9:

$$(EI)_e = E_a I_a + 0,7 E_c I_c + E_s I_s \quad (9)$$

Neste caso, a rigidez efetiva à flexão da seção transversal perderá 30% do valor correspondente ao concreto devido às suas características, no que concerne aos efeitos da fluência e retração do mesmo.

Em atenção ao EC-4:2004 [6] a força axial de flambagem elástica é dada de acordo com a Equação 6, entretanto, a rigidez efetiva à flexão $(EI)_e$ é dada de acordo com a Equação 10, onde K_e é calculado baseado em estudos experimentais e tem por objetivo corrigir a rigidez de flexão do concreto para se ter em consideração a fissuração deste. Seu valor recomendado é de 0,6.

$$(EI)_e = E_a I_a + K_e E_c I_c + E_s I_s \quad (10)$$

Os efeitos de retração e fluência do concreto podem ser simulados por uma redução do módulo de elasticidade do concreto E_c , onde o valor deste é substituído por $E_{c,eff}$ (Equação 12).

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \varphi_t \left(\frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \right)} \quad (12)$$

2.1.3.1 Influência do confinamento

Para o caso de seções mistas tubulares, o EC-4:2004 [6] estabelece critérios quanto à verificação do aumento de resistência da seção em virtude do efeito do confinamento do

concreto. Neste caso, importa conhecer a excentricidade (e) aplicada ao carregamento da seção mista e o índice de esbeltez λ da mesma.

Desta forma, de acordo com o EC-4:2004 [6], para seções circulares mistas preenchidas de concreto, pode haver aumento na resistência do concreto causada em virtude do confinamento, desde que seja previsto que o índice de esbeltez relativo λ da seção não exceda 0,5 e a relação e/d seja menor que 0,1.

A relação e/d é especificada pela excentricidade do carregamento, dada por M_{Ed}/N_{Ed} e d , que corresponde ao diâmetro externo da seção da coluna. A resistência plástica à compressão deve ser calculada de acordo com a Equação 13.

$$N_{pl,Rd} = \eta_a A_a f_{yd} + A_c f_{cd} \left(1 + \eta_c \frac{t f_y}{d f_{ck}} \right) + A_s f_{sd} \quad (13)$$

Onde t é a espessura da parede do tubo da seção de aço e η_a e η_c obedecem o seguinte:

- a) Para elementos em que a excentricidade é zero, $e=0$ e os valores de $\eta_a=\eta_{a0}$ e $\eta_c=\eta_{c0}$ são dados pela Equação 14 e pela Equação 15.

$$\eta_{a0} = 0,25 (3+2\lambda) \text{ mas } \eta_{a0} < 1,0 \quad (14)$$

$$\eta_{c0} = 4,9 - 18,5\lambda + 17\lambda^2 \text{ mas } \eta_{c0} > 0 \quad (15)$$

- b) Para elementos sujeitos à combinação de compressão e momento, com $0 < e/d < 0,1$, os valores de η_{a0} e η_{c0} devem ser determinados pela Equação 16 e Equação 17, onde η_a e η_c são dados pela Equação 14 e Equação 15, respectivamente:

$$\eta_a = \eta_{a0} + (1 - \eta_{a0}) (10 e/d) \quad (16)$$

$$\eta_c = \eta_{c0} (1 - 10 e/d) \quad (17)$$

Para e/d maior que 0,1, $\eta_a = 1,0$ e $\eta_c = 0$.

2.1.4 Índice de esbeltez

O fator de redução associado à compressão χ é dado em função do índice de esbeltez λ , ou seja, a esbeltez da coluna mista influencia diretamente na resistência do elemento estrutural. A NBR 8800:2008 [3] estabelece que este fator de redução obedece aos mesmos limites aplicados para elementos de aço sujeitos à força axial de compressão. Sejam eles (Equação 18 e 19):

$$\lambda_{0,m} \leq 1,50: \quad \chi = 0,658 \lambda_0^2 \quad (18)$$

$$\lambda_{0,m} > 1,50: \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (19)$$

Onde os valores de χ também podem ser obtidos por meio da curva de flambagem ou por meio de tabela, ambas apresentadas na norma, para os casos em que λ não exceda 3,0.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

A NBR 16239:2013 [4] estabelece que o cálculo do fator de redução χ , que é próprio para as seções tubulares de aço, também pode ser obtido por meio de curva de flambagem associada a esta norma, conforme a Equação 20.

$$\chi = \frac{1}{(1 + \lambda_0^{4,48})^{1/2,24}} \quad (20)$$

Os valores de χ de acordo com o EC-4:2004 [6] obedecem a Equação 21.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (21)$$

Onde ϕ está associado ao fator de imperfeição α correspondente à curva de flambagem apropriada à seção transversal, conforme a Equação 22.

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (22)$$

Diferentemente das duas normas brasileiras, o EC-4:2004 [6] considera duas curvas de flambagem para o cálculo do fator de redução. Considera-se as duas curvas baseado na relação entre a armadura de aço e a seção de concreto. Enquanto as seções mistas tiverem uma seção de armadura de aço inferior a 3% da área do concreto, a norma indica a utilização da curva a, onde $\alpha=0,31$ e caso esta seção de armadura de aço varie a partir de 3% da área do concreto até 6% desta área, a norma indica a utilização da curva b, onde $\beta=0,34$.

O EC-4:2004[6] não recomenda a utilização de seções de armadura superiores a 6%, assim como as normas brasileiras NBR 8800:2008 [3] e NBR 16239:2013 [4] não recomendam a utilização de seções de armadura superiores a 4%.

Uma vez que as normas citadas para o comparativo de dimensionamento de colunas mistas sujeitas à compressão utilizam-se de curvas de flambagem e parâmetros de dimensionamento similares, é possível sobrepor as curvas a fim de que se possa visualizar a projeção dos resultados obtidos analiticamente.

Entretanto, atenta-se para o dimensionamento dos perfis tubulares de aço isolado, que também se utiliza das mesmas curvas de flambagem. Para tanto é preciso observar que a NBR 8800: 2008 [3] difere-se do EC-3: 2007 [5], pois os coeficientes de ponderação das resistências relativos ao escoamento, flambagem e instabilidade, γ_m , são diferentes entre estas normas. Enquanto a NBR 8800: 2008 [3] utiliza um coeficiente γ_{a1} igual a 1,10, o EC-3: 2007 [5] utiliza um coeficiente γ_{M1} igual a 1,00.

A sobreposição das curvas não reflete esta condição diretamente, porém, ao se conflitarem os resultados analíticos pertinentes ao dimensionamento de pilares mistos e pilares de aço, é importante observar que haverá uma redução do valor permitido para o esforço normal atuante se o dimensionamento do perfil de aço for feito pela norma brasileira em comparação à norma europeia.

Outro ponto a ser observado é que o valor indicado para o módulo de elasticidade apresentado na NBR 8800: 2008 [3] também difere do EC-3: 2007 [5]. Enquanto na NBR 8800:2008 [3] utiliza-se um módulo de elasticidade do aço igual a 200000 MPa, no EC-3:2005 [5] utiliza-se módulo de elasticidade do aço igual a 210000 MPa.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Desta forma, apresenta-se um breve resumo no Quadro 1, correspondente às condições mencionadas.

Normas Aplicadas	Elementos de Aço		Elementos Mistos
NBR 8800	$\gamma_{a1}=1,10$	$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}}$	$N_{Rd} = \chi N_{pl,Rd}$
NBR 16239	$\gamma_{a1}=1,10$	$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}}$	$N_{Rd} = \chi N_{pl,Rd}$
Eurocode 3	$\gamma_{M1}=1,00$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$	Não aplicável
Eurocode 4	Não aplicável		$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1,0$

Quadro 1: Resumo comparativo das normas.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 3, verifica-se a sobreposição das curvas de flambagem das seguintes normas: NBR 8800: 2008 [3], NBR 16239: 2013 [4], EC-3: 2007 [5] e EC-4: 2007 [6].

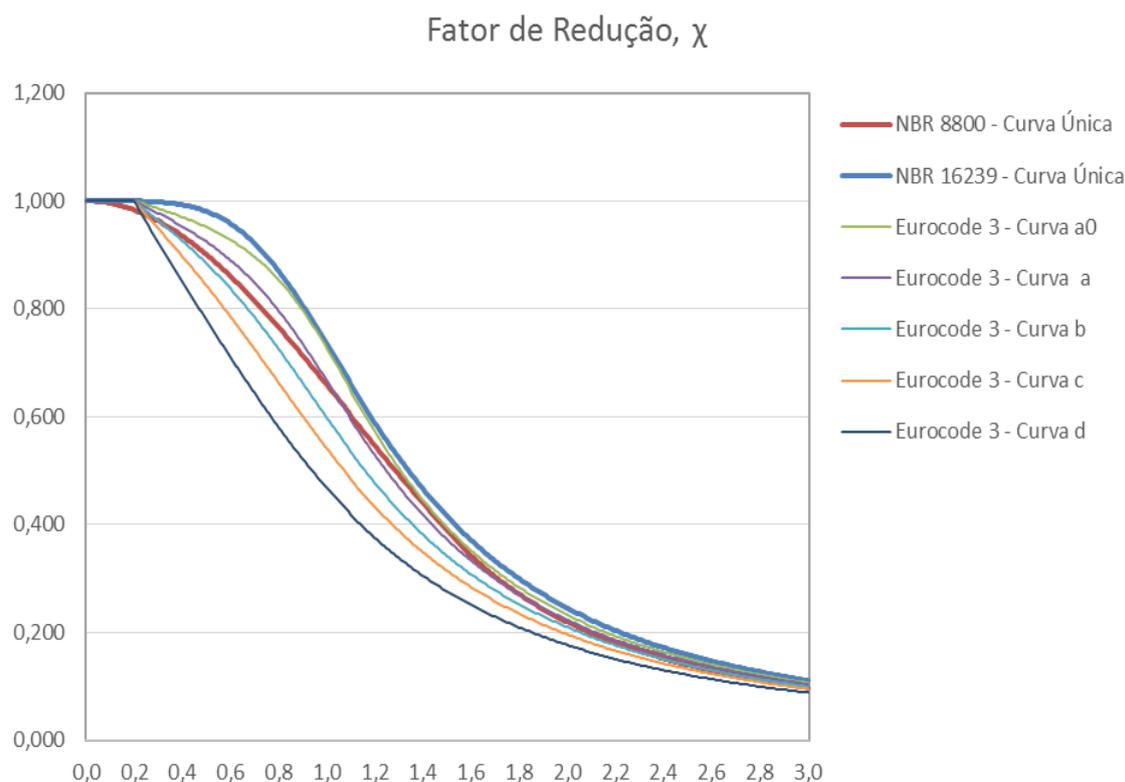


Figura 3: Sobreposição das curvas de flambagem.

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2 Modelo adotado

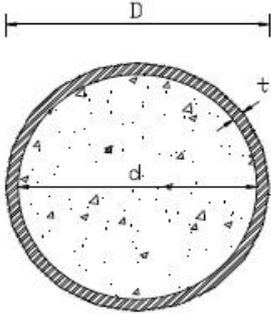
Estabelecidas as premissas norteadas pelas normas ora informadas, determina-se um perfil circular tubular de aço como parâmetro de estudo. Inicialmente aponta-se um perfil tubular circular aço ASTM A500 grau B, com costura com 158,8 mm de diâmetro (D) e 9,50 mm de espessura de parede (t).

De acordo com os dados do Quadro 2 é possível verificar se o perfil misto utilizado como objeto de análise se comporta efetivamente como um elemento estrutural misto. Uma vez determinada esta condição, aplica-se o método a fim de se verificar a distribuição do esforço atuante sobre a seção transversal mista, assim como as parcelas do carregamento suportadas pelas seções de aço e de concreto.

O comprimento da coluna mista variará entre 500 mm e 4500mm para que sejam feitos os cálculos segundo as normas citadas.

A fim de que os resultados obtidos sejam abordados de modo mais amplo, será considerada a porcentagem referente à armadura de aço variando dentro dos limites estabelecidos em cada norma: 0% a 4% de acordo com as normas brasileiras e de 0% a 3% e 3% a 6% segundo a norma europeia.

Propriedades do Aço ASTM A500	
Tensão de Escoamento, f_y	290 MPa
Tensão Última, f_u	400 MPa
Módulo de Elasticidade, E_a - NBR	210 GPa
Módulo de Elasticidade, E_a - EC	200 GPa
Diâmetro	158,80 mm
Espessura	9,50 mm
Área	4455,88 mm ²
Propriedades do Concreto	
Resistência Característica, f_{ck}	30 MPa
Resistência à Compressão, f_{cd}	20 MPa
Módulo de Elasticidade, E_c	33GPa
Diâmetro	139,80 mm
Área	14368,11 mm ²



Quadro 2: Propriedades dos materiais.

Fonte: Elaborado pelos autores.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação entre os resultados obtidos considera a variação do comprimento da coluna mista de 500 mm até 4500 mm e gera para cada variação de comprimento uma curva que expressa a carga suportada pela coluna conforme a norma.

Foram desenvolvidas tabelas variando o comprimento da coluna para os seguintes casos:

- NBR 8800:2008 – 0% de armadura de aço
- NBR 8800:2008 – 4% de armadura de aço
- NBR 16239:2013 – 0% de armadura de aço
- NBR 16239:2013 – 4% de armadura de aço
- EC-4:2004 – 0% de armadura de aço
- EC-4:2004 – 0% a 3% de armadura de aço
- EC-4:2004 – 3% a 6% de armadura de aço

Cada curva está associada a uma condição de taxa de armadura e o comprimento 1950 mm indica o ponto onde se encerra a consideração do confinamento sobre a resistência da coluna, ou seja, a partir deste comprimento a esbeltez é maior que 0,5.

Os resultados obtidos pela variação de comprimento estão expressos no Quadro 3 ao Quadro 9.

D	t	D/t	L	L/D	A _c	A _s	A _g /A _c	Curva	N _{G,Ed}	N _{Ed}	N _{G,Ed} /N _{Ed}	φ _t	e/d	λ	δ	X	N _{pl}	N _{pl,RK}	N _{Ed}
158,8	9,5	16,72	500	3,1	15349,85	0,00	0,00	---	540	900	0,6	2,5	0	0,128	0,82	0,99	1583,85	1729,68	1573,74
			500,0	3,1										0,128	0,82	0,99	1583,85	1729,68	1573,74
			600,0	3,8										0,154	0,82	0,99	1583,85	1729,68	1569,32
			700,0	4,4										0,179	0,82	0,99	1583,85	1729,68	1564,10
			800,0	5,0										0,205	0,82	0,98	1583,85	1729,68	1558,11
			900,0	5,7										0,231	0,82	0,98	1583,85	1729,68	1551,34
			1000,0	6,3										0,256	0,82	0,97	1583,85	1729,68	1543,81
			1100,0	6,9										0,282	0,82	0,97	1583,85	1729,68	1535,53
			1200,0	7,6										0,308	0,82	0,96	1583,85	1729,68	1526,51
			1300,0	8,2										0,333	0,82	0,95	1583,85	1729,68	1516,77
			1400,0	8,8										0,359	0,82	0,95	1583,85	1729,68	1506,32
			1500,0	9,4										0,384	0,82	0,94	1583,85	1729,68	1495,17
			1600,0	10,1										0,410	0,82	0,93	1583,85	1729,68	1483,35
			1700,0	10,7										0,436	0,82	0,92	1583,85	1729,68	1470,87
			1800,0	11,3										0,461	0,82	0,91	1583,85	1729,68	1457,74
			1900,0	12,0										0,487	0,82	0,91	1583,85	1729,68	1444,00
			2000,0	12,6										0,513	0,82	0,90	1583,85	1729,68	1429,65
			2100,0	13,2										0,538	0,82	0,89	1583,85	1729,68	1414,71
			2200,0	13,9										0,564	0,82	0,88	1583,85	1729,68	1399,22
			2300,0	14,5										0,589	0,82	0,86	1583,85	1729,68	1383,19
			2400,0	15,1										0,615	0,82	0,85	1583,85	1729,68	1366,64
158,8	9,5	16,72	2500,0	15,7	15349,85	0,00	0,00	única	540	900	0,6	0	0	0,641	0,82	0,84	1583,85	1729,68	1349,60
			2600,0	16,4										0,666	0,82	0,83	1583,85	1729,68	1332,09
			2700,0	17,0										0,692	0,82	0,82	1583,85	1729,68	1314,13
			2800,0	17,6										0,718	0,82	0,81	1583,85	1729,68	1295,75
			2900,0	18,3										0,743	0,82	0,79	1583,85	1729,68	1276,98
			3000,0	18,9										0,769	0,82	0,78	1583,85	1729,68	1257,83
			3100,0	19,5										0,794	0,82	0,77	1583,85	1729,68	1238,33
			3200,0	20,2										0,820	0,82	0,75	1583,85	1729,68	1218,51
			3300,0	20,8										0,846	0,82	0,74	1583,85	1729,68	1198,40
			3400,0	21,4										0,871	0,82	0,73	1583,85	1729,68	1178,01
			3500,0	22,0										0,897	0,82	0,71	1583,85	1729,68	1157,38
			3600,0	22,7										0,923	0,82	0,70	1583,85	1729,68	1136,53
			3700,0	23,3										0,948	0,82	0,69	1583,85	1729,68	1115,48
			3800,0	23,9										0,974	0,82	0,67	1583,85	1729,68	1094,26
			3900,0	24,6										0,999	0,82	0,66	1583,85	1729,68	1072,89
			4000,0	25,2										1,025	0,82	0,64	1583,85	1729,68	1051,41
			4100,0	25,8										1,051	0,82	0,63	1583,85	1729,68	1029,82
			4200,0	26,4										1,076	0,82	0,62	1583,85	1729,68	1008,16
			4300,0	27,1										1,102	0,82	0,60	1583,85	1729,68	986,46
			4400,0	27,7										1,128	0,82	0,59	1583,85	1729,68	964,72
			4500,0	28,3										1,153	0,82	0,57	1583,85	1729,68	942,98

Quadro 3: Resultados obtidos para NBR 8800:2008 – Taxa de Armadura 0%.

Fonte: Elaborado pelos autores.

D	t	D/t	L	L/D	A _c	A _s	A _g /A _c	Curva	N _{G,Ed}	N _{Ed}	N _{G,Ed} /N _{Ed}	φ _t	e/d	λ	δ	X	N _{pl}	N _{pl,RK}	N _{Ed}
158,8	9,5	16,72	500	3,1	14721,53	588,86	0,04		540	900	0,6	2,5	0	0,138	0,71	0,99	1827,94	2006,20	1815,06
			500,0	3,1										0,138	0,71	0,99	1827,94	2006,20	1815,06
			600,0	3,8										0,165	0,71	0,99	1827,94	2006,20	1809,42
			700,0	4,4										0,193	0,71	0,98	1827,94	2006,20	1802,78
			800,0	5,0										0,220	0,71	0,98	1827,94	2006,20	1795,15
			900,0	5,7										0,248	0,71	0,97	1827,94	2006,20	1786,54
			1000,0	6,3										0,275	0,71	0,97	1827,94	2006,20	1776,97
			1100,0	6,9										0,303	0,71	0,96	1827,94	2006,20	1766,45
			1200,0	7,6										0,330	0,71	0,96	1827,94	2006,20	1755,00
			1300,0	8,2										0,358	0,71	0,95	1827,94	2006,20	1742,63
			1400,0	8,8										0,386	0,71	0,94	1827,94	2006,20	1729,38
			1500,0	9,4										0,413	0,71	0,93	1827,94	2006,20	1715,25
			1600,0	10,1										0,441	0,71	0,92	1827,94	2006,20	1700,28
			1700,0	10,7										0,468	0,71	0,91	1827,94	2006,20	1684,48
			1800,0	11,3										0,496	0,71	0,90	1827,94	2006,20	1667,89
			1900,0	12,0										0,523	0,71	0,89	1827,94	2006,20	1650,53
			2000,0	12,6										0,551	0,71	0,88	1827,94	2006,20	1632,43
			2100,0	13,2										0,578	0,71	0,87	1827,94	2006,20	1613,61
			2200,0	13,9										0,606	0,71	0,86	1827,94	2006,20	1594,11
			2300,0	14,5										0,633	0,71	0,85	1827,94	2006,20	1573,95
			2400,0	15,1										0,661	0,71	0,83	1827,94	2006,20	1553,17
158,8	9,5	16,72	2500,0	15,7	14721,53	588,86	0,04	única	540	900	0,6	0	0	0,689	0,71	0,82	1827,94	2006,20	1531,79
			2600,0	16,4										0,716	0,71	0,81	1827,94	2006,20	1509,86
			2700,0	17,0										0,744	0,71	0,79	1827,94	2006,20	1487,39
			2800,0	17,6										0,771	0,71	0,78	1827,94	2006,20	1464,44
			2900,0	18,3										0,799	0,71	0,77	1827,94	2006,20	1441,02
			3000,0	18,9										0,826	0,71	0,75	1827,94	2006,20	1417,18
			3100,0	19,5										0,854	0,71	0,74	1827,94	2006,20	1392,94
			3200,0	20,2										0,881	0,71	0,72	1827,94	2006,20	1368,34
			3300,0	20,8										0,909	0,71	0,71	1827,94	2006,20	1343,42
			3400,0	21,4										0,936	0,71	0,69	1827,94	2006,20	1318,20
			3500,0	22,0										0,964	0,71	0,68	1827,94	2006,20	1292,73
			3600,0	22,7										0,991	0,71	0,66	1827,94	2006,20	1267,03
			3700,0	23,3										1,019	0,71	0,65	1827,94	2006,20	1241,14
			3800,0	23,9										1,047	0,71	0,63	1827,94	2006,20	1215,09
			3900,0	24,6										1,074	0,71	0,62	1827,94	2006,20	1188,92
			4000,0	25,2										1,102	0,71	0,60	1827,94	2006,20	1162,65
			4100,0	25,8										1,129	0,71	0,59	1827,94	2006,20	1136,32
			4200,0	26,4										1,157	0,71	0,57	1827,94	2006,20	1109,96
			4300,0	27,1										1,184	0,71	0,56	1827,94	2006,20	1083,60
			4400,0	27,7										1,212	0,71	0,54	1827,94	2006,20	1057,26
			4500,0	28,3										1,239	0,71	0,53	1827,94	2006,20	1030,98

Quadro 4: Resultados obtidos para NBR 8800:2008 – Taxa de Armadura 4%.

Fonte: Elaborado pelos autores.

D	t	D/t	L	L/D	A _c	A _s	A _g /A _c	Curva	N _{G,Ed}	N _{Ed}	N _{G,Ed} /N _{Ed}	φ _t	e/d	λ	δ	X	N _{pl}	N _{pl,RK}	N _{Ed}
158,8	9,5	16,72	500	3,1	15349,85	0,00	0,00	---	540	900	0,6	2,5	0	0,125	0,82	1,00	1583,85	1729,68	1583,79
			500,0	3,1										0,125	0,82	1,00	1583,85	1729,68	1583,79
			600,0	3,8										0,150	0,82	1,00	1583,85	1729,68	1583,72
			700,0	4,4										0,175	0,82	1,00	1583,85	1729,68	1583,59
			800,0	5,0										0,200	0,82	1,00	1583,85	1729,68	1583,38
			900,0	5,7										0,225	0,82	1,00	1583,85	1729,68	1583,05
			1000,0	6,3										0,250	0,82	1,00	1583,85	1729,68	1582,56
			1100,0	6,9										0,275	0,82	1,00	1583,85	1729,68	1581,88
			1200,0	7,6										0,300	0,82	1,00	1583,85	1729,68	1580,94
			1300,0	8,2										0,325	0,82	1,00	1583,85	1729,68	1579,69
			1400,0	8,8										0,350	0,82	1,00	1583,85	1729,68	1578,06
			1500,0	9,4										0,375	0,82	0,99	1583,85	1729,68	1575,98
			1600,0	10,1										0,400	0,82	0,99	1583,85	1729,68	1573,37
			1700,0	10,7										0,425	0,82	0,99	1583,85	1729,68	1570,14
			1800,0	11,3										0,450	0,82	0,99	1583,85	1729,68	1566,21
			1900,0	12,0										0,475	0,82	0,98	1583,85	1729,68	1561,49
			2000,0	12,6										0,500	0,82	0,98	1583,85	1729,68	1555,88
			2100,0	13,2										0,524	0,82	0,98	1583,85	1729,68	1549,28
			2200,0	13,9										0,549	0,82	0,97	1583,85	1729,68	1541,61
			2300,0	14,5										0,574	0,82	0,96	1583,85	1729,68	1532,79
			2400,0	15,1										0,599	0,82	0,96	1583,85	1729,68	1522,72
158,8	9,5	16,72	2500,0	15,7	15349,85	0,00	0,00	única	540	900	0,6	0	0	0,624	0,82	0,95	1583,85	1729,68	1511,35
			2600,0	16,4										0,649	0,82	0,94	1583,85	1729,68	1498,61
			2700,0	17,0										0,674	0,82	0,93	1583,85	1729,68	1484,46
			2800,0	17,6										0,699	0,82	0,92	1583,85	1729,68	1468,89
			2900,0	18,3										0,724	0,82	0,91	1583,85	1729,68	1451,87
			3000,0	18,9										0,749	0,82	0,90	1583,85	1729,68	1433,43
			3100,0	19,5										0,774	0,82	0,88	1583,85	1729,68	1413,60
			3200,0	20,2										0,799	0,82	0,87	1583,85	1729,68	1392,44
			3300,0	20,8										0,824	0,82	0,85	1583,85	1729,68	1370,01
			3400,0	21,4										0,849	0,82	0,84	1583,85	1729,68	1346,40
			3500,0	22,0										0,874	0,82	0,82	1583,85	1729,68	1321,73
			3600,0	22,7										0,899	0,82	0,81	1583,85	1729,68	1296,11
			3700,0	23,3										0,924	0,82	0,79	1583,85	1729,68	1269,67
			3800,0	23,9										0,949	0,82	0,77	1583,85	1729,68	1242,55
			3900,0	24,6										0,974	0,82	0,75	1583,85	1729,68	1214,87
			4000,0	25,2										0,999	0,82	0,73	1583,85	1729,68	1186,78
			4100,0	25,8										1,024	0,82	0,72	1583,85	1729,68	1158,41
			4200,0	26,4										1,049	0,82	0,70	1583,85	1729,68	1129,89
			4300,0	27,1										1,074	0,82	0,68	1583,85	1729,68	1101,34
			4400,0	27,7										1,099	0,82	0,66	1583,85	1729,68	1072,87
			4500,0	28,3										1,124	0,82	0,64	1583,85	1729,68	1044,60

Quadro 5: Resultados obtidos para NBR 16239:2013 – Taxa de Armadura 0%.

Fonte: Elaborado pelos autores.

D	t	D/t	L	L/D	A _c	A _s	A _g /A _c	Curva	N _{G,Ed}	N _{Ed}	N _{G,Ed} /N _{Ed}	φ _t	e/d	λ	δ	X	N _{pl}	N _{pl,RK}	N _{Ed}
158,8	9,5	16,72	500	3,1	14721,53	588,86	0,04		540	900	0,6	2,5	0	0,135	0,71	1,00	1827,94	2006,20	1827,86
			500,0	3,1										0,135	0,71	1,00	1827,94	2006,20	1827,86
			600,0	3,8										0,162	0,71	1,00	1827,94	2006,20	1827,75
			700,0	4,4										0,189	0,71	1,00	1827,94	2006,20	1827,56
			800,0	5,0										0,215	0,71	1,00	1827,94	2006,20	1827,25
			900,0	5,7										0,242	0,71	1,00	1827,94	2006,20	1826,78
			1000,0	6,3										0,269	0,71	1,00	1827,94	2006,20	1826,08
			1100,0	6,9										0,296	0,71	1,00	1827,94	2006,20	1825,08
			1200,0	7,6										0,323	0,71	1,00	1827,94	2006,20	1823,73
			1300,0	8,2										0,350	0,71	1,00	1827,94	2006,20	1821,92
			1400,0	8,8										0,377	0,71	0,99	1827,94	2006,20	1819,57
			1500,0	9,4										0,404	0,71	0,99	1827,94	2006,20	1816,57
			1600,0	10,1										0,431	0,71	0,99	1827,94	2006,20	1812,81
			1700,0	10,7										0,458	0,71	0,99	1827,94	2006,20	1808,17
			1800,0	11,3										0,485	0,71	0,98	1827,94	2006,20	1802,52
			1900,0	12,0										0,512	0,71	0,98	1827,94	2006,20	1795,76
			2000,0	12,6										0,539	0,71	0,97	1827,94	2006,20	1787,73
			2100,0	13,2										0,566	0,71	0,97	1827,94	2006,20	1778,34
			2200,0	13,9										0,593	0,71	0,96	1827,94	2006,20	1767,45
			2300,0	14,5										0,619	0,71	0,95	1827,94	2006,20	1754,98
			2400,0	15,1										0,646	0,71	0,94	1827,94	2006,20	1740,81
158,8	9,5	16,72	2500,0	15,7	14721,53	588,86	0,04	única	540	900	0,6	0	0	0,673	0,71	0,93	1827,94	2006,20	1724,89
			2600,0	16,4										0,700	0,71	0,92	1827,94	2006,20	1707,16
			2700,0	17,0										0,727	0,71	0,91	1827,94	2006,20	1687,60
			2800,0	17,6										0,754	0,71	0,89	1827,94	2006,20	1666,20
			2900,0	18,3										0,781	0,71	0,88	1827,94	2006,20	1643,00
			3000,0	18,9										0,808	0,71	0,86	1827,94	2006,20	1618,06
			3100,0	19,5										0,835	0,71	0,85	1827,94	2006,20	1591,46
			3200,0	20,2										0,862	0,71	0,83	1827,94	2006,20	1563,32
			3300,0	20,8										0,889	0,71	0,81	1827,94	2006,20	1533,76
			3400,0	21,4										0,916	0,71	0,79	1827,94	2006,20	1502,95
			3500,0	22,0										0,943	0,71	0,78	1827,94	2006,20	1471,05
			3600,0	22,7										0,970	0,71	0,76	1827,94	2006,20	1438,24
			3700,0	23,3										0,997	0,71	0,74	1827,94	2006,20	1404,70
			3800,0	23,9										1,023	0,71	0,72	1827,94	2006,20	1370,63
			3900,0	24,6										1,050	0,71	0,70	1827,94	2006,20	1336,19
			4000,0	25,2										1,077	0,71	0,68	1827,94	2006,20	1301,56
			4100,0	25,8										1,104	0,71	0,66	1827,94	2006,20	1266,91
			4200,0	26,4										1,131	0,71	0,64	1827,94	2006,20	1232,38
			4300,0	27,1										1,158	0,71	0,62	1827,94	2006,20	1198,11
			4400,0	27,7										1,185	0,71	0,60	1827,94	2006,20	1164,23
			4500,0	28,3										1,212	0,71	0,58	1827,94	2006,20	1130,83

Quadro 6: Resultados obtidos para NBR 16239:2013 – Taxa de Armadura 4%.

Fonte: Elaborado pelos autores.

D	t	D/t	L	L/D	A _c	A _s	A _g /A _c	Curva	N _{G,Ed}	N _{Ed}	N _{G,Ed} /N _{Ed}	φ _t	e/d	λ	δ	X	N _{pl}	N _{pl,RK}	N _{Ed}
158,8	9,5	16,72	500	3,1	15349,85	0,00	0,00	0,21	540	900	0,6	2,5	0	0,144	0,81	1,01	1860,28	2264,91	1860,28
			500,0	3,1										0,144	0,81	1,01	1860,28	2264,91	1860,28
			600,0	3,8										0,170	0,81	1,01	1814,74	2188,43	1814,74
			700,0	4,4										0,195	0,81	1,00	1773,09	2117,76	1773,09
			800,0	5,0										0,219	0,81	1,00	1735,30	2052,89	1727,92
			900,0	5,7										0,243	0,81	0,99	1701,39	1993,85	1685,15
			1000,0	6,3										0,267	0,81	0,99	1671,36	1940,61	1646,59
			1100,0	6,9										0,290	0,81	0,98	1645,20	1893,19	1612,13
			1200,0	7,6										0,313	0,81	0,97	1622,92	1851,58	1581,62
			1300,0	8,2										0,335	0,81	0,97	1604,51	1815,78	1554,94
			1400,0	8,8										0,358	0,81	0,96	1589,97	1785,79	1531,96
			1500,0	9,4										0,381	0,81	0,96	1579,31	1761,62	1512,53
			1600,0	10,1										0,404	0,81	0,95	1572,53	1743,26	1496,50
			1700,0	10,7										0,428	0,81	0,95	1569,62	1730,71	1483,70
			1800,0	11,3										0,452	0,81	0,94	1570,82	1724,31	1474,13
			1900,0	12,0										0,480	0,81	0,93	1587,19	1740,68	1476,79
			2000,0	12,6										0,507	0,81	0,92	1599,20	1752,70	1474,73
			2100,0	13,2										0,532	0,81	0,91	1599,20	1752,70	1461,69
			2200,0	13,9										0,557	0,81	0,91	1599,20	1752,70	1447,98
			2300,0	14,5										0,583	0,81	0,90	1599,20	1752,70	1433,55
			2400,0	15,1										0,608	0,81	0,89	1599,20	1752,70	1418,34
158,8	9,5	16,72	2500,0	15,7	15349,85	0,00	0,00	0,21	540	900	0,6	2,5	0	0,633	0,81	0,88	1599,20	1752,70	1402,29
			2600,0	16,4										0,659	0,81	0,87	1599,20	1752,70	1385,34
			2700,0	17,0										0,684	0,81	0,86	1599,20	1752,70	1367,45
			2800,0	17,6										0,709	0,81	0,84	1599,20	1752,70	1348,55
			2900,0	18,3										0,735	0,81	0,83	1599,20	1752,70	1328,63
			3000,0	18,9										0,760	0,81	0,82	1599,20	1752,70	1307,66
			3100,0	19,5										0,785	0,81	0,80	1599,20	1752,70	1285,62
			3200,0	20,2										0,811	0,81	0,79	1599,20	1752,70	1262,54
			3300,0	20,8										0,836	0,81	0,77	1599,20	1752,70	1238,46
			3400,0	21,4										0,861	0,81	0,76	1599,20	1752,70	1213,42
			3500,0	22,0										0,887	0,81	0,74	1599,20	1752,70	1187,53
			3600,0	22,7										0,912	0,81	0,73	1599,20	1752,70	1160,87
			3700,0	23,3										0,937	0,81	0,71	1599,20	1752,70	1133,58
			3800,0	23,9										0,963	0,81	0,69	1599,20	1752,70	1105,80
			3900,0	24,6										0,988	0,81	0,67	1599,20	1752,70	1077,67
			4000,0	25,2										1,013	0,81	0,66	1599,20	1752,70	1049,35
			4100,0	25,8										1,039	0,81	0,64	1599,20	1752,70	1020,99
			4200,0	26,4										1,064	0,81	0,62	1599,20	1752,70	992,72
			4300,0	27,1										1,089	0,81	0,60	1599,20	1752,70	964,68
			4400,0	27,7										1,115	0,81	0,59	1599,20	1752,70	936,98
			4500,0	28,3										1,140	0,81	0,57	1599,20	1752,70	909,72

Quadro 7: Resultados obtidos para EC-4:2004 – Taxa de Armadura 0%.

Fonte: Elaborado pelos autores.

D	t	D/t	L	L/D	A _c	A _s	A _g /A _c	Curva	N _{G,Ed}	N _{Ed}	N _{G,Ed} /N _{Ed}	φ _t	e/d	λ	δ	X	N _{pl}	N _{pl,RK}	N _{Ed}
158,8	9,5	16,72	500	3,1	14947,73	402,12	0,03	0,21	540	900	0,6	2,5	0	0,146	0,73	1,01	2006,60	2421,89	2006,60
			500,0	3,1										0,146	0,73	1,01	2006,60	2421,89	2006,60
			600,0	3,8										0,172	0,73	1,01	1961,96	2346,48	1961,96
			700,0	4,4										0,198	0,73	1,00	1921,35	2277,11	1921,35
			800,0	5,0										0,223	0,73	0,99	1884,75	2213,77	1875,06
			900,0	5,7										0,248	0,73	0,99	1852,18	2156,46	1832,49
			1000,0	6,3										0,272	0,73	0,98	1823,62	2105,18	1794,23
			1100,0	6,9										0,296	0,73	0,98	1799,09	2059,93	1760,15
			1200,0	7,6										0,320	0,73	0,97	1778,57	2020,71	1730,09
			1300,0	8,2										0,344	0,73	0,97	1762,08	1987,52	1703,91
			1400,0	8,8										0,368	0,73	0,96	1749,60	1960,36	1681,46
			1500,0	9,4										0,392	0,73	0,95	1741,15	1939,23	1662,57
			1600,0	10,1										0,417	0,73	0,95	1736,71	1924,13	1647,07
			1700,0	10,7										0,442	0,73	0,94	1736,30	1915,06	1634,75
			1800,0	11,3										0,468	0,73	0,93	1747,09	1922,79	1631,42
			1900,0	12,0										0,497	0,73	0,93	1763,98	1939,69	1632,24
			2000,0	12,6										0,523	0,73	0,92	1766,00	1941,70	1619,36
			2100,0	13,2										0,549	0,73	0,91	1766,00	1941,70	1604,00
			2200,0	13,9										0,575	0,73	0,90	1766,00	1941,70	1587,81
			2300,0	14,5										0,601	0,73	0,89	1766,00	1941,70	1570,73
			2400,0	15,1										0,628	0,73	0,88	1766,00	1941,70	1552,67
158,8	9,5	16,72	2500,0	15,7	14947,73	402,12	0,03	0,21	540	900	0,6	2,5	0	0,654	0,73	0,87	1766,00	1941,70	1533,58
			2600,0	16,4										0,680	0,73	0,86	1766,00	1941,70	1513,38
			2700,0	17,0										0,706	0,73	0,84	1766,00	1941,70	1492,02
			2800,0	17,6										0,732	0,73	0,83	1766,00	1941,70	1469,44
			2900,0	18,3										0,758	0,73	0,82	1766,00	1941,70	1445,64
			3000,0	18,9										0,785	0,73	0,80	1766,00	1941,70	1420,58
			3100,0	19,5										0,811	0,73	0,79	1766,00	1941,70	1394,30
			3200,0	20,2										0,837	0,73	0,77	1766,00	1941,70	1366,83
			3300,0	20,8										0,863	0,73	0,76	1766,00	1941,70	1338,25
			3400,0	21,4										0,889	0,73	0,74	1766,00	1941,70	1308,66
			3500,0	22,0										0,915	0,73	0,72	1766,00	1941,70	1278,20
			3600,0	22,7										0,941	0,73	0,71	1766,00	1941,70	1247,00
			3700,0	23,3										0,968	0,73	0,69	1766,00	1941,70	1215,26
			3800,0	23,9										0,994	0,73	0,67	1766,00	1941,70	1183,14
			3900,0	24,6										1,020	0,73	0,65	1766,00	1941,70	1150,83
			4000,0	25,2										1,046	0,73	0,63	1766,00	1941,70	1118,52
			4100,0	25,8										1,072	0,73	0,62	1766,00	1941,70	1086,36
			4200,0	26,4										1,098	0,73	0,60	1766,00	1941,70	1054,51
			4300,0	27,1										1,125	0,73	0,58	1766,00	1941,70	1023,11
			4400,0	27,7										1,151	0,73	0,56	1766,00	1941,70	992,28
			4500,0	28,3										1,177	0,73	0,54	1766,00	1941,70	962,10

Quadro 8: Resultados obtidos para EC-4:2004 – Taxa de Armadura 0% a 3%.

Fonte: Elaborado pelos autores.

D	t	D/t	L	L/D	A _c	A _s	A _g /A _c	Curva	N _{G,Ed}	N _{Ed}	N _{G,Ed} /N _{Ed}	φ _t	e/d	λ	δ	X	N _{pl}	N _{pl,RK}	N _{Ed}
158,8	9,5	16,72	500	3,1	14368,11	862,09	0,06	0,34	540	900	0,6	2,5	0	0,148	0,66	1,02	2169,62	2595,11	2169,62
			500,0	3,1										0,148	0,66	1,02	2169,62	2595,11	2169,62
			600,0	3,8										0,175	0,66	1,01	2126,74	2522,08	2126,74
			700,0	4,4										0,201	0,66	1,00	2087,96	2455,21	2086,87
			800,0	5,0										0,227	0,66	0,99	2053,30	2394,51	2033,34
			900,0	5,7										0,253	0,66	0,98	2022,74	2339,96	1984,66
			1000,0	6,3										0,278	0,66	0,97	1996,29	2291,57	1940,59
			1100,0	6,9										0,303	0,66	0,96	1973,95	2249,35	1900,89
			1200,0	7,6										0,328	0,66	0,95	1955,71	2213,29	1865,30
			1300,0	8,2										0,353	0,66	0,94	1941,58	2183,38	1833,59
			1400,0	8,8										0,378	0,66	0,93	1931,56	2159,64	1805,51
			1500,0	9,4										0,403	0,66	0,92	1925,65	2142,06	1780,79
			1600,0	10,1										0,429	0,66	0,91	1923,84	2130,64	1759,15
			1700,0	10,7										0,455	0,66	0,90	1927,47	2127,38	1741,33
			1800,0	11,3										0,484	0,66	0,89	1944,89	2144,80	1733,16
			1900,0	12,0										0,512	0,66	0,88	1954,39	2154,29	1717,40
			2000,0	12,6										0,539	0,66	0,87	1954,39	2154,29	1693,31
			2100,0	13,2										0,566	0,66	0,85	1954,39	2154,29	1668,40
			2200,0	13,9										0,593	0,66	0,84	1954,39	2154,29	1642,62
			2300,0	14,5										0,620	0,66	0,83	1954,39	2154,29	1615,96
			2400,0	15,1										0,647	0,66	0,81	1954,39	2154,29	1588,40
158,8	9,5	16,72	2500,0	15,7	14368,11	862,09	0,06	0,34	540	900	0,6	2,5	0	0,674	0,66	0,80	1954,39	2154,29	1559,93
			2600,0	16,4										0,701	0,66	0,78	1954,39	2154,29	1530,57
			2700,0	17,0										0,728	0,66	0,77	1954,39	2154,29	1500,36
			2800,0	17,6										0,755	0,66	0,75	1954,39	2154,29	1469,34
			2900,0	18,3										0,782	0,66	0,74	1954,39	2154,29	1437,58
			3000,0	18,9										0,809	0,66	0,72	1954,39	2154,29	1405,17
			3100,0	19,5										0,836	0,66	0,70	1954,39	2154,29	1372,21
			3200,0	20,2										0,863	0,66	0,69	1954,39	2154,29	1338,81
			3300,0	20,8										0,890	0,66	0,67	1954,39	2154,29	1305,10
			3400,0	21,4										0,917	0,66	0,65	1954,39	2154,29	1271,22
			3500,0	22,0										0,944	0,66	0,63	1954,39	2154,29	1237,29
			3600,0	22,7										0,971	0,66	0,62	1954,39	2154,29	1203,45
			3700,0	23,3										0,998	0,66	0,60	1954,39	2154,29	1169,83
			3800,0	23,9										1,025	0,66	0,58	1954,39	2154,29	1136,54
			3900,0	24,6										1,051	0,66	0,56	1954,39	2154,29	1103,70
			4000,0	25,2										1,078	0,66	0,55	1954,39	2154,29	1071,40
			4100,0	25,8										1,105	0,66	0,53	1954,39	2154,29	1039,72
			4200,0	26,4										1,132	0,66	0,52	1954,39	2154,29	1008,74
			4300,0	27,1										1,159	0,66	0,50	1954,39	2154,29	978,51
			4400,0	27,7										1,186	0,66	0,49	1954,39	2154,29	949,08
			4500,0	28,3										1,213	0,66	0,47	1954,39	2154,29	920,48

Quadro 9: Resultados obtidos para EC-4:2004 – Taxa de Armadura 3% a 6%.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Por meio do gráfico apresentado na Figura 4 é possível perceber que as três curvas associadas ao EC-4:2004[6] indicam uma resistência maior enquanto colunas curtas, entretanto têm uma declividade maior enquanto colunas esbeltas. Isso pode ser explicado devido ao ganho de resistência em função do confinamento.

Quanto a NBR 8800:2008 [3], suas curvas indicam que o dimensionamento feito por meio desta norma apresenta os mais baixos valores de resistência para colunas curtas e entende-se que ao indicar uma simplificação no item P.3.3 quanto a admitir igual a zero o coeficiente de fluência do concreto para seções tubulares preenchidas com concreto, a norma torna o dimensionamento extremamente conservador.

Embora a NBR 16239:2013 [4] oriente a se utilizar as prescrições feitas pela norma NBR 8800:2008 [3], a diferenciação no cálculo do fator de redução faz com que os valores obtidos

pelas duas normas sejam divergentes, apresentando esta os valores mais altos de resistência para colunas esbeltas.

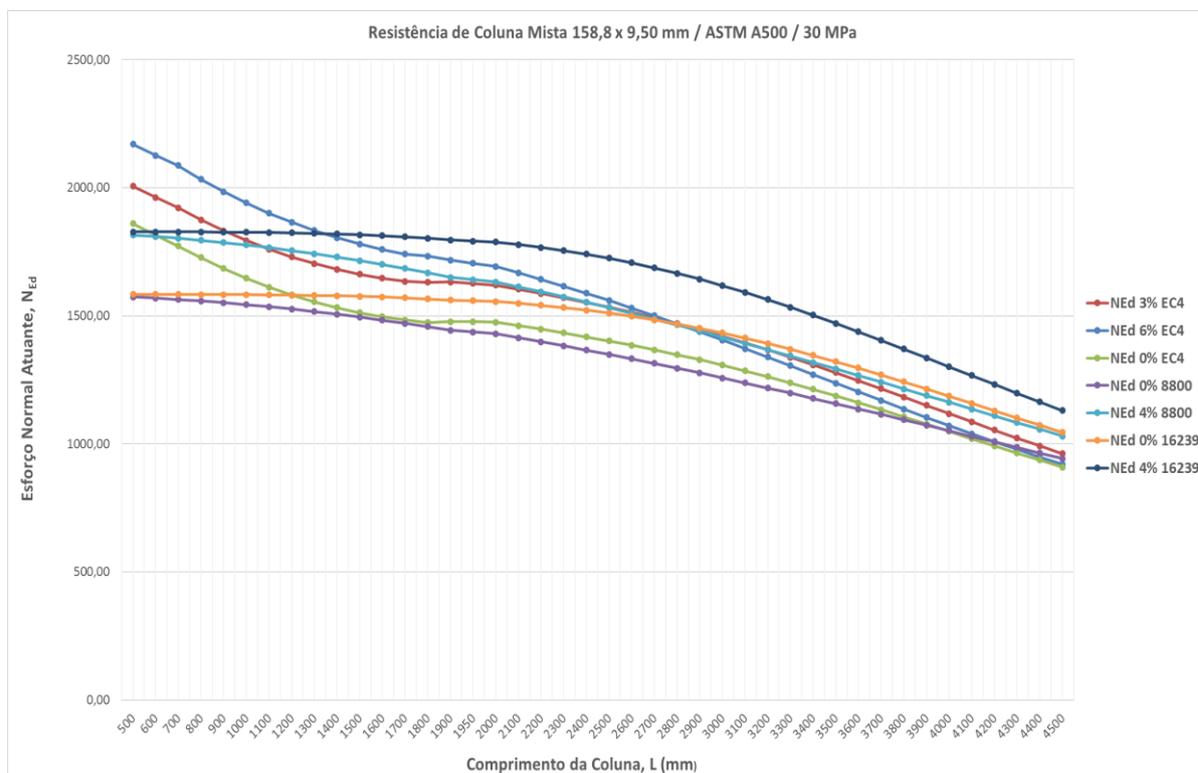


Figura 4: Sobreposição das curvas.
Fonte: Elaborado pelos autores.

	NBR 8800	NBR 16239	EC-4	EC-4	NBR 8800	NBR 16239	EC-4
Taxa de Armadura	0%	0%	0%	0% a 3%	4%	4%	3% a 6%
Esbeltez 500 mm	0,128	0,125	0,144	0,146	0,138	0,135	0,148
Esbeltez 4500 mm	1,153	1,124	1,140	1,177	1,239	1,212	0,1213
Fator de Contribuição do Aço	0,82	0,82	0,81	0,73	0,71	0,71	0,66
Esforço de Plastificação 500 mm	1583,85	1583,85	1860,28	2006,60	1827,94	1827,94	2169,62
Esforço de Plastificação 4500 mm	1583,85	1583,85	1599,20	2421,89	1827,94	1827,94	1934,39
Resistência da Coluna 500 mm	1573,74	1583,79	1860,28	1766,00	1815,06	1827,86	2169,62
Resistência da Coluna 4500 mm	942,48	1044,60	909,72	962,10	1030,98	1130,83	920,48

Quadro 10: Comparação dos resultados obtidos.
Fonte: Elaborado pelos autores.

O Quadro 10 mostra uma comparação dos dados obtidos, de modo que se verifique as condições referentes à taxa de armadura, implicando na proximidade dos resultados do fator de contribuição do aço e esbeltez, coerentes entre si.

4. CONCLUSÃO

Como explica De Nardin [8], por estarem fundamentadas em estudos experimentais, a simples comparação entre os resultados obtidos a partir das diferentes normas não é um procedimento adequado, pois conduz a grandes discrepâncias, especialmente quando da previsão da capacidade resistente à compressão.

Sendo assim, ainda há de se aprofundar na questão da formação dos perfis tubulares de aço.

Em termos analíticos, o dimensionamento de uma coluna mista parece depender mais da esbeltez do elemento, que agrega inicialmente a participação de parcelas de resistência do concreto (como no caso do confinamento) e da parcela referente à armadura de aço, pois conforme se aumenta a taxa de armadura, conseqüentemente se diminui a área de contribuição do concreto.

Para tanto se faz necessário que as análises experimentais foquem um pouco mais no que diz respeito ao comportamento das seções de aço, de concreto (0% de taxa de armadura) e de concreto armado (taxa de armadura variando até 6%) isoladas entre si, de modo que se investigue o modo como se comporta a seção mista. Ora aproximando-se de um elemento de concreto, ora aproximando-se de um elemento de aço.

Crê-se que o dimensionamento das normas brasileiras é muito conservador no que concerne ao confinamento e que o estudo da seção mista justifica um olhar diferenciado sobre o dimensionamento dos elementos estruturais em específico.

Agradecimentos

Agradecimento à FAPERJ – Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro pela concessão de bolsa de mestrado e doutorado aos alunos do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - PGECIV UERJ.

REFERÊNCIAS

1. TETRIC. **Norma para Estruturas de Aço com Perfis Tubulares (NBR 16239) entra em Vigor.** Disponível em <http://www.tetric.com.br/blog/2013/12/03/norma-para-estruturas-de-aco-com-perfis-tubulares-nbr-16239-entra-em-vigor/> . Acesso em 09 de setembro de 2014.
2. DE NARDIN, S. SOUZA, A.S.C. PEREIRA, M.F. SERAFIM, J.A. **Análise Comparativa de Soluções de Pilares de Galpões: Pilares de Aço, Pré-Moldados e Mistos de Aço e Concreto.** 2012. São Paulo. Disponível em <http://www.abcem.org.br/construmetal/2012/arquivos/Cont-tecnicas/18-Construmetal2012-analise-comparativa-de-solucoes-de-pilares-para-galpoes.pdf> . Acesso em 12 de setembro de 2014.
3. ABNT NBR 8800 - **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** 2008.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

4. ABNT NBR 16239 - **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares**. 2013.
5. EUROCODE 3 - Design of steel structures. 2005.
6. EUROCODE 4 - Design of composite steel and concrete structures. 2004.
7. CARDOSO, H. S.; CALDAS, R. B.; OLIVEIRA, H. M. S. **Estudo Teórico-Experimental de Parafusos Utilizados como Dispositivos de Transferência Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto**. Mostra PROPEEs UFMG. 2013; v. 1: n.1.
8. SIMÕES, R. **Efeito do Confinamento em Pilares Mistos Curtos de Aço e Concreto** [Mestrado]. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2008.
9. CHAVES, L. B. **Análise Teórico-Experimental das Regiões de Introdução de Carga em Pilares Mistos** [Mestrado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2001.
10. OLIVEIRA, W.L.A; EL DEBS, A.L.H.C. **Efeito da Esbeltez e da Resistência do Concreto no Confinamento de Pilares Mistos Preenchidos: Resultados Experimentais**. Cadernos de Engenharia de Estruturas. 2006; v. 8: n.32, p 61-64.
11. CAMPOLINA, B. M. **Estudo da Aderência entre Aço e Concreto em Pilares tubulares Mistos Preenchidos: uma Análise Experimental e Computacional** [Mestrado]. Belo Horizonte: UFMG; 2008.
12. ABNT NBR 6118 - **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. 2014.