

Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto

## COMPORTAMENTO E PROJETO DE BARRAS COMPOSTAS COMPRIMIDAS FORMADAS POR PERFIS TUBULARES CIRCULARES CONCÊNTRICOS LAMINADOS DE AÇO\*

Lucas Figueiredo Grilo<sup>1</sup>  
Ricardo Hallal Fakury<sup>2</sup>  
Ana Lydia Reis de Castro e Silva<sup>2</sup>  
Francisco Carlos Rodrigues<sup>2</sup>  
Victor Pereira Daldegan<sup>3</sup>  
Afonso Henrique Mascarenhas de Araújo<sup>4</sup>

### Resumo

Este trabalho trata do estudo do comportamento de barras compostas comprimidas formadas por perfis tubulares circulares concêntricos laminados de aço. Foram apresentadas soluções para o projeto e fabricação dos perfis tubulares compostos. Para validação dos resultados numéricos foram feitos modelos de barras isoladas e seus resultados comparados aos obtidos de acordo com a norma brasileira. Os resultados foram satisfatórios, com a força de compressão resistente variando menos que 6,5% em relação aos valores obtidos com a formulação da norma. A partir desses resultados foi feito o estudo de perfis tubulares compostos por dois tubos com travamentos fixos e deslizantes ao longo das barras e sem travamentos. Foram simulados diversos modelos de perfis compostos, com a finalidade de determinar as curvas de resistência à compressão para as diversas condições de travamento. Foram gerados os gráficos comparativos das curvas de resistência à compressão e da distribuição da força pelos tubos que compõe os perfis e avaliada a distribuição de força de compressão entre os tubos de um mesmo perfil. Foi observado que perfis com travamento fixo e deslizante apresentam comportamento semelhante, ao contrário dos perfis sem travamentos.

**Palavras-chave:** Perfis Tubulares Compostos Concêntricos; Compressão Axial; Curva de Resistência à Compressão; Estruturas de Aço.

## COMPRESSION BEHAVIOR AND DESIGN OF BUILT-UP MEMBERS COMPOSED OF CONCENTRIC HOT ROLLED CIRCULAR HOLLOW SECTIONS

### Abstract

This research presents a study of the compression behavior of built-up members composed of concentric hot rolled circular hollow sections. Some technically and economically viable design and fabrication solutions to built-up members composed of concentric hot rolled circular hollow sections are presented. For validation of numerical results, models of singular hollow sections are made and compared to the ABNT NBR 16239:2013 Standard results. The results obtained with numerical models were satisfactory. The compressive strength of these numerical models differs less than 6,5% of the Brazilian Standard values. Once the numerical modeling was validated, the study of built-up members composed by two tubes was made, considering fixed connection and sliding connection between the tubes along the bars and without any

---

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

connection. Several models of built-up sections were simulated, in order to obtain and compare the various compressive resistance curves of each connection. Comparative graphs of the compressive resistance curves were generated, as also some graphs that show the distribution of the compressive force between each bar of the built-up section. It was observed that the built-up members with fixed and sliding connection presented similar behavior, in opposite to without connections profiles.

**Keywords:** Circular Hollow Sections; Axial Compression; Buckling Curve; Steel Structures; Built-up Members.

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia de Estruturas, Doutorando em Engenharia de Estruturas, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Civil, Aluno de iniciação científica, Departamento de Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Civil, Divisão de Tubos Estruturais, Vallourec do Brasil, Belo Horizonte, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 COMPOSIÇÃO DE PERFIS TUBULARES

Os perfis de seção tubular (tubos, perfis tubulares), utilizados em construções urbanas e industriais em muitas partes do mundo, podem ser fabricados pelo processo de laminação a quente (tubos sem costura) ou pelo processo de soldagem (tubos com costura). Os tubos com costura são produzidos conformando uma chapa metálica e ligando suas extremidades por solda. Esse processo é muito utilizado, sobretudo para tubos de diâmetros elevados, para os quais o processo de laminação não é viável. Os tubos sem costura são produzidos pelo processo de laminação a quente e apresentam maior capacidade resistente à compressão axial, pelo fato de possuírem menores tensões residuais. Contudo, o diâmetro e a espessura desses tubos estão limitados à capacidade das máquinas de manufatura. Por exemplo, no Brasil, eles, na forma circular, são produzidos pela Vallourec Tubos do Brasil (anteriormente nomeada V&M do Brasil), com diâmetro máximo de 355,6 mm, na forma quadrada, com largura de lado máxima de 300 mm e, na forma retangular, com as maiores dimensões de 400 x 200 mm.

Em determinadas situações nas quais se deseje utilizar apenas perfis laminados, pode ocorrer a necessidade de se usar um perfil com capacidade resistente maior que a dos produzidos industrialmente. Nesse caso, atualmente podem ser empregadas diferentes alternativas, como a composição de perfis tubulares justapostos e a composição utilizando barras de treliçamento ou chapas de ligação entre os perfis, conforme as seções transversais mostradas na Figura 1.

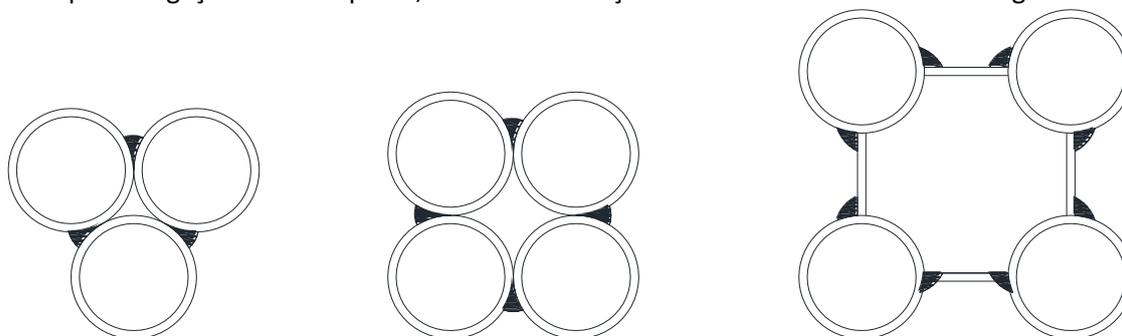


Figura 1 – Seções transversais compostas

Uma outra alternativa, que praticamente não causa impacto na arquitetura, é a utilização de elementos estruturais mistos, obtidos com o preenchimento do interior de um perfil tubular por concreto. No entanto, essa solução pode influenciar na viabilidade operacional da obra, uma vez que pode tornar necessária a concretagem *in loco*, além de aumentar o peso final da estrutura. Além disso, ela pode elevar o tempo de construção e traz algumas dificuldades como, por exemplo, a necessidade de disponibilidade de fornecimento de concreto e de mão de obra especializada na obra.

Todas as alternativas mencionadas, além de impactarem na arquitetura, o que pode ser um sério problema, trazem fatores complicadores na fabricação e dimensionamento estrutural. A solda

---

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

de regiões tubulares justapostas muitas vezes é operacionalmente complicada e as ligações entre vigas e pilares podem ficar muito solicitadas devido à grande excentricidade.

Neste trabalho é apresentada uma nova solução, qual seja, a utilização de dois perfis tubulares circulares compostos concêntricos (Figura 2-a), representados pela sigla PTCC, para suportar forças axiais de compressão. Assim, é possível aumentar a força axial resistente de um elemento estrutural sem alterar a arquitetura e sem utilizar outro material, como o concreto, na composição. Para aumentar ainda mais a capacidade resistente do PTCC, podem ser também usados três perfis tubulares (Figura 2-b), mas essa situação não será abordada aqui.

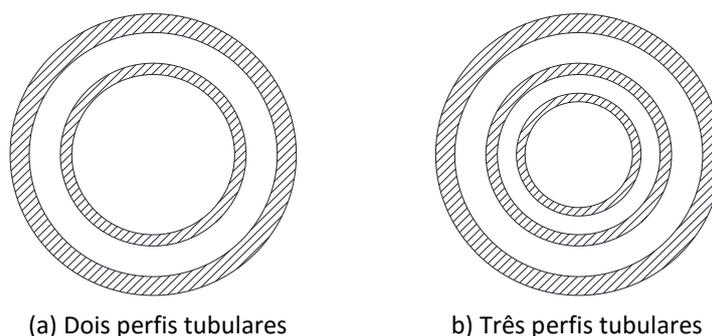


Figura 2 – Seção composta por dois ou três perfis tubulares circulares concêntricos

## 1.2 REVISÃO DE LITERATURA

### 1.2.1 Estabilidade Estrutural

De acordo com Chen [1], na teoria clássica de uma barra rotulada nas duas extremidades, sem imperfeições iniciais, a equação diferencial que descreve a flambagem elástica é expressa por:

$$EIv'' + Nv = 0 \quad (1)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade,  $I$  é o momento de inércia da seção transversal,  $N$  é a força de compressão atuante e  $v$  é o deslocamento transversal da barra. A solução dessa equação leva à carga crítica de flambagem e à forma deformada da barra, conforme Hibbeler [2], dadas por:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2)$$

$$v(x) = C_1 \operatorname{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (3)$$

onde  $L$  é o comprimento da barra e  $C_1$  é uma constante igual ao deslocamento no centro da barra. Para barras sem imperfeições geométricas iniciais, a carga crítica determina o ponto de bifurcação.

Para o estudo de barras reais é necessário considerar imperfeições iniciais. Para a mesma barra birrotulada, se for assumida uma curvatura inicial na forma de uma meia senoide, a geometria inicial poderá ser descrita da mesma forma apresentada na Equação 3, porém considerando o

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

termo  $C_1$  como a amplitude da curvatura inicial no centro da barra. Essa condição leva à seguinte equação diferencial:

$$EIv'' + N(v + v_i) = 0 \quad (4)$$

onde  $v_i$  é o deslocamento transversal inicial da peça. A solução dessa equação resulta na equação da forma deformada da barra [3], dada por:

$$v(x) = \left( \frac{1}{1 - N/N_e} \right) v_i \operatorname{sen} \left( \frac{\pi x}{L} \right) \quad (5)$$

### 1.2.2 Tensões Residuais

Tensões residuais em perfis de aço são inerentes aos seus processos de fabricação. No caso de perfis laminados, essas tensões surgem devido ao resfriamento diferencial ao longo da seção transversal da barra. Essas tensões são autoequilibradas na seção transversal, apresentando compressão nas regiões de resfriamento mais rápido e tração nas regiões de resfriamento mais lento.

Os perfis tubulares sem costura, produzidos por laminação a quente, usualmente apresentam pequenos valores de tensão residual quando comparados a outros tipos de perfil. Pela sua geometria, o resfriamento diferencial da seção se dá exclusivamente ao longo da espessura, com resfriamento mais rápido na face externa em relação à face interna [4]. De acordo com o ECCS [5], perfis tubulares não são muito afetados pelas tensões residuais, que apresentam uma variação linear máxima de -15% a +15% da resistência ao escoamento do aço, conforme mostrado na Figura 3.

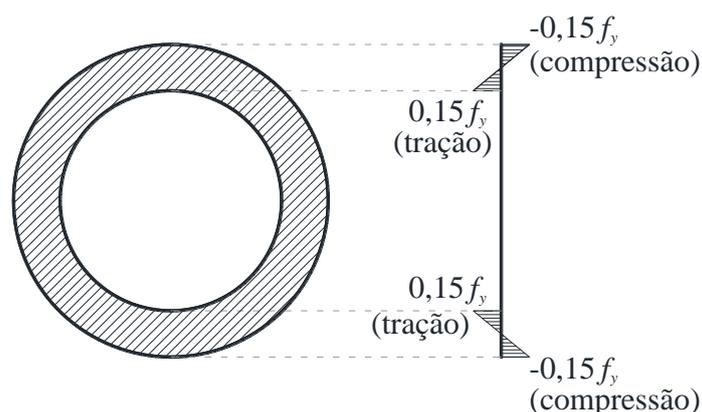


Figura 3 – Tensões residuais em seções tubulares laminadas a quente

A norma europeia EN 1993-1-1:2005 [6] recomenda, para fins de análise estrutural, utilizar um aumento na curvatura inicial das barras para considerar o efeito das tensões residuais. Essa curvatura recomendada, para perfis de baixa tensão residual é de  $L/300$ . A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 [7] e a americana ANSI/AISC 360:2010 [8] recomenda uma redução do valor do módulo de elasticidade do aço em 20% para qualquer tipo de seção transversal.

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

### 1.2.3 Força axial resistente de compressão

A norma brasileira ABNT NBR 16239:2013 [9] apresenta a curva de resistência à compressão axial que deve ser aplicada às barras com baixos níveis de tensões residuais, como é o caso de perfis tubulares laminados a quente. A formulação utilizada é a mesma da norma canadense CAN/CSA-S16:2005 [10], e considera a existência de uma curvatura inicial de  $L/1.000$ . O valor da força nominal resistente de compressão axial é igual a:

$$N_{c,Rk} = \chi A_g f_y \quad (5)$$

onde  $\chi$  é o fator de redução associado à compressão,  $A_g$  é a área bruta da seção transversal e  $f_y$  é a resistência ao escoamento do aço. O valor de  $\chi$  é determinado por:

$$\chi = \frac{1}{(1 + \lambda_0^{4.48})^{1/2.24}} \quad (6)$$

Nessa equação,  $\lambda_0$  é o índice de esbelteza reduzido, dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}} \quad (7)$$

onde  $N_e$  é a carga crítica de flambagem da barra.

Para perfis compostos por duas barras, a norma brasileira ainda prescreve um espaçamento máximo entre as peças separadoras para garantir que elas trabalhem estruturalmente em conjunto, igual a:

$$L_{trav} \leq \frac{\lambda}{2} r_{min} \quad (8)$$

onde  $r_{min}$  é o menor raio de giração de apenas um perfil isolado e  $\lambda$  é o índice de esbelteza do perfil composto. Adicionalmente, a norma exige que sejam usadas pelo menos duas peças separadoras.

## 2 PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES DE PROJETO

Para viabilizar a utilização dos PTCCs na indústria da construção foram estudadas soluções práticas de projeto. Do ponto de vista da fabricação, é necessário solucionar, basicamente, dois problemas: as ligações entre os tubos por meio de peças separadoras (se houver de fato necessidade dessas peças) e as ligações dos tubos com os flanges de extremidade. O desenvolvimento das soluções que, a princípio, são as mais viáveis, foi realizado em parceria com as empresas Vallourec Tubos do Brasil e Brafer Construções Metálicas, produtora dos perfis e uma montadora, respectivamente.

### 2.1 LIGAÇÃO DOS FLANGES

Para a ligação dos dois perfis tubulares nas extremidades, foi definida a utilização de um flange vazado, para que haja acesso à solda do tubo interno. A ligação entre o tubo externo e o flange

---

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

será feita com solda de filete, conforme mostrado na Figura 4. A solda de ligação do tubo interno (solda de penetração parcial) precisa ser feita em um chanfro do flange, faceada com o mesmo.

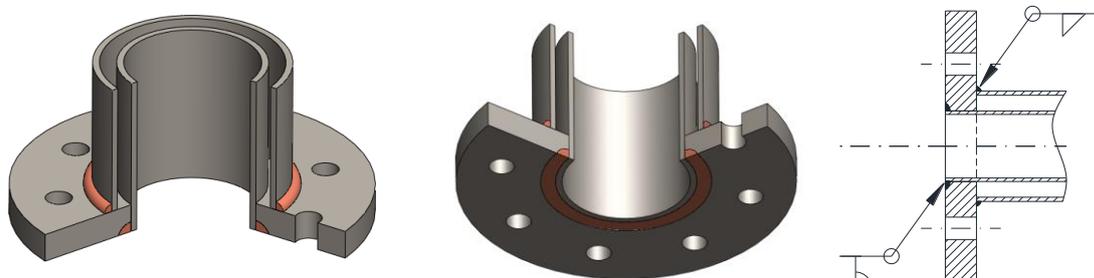
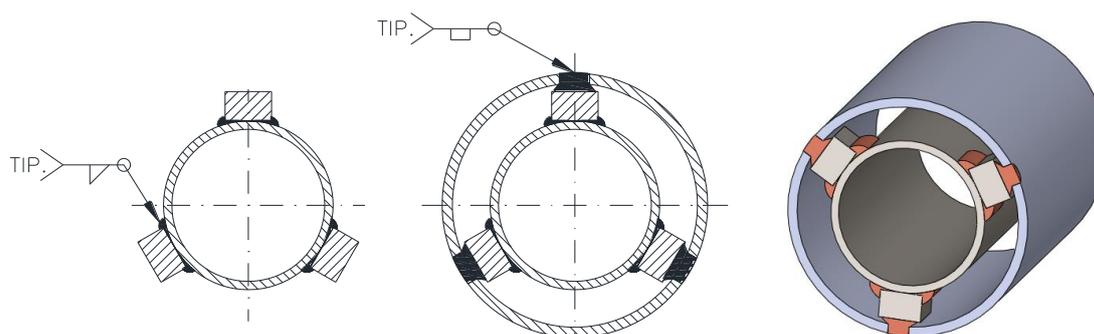


Figura 4 – Ligação do flange

## 2.2 INTERLIGAÇÃO DOS TUBOS

Para este estudo foram propostas duas soluções de interligação ao longo dos tubos, com travamentos fixos ou deslizantes. Além dessas, foi também estudado o PTCC sem travamentos ao longo dos tubos.

Para PTCCs com travamentos fixos as etapas de fabricação da composição podem ser divididas em três. Na primeira etapa as peças de conexão devem ser fixadas, com solda de filete, na parede externa do tubo interno, conforme pode ser visto na Figura 5-a. Na segunda etapa deve ser feita a montagem do conjunto e o tubo externo deve ser perfurado, nos pontos que ficarão sobre as peças de conexão, e monta-se o conjunto. Na terceira etapa deve ser feita uma solda de tampão, ligando as peças de conexão ao tubo externo, conforme pode ser visto na Figura 5-b. A Figura 5-c ilustra o conjunto formado pelos dois tubos unidos pelas peças de conexão.



(a) Fixação das peças de conexão no tubo interno

(b) Fixação das peças de conexão no tubo externo

(c) Visão do conjunto

Figura 5 – Travamentos fixos

A segunda opção para o travamento dos tubos dos PTCCs, com travamentos deslizantes, é a fixação de pinos no tubo externo, transpassando sua parede de forma que toquem o tubo interno, mas não se fixando nele. Para a montagem desse tipo de travamento, primeiramente fura-se o tubo externo nos pontos que os pinos serão transpassados. Após a execução dos furos

montam-se os tubos concentricamente e posicionam-se os pinos de forma que façam o tubo interno. Após o posicionamento dos pinos deve ser executada uma solda de filete ligando os pinos à face externa do tubo externo. O arranjo pode ser visto na Figura 6.

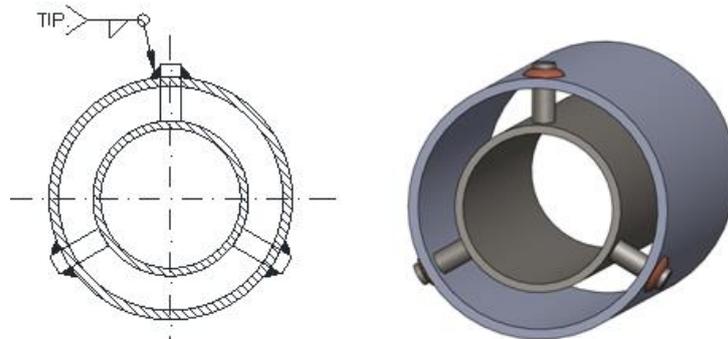


Figura 6 – Travamentos deslizantes

### 3 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

O desenvolvimento dos modelos numéricos foi feito a partir de tubos isolados sob compressão centrada, com curvatura inicial. Com esses modelos foram testados diferentes tipos de elementos, malhas e condições de contorno, e os resultados comparados aos obtidos de acordo com o procedimento de cálculo previsto na norma ABNT NBR 16239:2013.

Foi utilizado o programa ABAQUS 6.13 para a simulação pelo método dos elementos finitos. Após análises preliminares foi definido que o elemento mais adequado é o S8R. Trata-se de um elemento de casca, com 6 graus de liberdade por nó e 8 nós por elemento. Pelo fato de apresentar nós intermediários nos lados do elemento, ele possibilitou o ajuste curvo exato da geometria, não gerando uma malha poligonal.

Os modelos foram feitos com uma imperfeição inicial de  $L/1.000$ , módulo de elasticidade de 200 GPa e uma inclinação de  $1/10.000$  no trecho não linear da curva do material (Figura 7), conforme preconizado pelo ENV 1993-1-1:1992 [11].

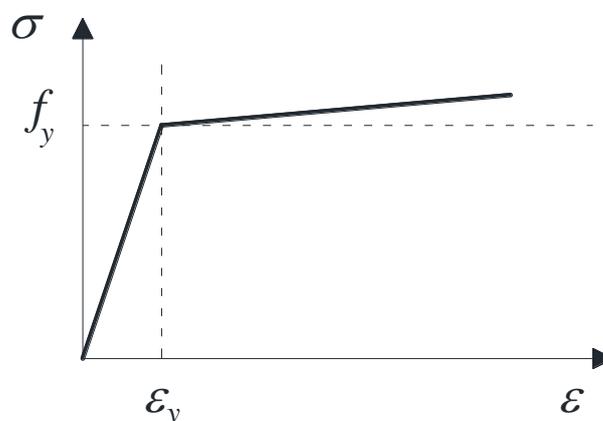


Figura 7 – Diagrama tensão versus deformação bilinear

Foi realizado um teste de sensibilidade de malha, e concluiu-se que, a partir de 10 elementos por seção transversal do tubo, os resultados já apresentavam um resultado satisfatório. Foi então adotado para este trabalho 15 elementos na seção transversal dos perfis, número que se mostrou razoável em termos de tempo de processamento.

Os resultados dos modelos de tubos isolados apresentaram diferenças inferiores à 6,5% em relação à norma brasileira ABNT NBR 16239:2013, o que foi considerado satisfatório para este estudo (Figura 8).

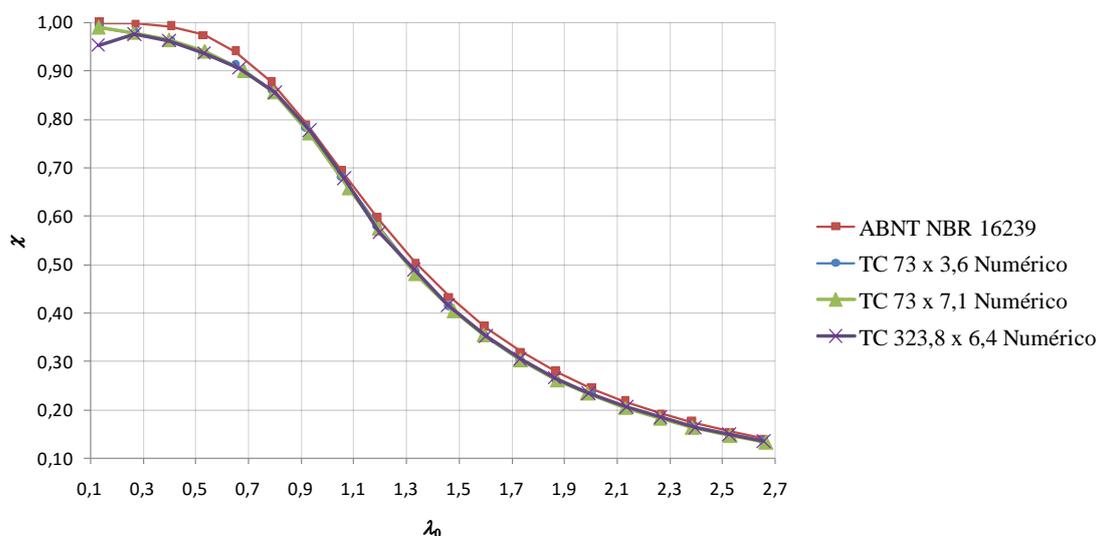


Figura 8 – Curva de resistência à compressão axial obtida para modelos de tubos isolados

### 3 RESULTADOS

Para estudar como a força de compressão se distribui pelos perfis do PTCC na medida em que se aplica o carregamento, foram geradas as curvas das forças de compressão em cada tubo do PTCC, de acordo com o passo de carga.

Para se determinar a força atuante em cada perfil foi feita uma aproximação baseada na leitura das tensões dos elementos do modelo. Primeiramente foi selecionado o anel composto pelos elementos mais próximos à base do PTCC, mas que não fossem elementos da extremidade dos tubos (Figura 9). Em seguida foram lidas as tensões normais ( $S_{11}$ ) nos centroides das faces interna e externa de cada um desses elementos, e sua média calculada. Uma vez obtida a média da tensão normal axial em cada perfil, esse valor foi multiplicado pela área da seção transversal do respectivo tubo e foram então obtidas as forças atuantes em cada perfil.

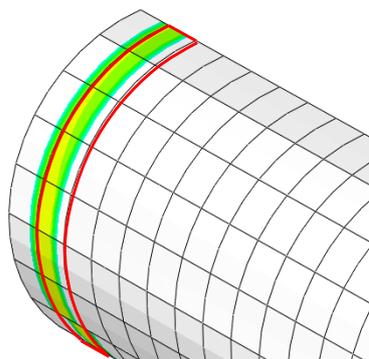


Figura 9 – Leitura de tensões

É importante observar que o método adotado para estimar a força de compressão axial em cada perfil do PTCC contém algumas imprecisões. Primeiramente, os elementos podem ter uma pequena diferença de dimensões, em função de adaptações das malhas, o que pode gerar um erro quando se obtém a média das tensões. Outro erro que o processo apresenta é o fato de que os perfis não estão exatamente alinhados com o eixo de leitura das tensões, em função da curvatura inicial de 1/1.000 adotada. Por fim, ao se ler a média da tensão em uma face do elemento existe um erro que surge do fato de o elemento ter um determinado comprimento axial. Quanto menor for a dimensão axial do elemento, menor será o erro, uma vez que a força é a tensão integrada na área da seção transversal. Contudo, conforme pode ser observado a seguir, os resultados obtidos foram muito bons, representando o comportamento dos perfis corretamente.

Os resultados obtidos foram mostrados em gráficos de Força *versus* Passo de Carga. Foram mapeadas as curvas de carregamento de cada perfil, para os casos de travamento fixo, deslizante e sem travamento. Para fins de comparação, também foram inseridas no gráfico as linhas horizontais que indicam as forças resistentes de compressão dos perfis isolados, bem como a soma das forças resistentes desses perfis. Como ilustração, os resultados obtidos para o PTCC composto pelos perfis TC 114,3 x 14,2 + TC 355,6 x 12,5 estão mostrados nas figuras 10 a 13.

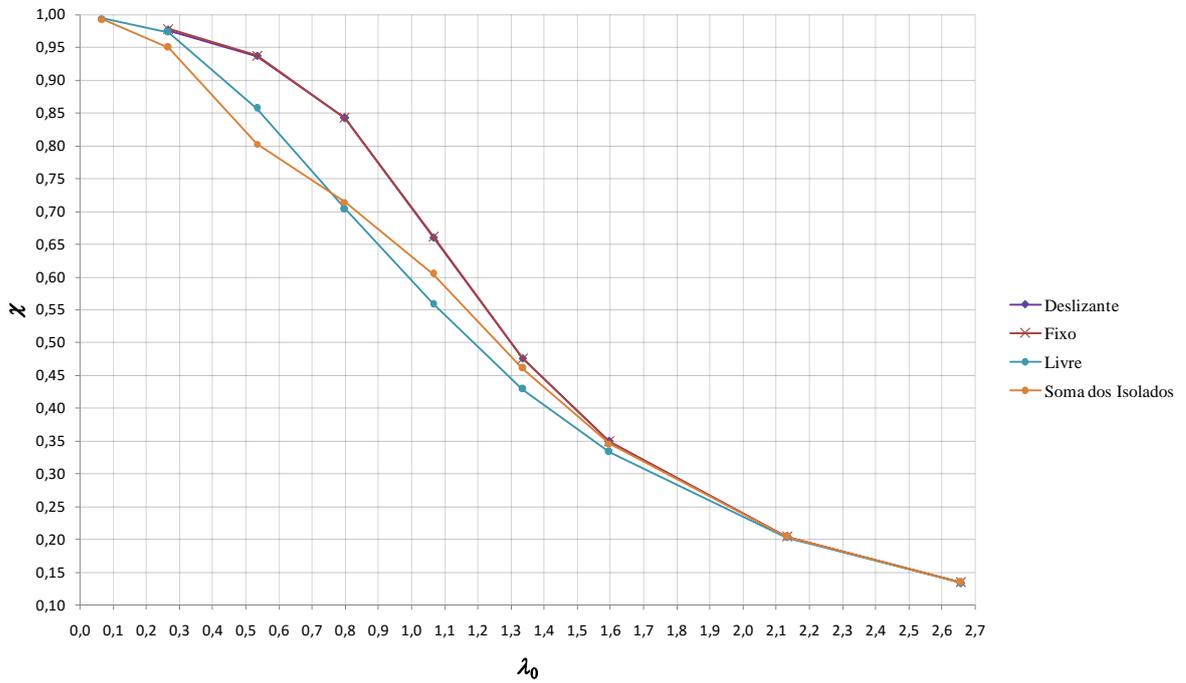


Figura 10 – Curvas numéricas de resistência à compressão

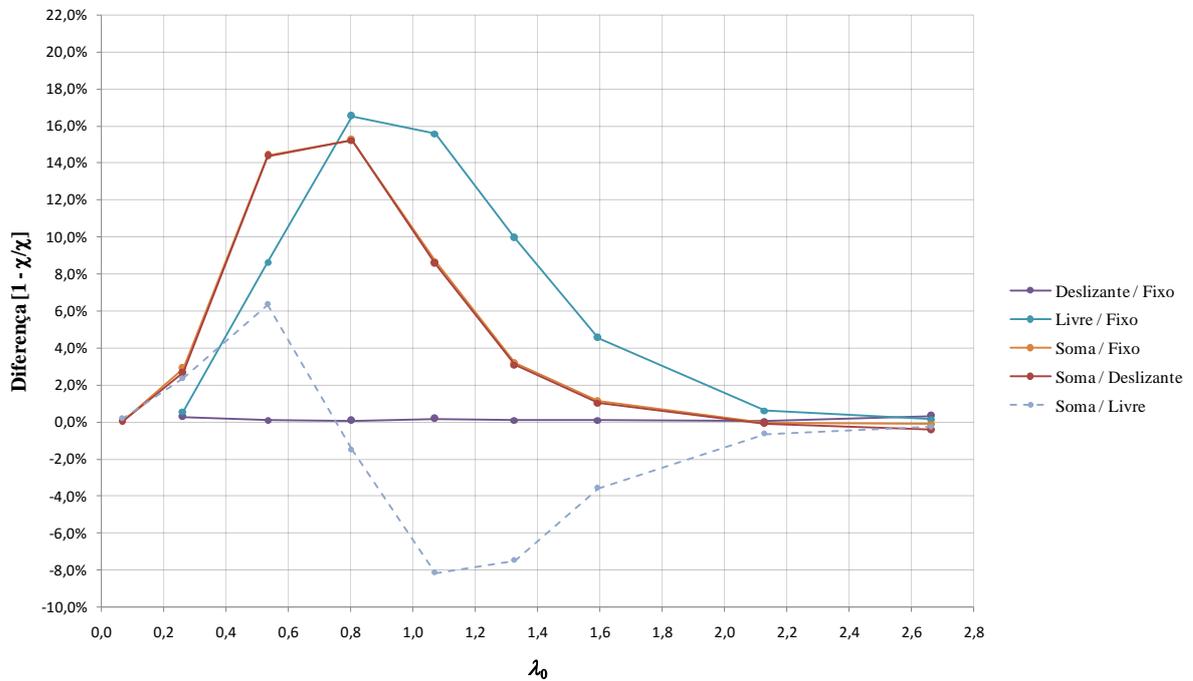


Figura 11 – Diferenças entre forças críticas de compressão

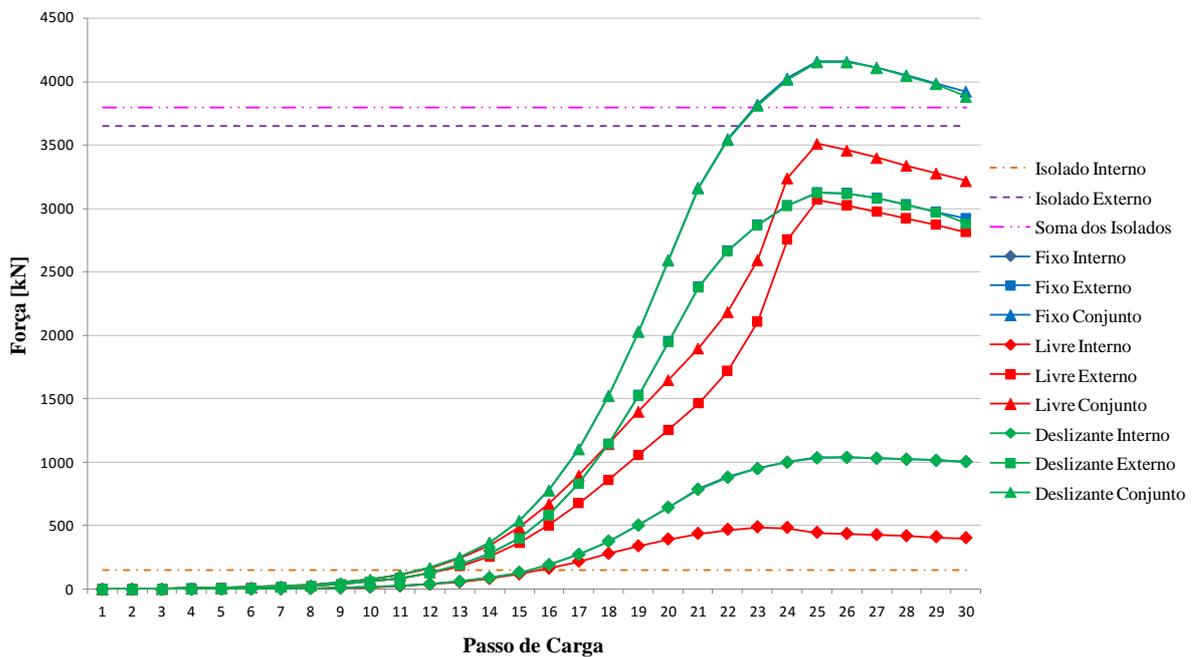


Figura 12 – Força de compressão em cada perfil ( $\lambda_0 = 1,07$  e  $\lambda = 80$ )

No gráfico apresentado na Figura 12 pode ser observado que o perfil interno do PTCC, para todas as formas de travamento, suporta mais força que ele mesmo quando calculado isoladamente. Pode ser observado também que, quando se utiliza travamentos fixos ou deslizantes, o comportamento é semelhante, mas, quando não se utiliza os travamentos, a força máxima de compressão fica reduzida, mas ainda assim acima da força calculada para o perfil isolado. Esse comportamento se deve ao fato de que o perfil externo estabiliza o perfil interno, aumentando a força máxima que este último pode suportar. Quando os travamentos são fixos ou deslizantes, o sistema funciona compatibilizando os deslocamentos ao longo dos perfis. Quando não há travamentos a compatibilização dos deslocamentos é feita somente pelas extremidades, resultando em um trabalho dos dois tubos não totalmente solidário.

O perfil externo do PTCC, também em todas as formas de travamento, suporta menos força que ele mesmo, quando calculado isoladamente. Isso se deve ao fato de que ele está sendo utilizado para estabilizar o perfil interno, menos rígido, e com isso sua força resistente fica reduzida. Também pode ser observado que os comportamentos do perfil, quando há travamentos fixos ou deslizantes, são bastante semelhantes. No caso de não se utilizar travamentos ao longo dos perfis, a força resistente do perfil externo é ligeiramente inferior que à que se obtém quando os travamentos são utilizados.

Ao se analisar o conjunto, pode-se observar que, quando não se utiliza travamentos, o perfil interno atinge seu pico de força no passo de carga 24, enquanto o perfil externo atinge seu pico de força no passo 25, confirmando o fato de que o perfil interno perde a estabilidade antes do perfil externo. Esse comportamento faz com que, para alguns valores de esbelte, a força crítica de compressão do conjunto sem travamentos possa ser inferior à soma das forças críticas dos perfis isolados, conforme indica a linha tracejada da Figura 11, que atinge seu mínimo em  $\lambda_0 =$

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

1,07 ( $\lambda = 80$ ). Nos perfis em que há a compatibilização plena dos deslocamentos (travamento fixo e deslizante), a força de compressão resistente é sempre superior à soma das forças resistentes dos perfis isolados. Pode-se observar na Figura 12 que os picos das forças de compressão no perfil interno e externo ocorrem simultaneamente quando se utiliza esses travamentos (passo de carga 25).

As tensões atuantes nos perfis, nos passos de carga 16, 24 e 25 estão mostradas nas figuras 13, 14 e 15, respectivamente, para o PTCC sem travamentos.

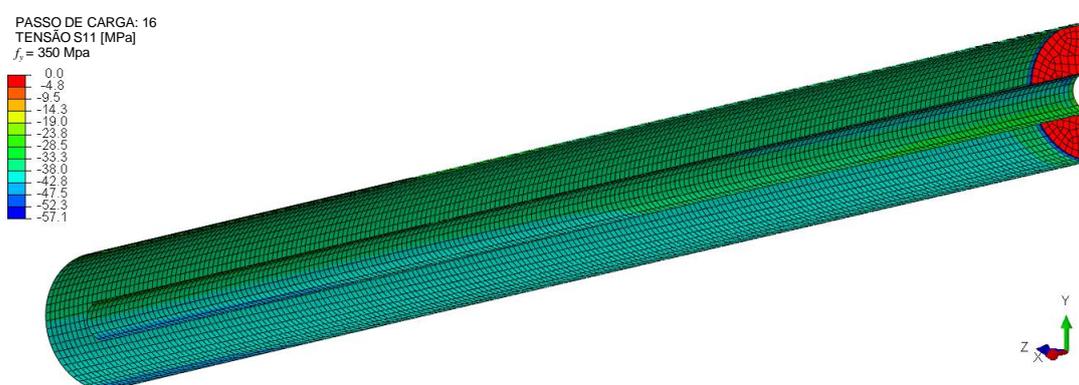


Figura 13 – Modelo 17 sem travamentos – Tensões atuantes – Passo de carga 16 ( $\lambda_0 = 1,07$  e  $\lambda = 80$ )

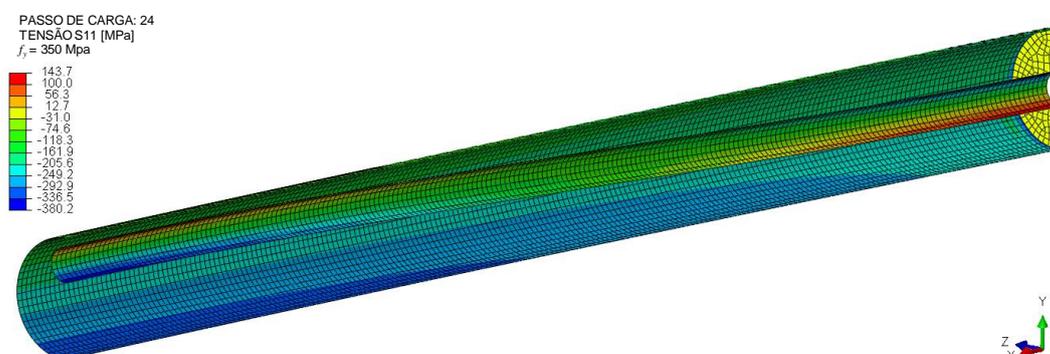


Figura 14 – Modelo 17 sem travamentos – Tensões atuantes – Passo de carga 24 ( $\lambda_0 = 1,07$  e  $\lambda = 80$ )

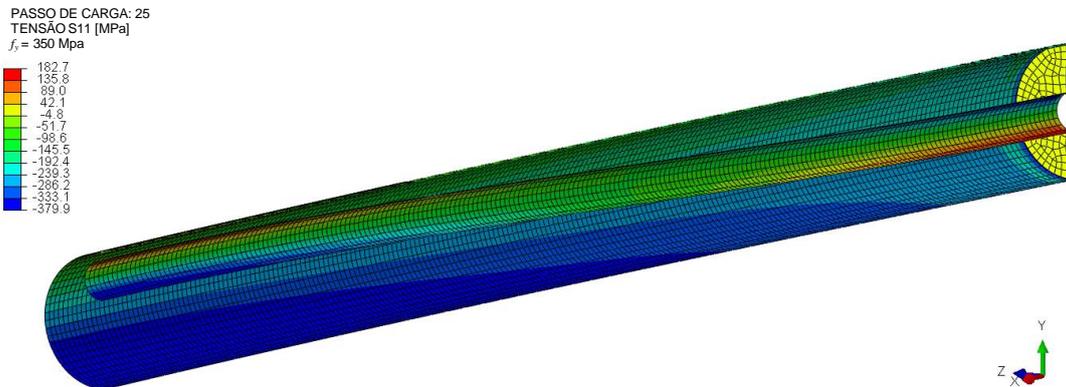


Figura 15 – Modelo 17 sem travamentos – Tensões atuantes – Passo de carga 25 ( $\lambda_0 = 1,07$  e  $\lambda = 80$ )

Conforme se observa, o deslocamento transversal do perfil interno é bem maior que o do perfil externo, levando-o à perda de estabilidade antes. No passo de carga 24, o perfil interno perde a condição de suportar forças adicionais, com sua seção central praticamente plastificada (situação próxima da rótula plástica), e no passo de carga 25 acontece o mesmo fenômeno com o perfil externo.

Nos perfis com travamento fixo, o deslocamento do perfil interno é acoplado ao deslocamento do perfil externo, conforme se vê nas figuras 16 e 17.

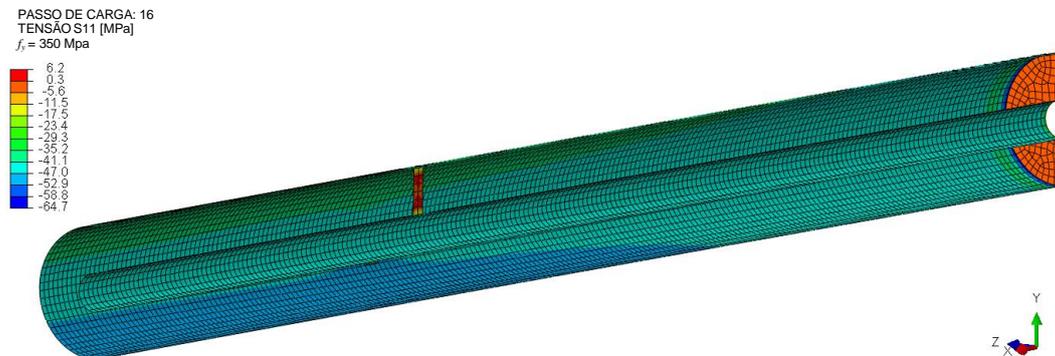


Figura 16 – Modelo com travamentos fixos – Tensões atuantes – Passo de carga 16 ( $\lambda_0 = 1,07$  e  $\lambda = 80$ )

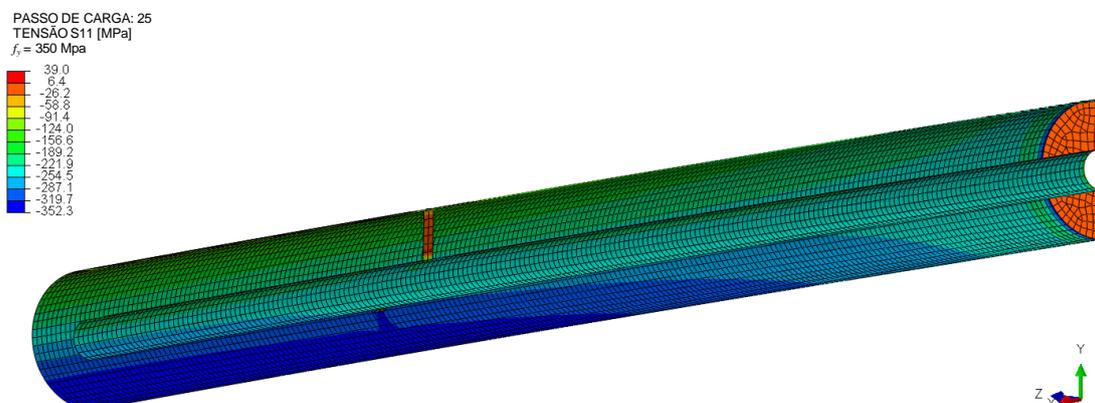


Figura 17 – Modelo com travamentos fixos – Tensões atuantes – Passo de carga 25 ( $\lambda_0 = 1,07$  e  $\lambda = 80$ )

Verifica-se que a força crítica é atingida sem que o perfil interno tenha sua seção plastificada. O comportamento observado para os modelos com travamentos fixos se repetiu para todos os modelos com travamentos deslizantes.

#### 4 CONCLUSÃO

O estudo do comportamento estrutural de perfis tubulares compostos concêntricos é relevante para situações nas quais se deseja utilizar os perfis de aço laminados a quente disponíveis no mercado, mesmo que estes, isoladamente, não tenham capacidade resistente para suportar as forças axiais de compressão atuantes na estrutura. Quando ocorre essa situação, a composição de perfis torna-se uma opção interessante na qual são evitados, além de impactos na arquitetura da estrutura presentes em outras possíveis formas de composição, complicações intrínsecas à utilização de materiais diferentes, como quando são utilizadas estruturas mistas de aço e concreto.

Para viabilizar a utilização dos perfis tubulares concêntricos compostos foram estudadas soluções de fabricação e montagem viáveis do ponto de vista econômico. Essas soluções abrangeram a fixação das extremidades dos perfis com os flanges e os travamentos dos tubos ao longo de seus comprimentos.

Os modelos numéricos estudados mostraram que o perfil com maior rigidez tem sua carga crítica reduzida quando trabalha em conjunto com o perfil com menor rigidez, estabilizando o perfil de menor rigidez. Dessa forma, o perfil de menor rigidez passa a absorver mais força que quando trabalha isoladamente, de forma que, quando há o travamento entre os tubos, a força resistente do conjunto seja sempre superior à soma das forças resistentes dos perfis isolados. Quando se trabalha com perfis sem travamentos, para uma determinada faixa de razão de esbeltez, a força resistente do conjunto pode ser inferior à soma das forças resistentes dos perfis isolados.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte das agências brasileiras CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

#### REFERÊNCIAS

- 1 Chen WF, Lui EML. Structural Stability. Theory And Implementation. 1<sup>st</sup> ed. Cidade: Prentice-Hall; 1987.
- 2 Hibbeler RC. Resistência Dos Materiais. 7<sup>a</sup> ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil; 2010.
- 3 Boyce WE, Diprima RC. Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno. 7<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC; 2002.

---

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

- 4 Law KH, Gardner L. Lateral Instability Of Elliptical Hollow Section Beams. Engineering Structures, v. 37; 2012.
- 5 ECCS - European Convention For Constructional Steelwork – Committee 8. Manual On Stability Of Steel Structures, 2<sup>nd</sup> Ed. 1976.
- 6 EN 1993-1-1 : Design of steel structures - Part 1-1: General Rules And Rules For Buildings – Eurocode 3; 2005.
- 7 Associação Brasileira de Normas Técnicas – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios – NBR 8800; 2008.
- 8 American Institute Of Steel Construction – Specification For Structural Steel Buildings – ANSI/AISC 360; 2010.
- 9 Associação Brasileira de Normas Técnicas – Projeto De Estruturas De Aço e De Estruturas Mistas de Aço e Concreto De Edificações Com Perfis Tubulares – NBR 16239; 2013.
- 10 Canadian Standards Association. CAN/CSA-S16 Limit States Design Of Steel Structures. Mississauga, Ontario, December; 2005.
- 11 ENV 1993-1-1 : Design of steel structures - Part 1-1: General Rules And Rules For Buildings – Eurocode 3; 1992.

---

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