



DIMENSIONAMENTO DE BARRAS DE SEÇÕES TRANSVERSAIS TUBULARES SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO

João Paulo Barros Barbosa

Lucas Vieira dos Santos

joaopbarrosb@gmail.com

llucasvsantos@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Juliano Geraldo Ribeiro Neto

julianogeraldo.puc@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Resumo. Os perfis tubulares, quando comparados a outros, apresentam alta resistência à torção, cargas axiais e aos efeitos combinados. Atualmente, a ABNT NBR 16239:2013 apresenta novos conceitos e equações que não constam na ABNT NBR 8800:2008 e que permitem o uso e dimensionamento de perfis de seções tubulares submetidos à força axial de compressão de forma mais adequada e econômica. Assim sendo, o objetivo do presente trabalho foi realizar um estudo comparativo dos resultados fornecidos pelos métodos de dimensionamento desses perfis indicados nas normas específicas e os obtidos em análises numéricas a partir da modelagem baseada no Método dos Elementos Finitos com auxílio da versão estudantil do software ANSYS® 17.0. Para simular numericamente o comportamento estrutural foram considerados elementos bi rotulados com liberação de deslocamento longitudinal, obtendo-se os valores referentes à força axial de flambagem elástica (N_e) para o primeiro modo de flambagem e em uma segunda análise a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$). Os valores obtidos numericamente se mostraram coerentes com os valores calculados a partir das normas. O método numérico comprovou a eficácia das prescrições normativas e os valores apresentados pelo software confirmaram a maior tendência das equações apresentadas pela ABNT NBR 16239:2013 em representar o comportamento real de perfis tubulares.

Palavras-chaves: Perfis tubulares, Método dos Elementos Finitos, Análises numéricas.

1 INTRODUÇÃO

A norma ABNT NBR 8800:2008 (Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios), publicada em 2008, teve fundamental importância no processo de evolução do uso e dimensionamento de estruturas de aço e mistas de concreto e aço no Brasil. Segundo Fakury *et al* (2010), essa norma apresenta procedimentos de cálculo semelhantes aos que estão presentes em normas de outros países e que possuem reconhecimento internacional. No entanto, por tratar de perfis de aço de forma geral, essa norma não considera as especificidades do comportamento estrutural de perfis tubulares.

Com a sua publicação, a nova norma ABNT NBR 16239:2013 (Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares), não tornou o uso da ABNT NBR 8800:2008 errôneo ou obsoleto no que diz respeito ao dimensionamento de perfis tubulares. A nova norma apresenta prescrições de cálculo mais precisas para diversas situações de comportamento dos perfis tubulares, apresentando novos procedimentos para a determinação do fator de redução (χ) e do coeficiente de redução da área líquida para elementos tracionados (C_t). No entanto, conforme Fakury *et al* (2010), os procedimentos contidos na norma anterior continuam válidos e servem como base fundamental para o correto uso da nova norma.

A resistência à compressão de perfis tubulares é tratada de maneira diferente pelas duas normas. A ABNT NBR 8800:2008 apresenta um procedimento de cálculo com base na determinação do fator de redução associado à resistência à compressão semelhante para qualquer tipo de perfil. Esse fator é obtido a partir das equações (1) e (2) apresentadas a seguir:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2}, \text{ para } \lambda_0 \leq 1,5; \quad (1)$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}, \text{ para } \lambda_0 > 1,5 \quad (2)$$

Onde λ_0 é o índice de esbeltez reduzido obtido a partir dos valores do fator de redução total associado à flambagem local (Q), área bruta da seção transversal da barra (A_g), resistência ao escoamento do material (f_y) e da força axial de flambagem elástica (N_e) conforme equação (3) apresentada abaixo:

$$\lambda_0 = \left(\frac{Q A f_y}{N_e} \right)^{0,5} \quad (3)$$

A força axial de flambagem elástica (N_e) é calculada através da equação (4) que é apresentada pela ABNT NBR 8800:2008:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (\text{kN}) \quad (4)$$

Em que E é o módulo de elasticidade do aço, I é o momento de inércia da seção transversal, K é o coeficiente de flambagem e L é o comprimento do perfil.

A ABNT NBR 16239:2013 prescreve um método de determinação do fator de redução semelhante ao presente na norma canadense CAN/CSA S16.1:2003 cujo valor é dado pela equação (5):

$$\chi = \frac{1}{(1 + \lambda_0^{4,48})^{1/2,24}} \quad (5)$$

Batista et al (2010) afirma que, considerando o coeficiente de ponderação da resistência $\gamma=1,1$ para as normas brasileiras, a curva de flambagem adotada pela ABNT NBR 16239 apresenta valores inferiores aos apresentados pela curva europeia (curva “a0” com coeficiente de ponderação da resistência $\gamma=1,0$) e superiores ao da norma brasileira de perfis laminados, sendo coincidente com a curva resultante das prescrições da norma canadense conforme figura 1.

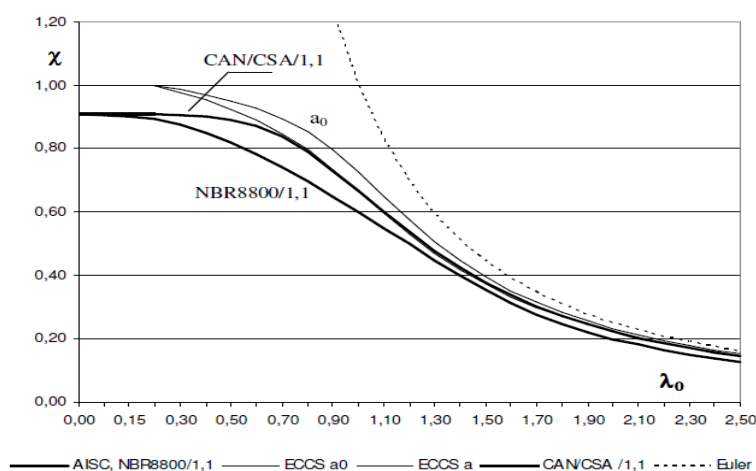


Figura 1. Curvas brasileiras de flambagem e curva “a0” do Eurocode EC3. Fonte: Batista et al (2010)

2 METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada revisão bibliográfica em artigos, teses, dissertações e prescrições normativas sobre as mudanças trazidas pela ABNT NBR 16239:2013 com relação ao dimensionamento de perfis com seção transversal tubular submetidos a esforço axial de compressão. A análise comparativa entre os resultados fornecidos pela ABNT NBR 8800:2008 e pela ABNT NBR 16239:2013, se deu a partir da determinação da resistência à compressão de perfis tubulares de seção circular, com auxílio de planilhas elaboradas no software Excel de acordo com as equações apresentadas por cada uma das normas. Dentro da tabela de perfis tubulares comerciais fornecidos no Brasil, foram escolhidas seções de forma que foram obtidas diferentes faixas de variação da esbeltez. As condições de contorno foram mantidas as mesmas em todos os casos, e os resultados obtidos foram analisados com o auxílio de gráficos e tabelas.

Toda a análise numérica se deu a partir do uso da versão estudantil do software ANSYS®17.0, que se baseia no Método dos Elementos Finitos. Esse programa oferece a

possibilidade de simular o comportamento estrutural de qualquer tipo de seção. Para este trabalho foram analisados elementos bi rotulados com liberação de deslocamento longitudinal com diferentes dimensões (diâmetro, espessura e comprimento) submetidos a esforço axial de compressão.

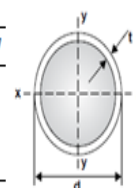
Foi utilizado o elemento de barra BEAM188, a resistência ao escoamento do aço (f_y) de 350 MPa, resistência à ruptura do aço à tração (f_u) de 485 MPa e módulo de elasticidade (E) de 200000 MPa. O programa permite a realização da análise de resistência à compressão dos perfis em duas etapas. Inicialmente se faz uma análise linear de estabilidade seguida por uma análise de pós-flambagem.

A tabela 1 apresenta a configuração dos 27 modelos analisados variando-se o comprimento (L) em 1000, 2000 e 3000mm e espessuras em 6.4, 7.1, 8.0, 12.5 e 17.5mm para os tubos de diâmetros de 219.1, 273.0 e 323.8mm:

Tabela 1. Dimensões dos perfis tubulares escolhidos e Nomenclaturas das dimensões das seções tubulares. Fonte: Catálogo de tubos estruturais - Vallourec (2016)

Nomenclatura	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5	Tubo 6	Tubo 7	Tubo 8	Tubo 9	Tubo 10	Tubo 11	Tubo 12	Tubo 13	Tubo 14
d (mm)	219	219	219	219	219	219	219	219	219	273	273	273	273	273
t (mm)	6	13	18	6	13	18	6	13	18	7	13	18	7	13
L (mm)	1000	1000	1000	2000	2000	2000	3000	3000	3000	1000	1000	1000	2000	2000

Nomenclatura	Tubo 15	Tubo 16	Tubo 17	Tubo 18	Tubo 19	Tubo 20	Tubo 21	Tubo 22	Tubo 23	Tubo 24	Tubo 25	Tubo 26	Tubo 27
d (mm)	273	273	273	273	324	324	324	324	324	324	324	324	324
t (mm)	18	7	13	18	8	13	18	8	13	18	8	13	18
L (mm)	2000	3000	3000	3000	1000	1000	1000	2000	2000	2000	3000	3000	3000



A figura 2 apresenta o fluxograma de análise utilizado no software para se estudar os valores referentes à flambagem e à resistência à compressão axial dos perfis modelados.

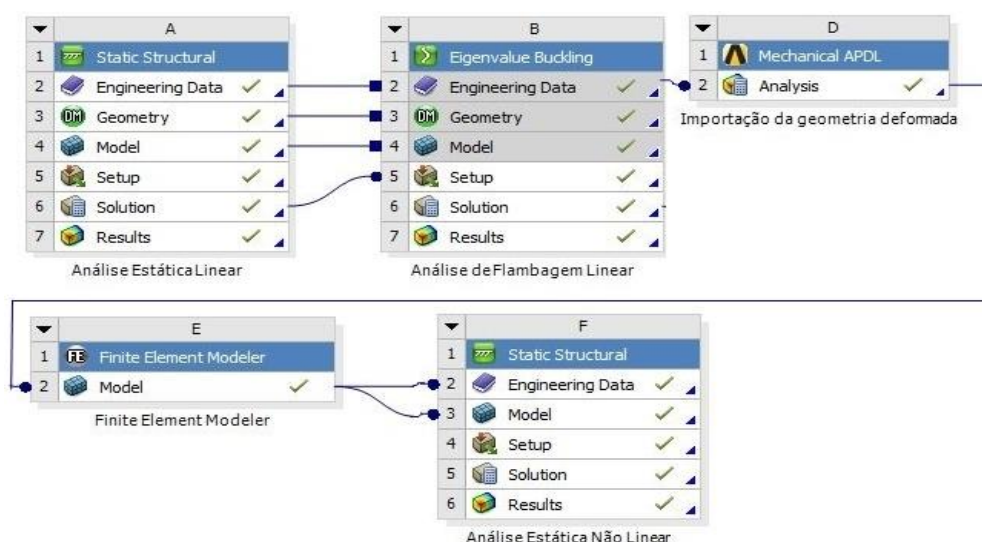


Figura 2. Fluxograma de análise. Fonte: ANSYS®17.0 (2016)

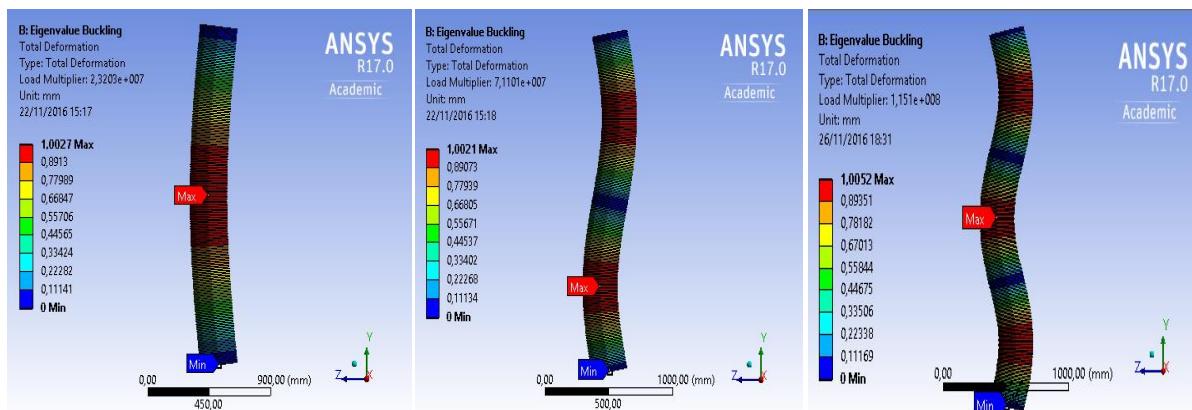
Esse processo permite a obtenção do valor da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$). O valor da carga de colapso obtida do modelo numérico foi então comparado com os valores das forças axiais de compressão resistentes de cálculo normativas nominais (sem a aplicação de coeficientes de segurança).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para todos os tubos escolhidos foram analisados os valores referentes à carga crítica de flambagem (N_e) para o primeiro e terceiro modo, assim como suas respectivas configurações de flambagem apresentadas pelo software.

A análise da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) se deu a partir da extração dos dados do software que permitiram a criação do diagrama carga-deslocamento para cada um dos perfis analisados através de planilhas eletrônicas.

Para o tubo de diâmetro externo de 273mm, espessura de 7,1mm e 2000mm de comprimento (Tubo 13) foram feitas, além das análises citadas anteriormente, a análise do quinto modo de flambagem e do comportamento da carga crítica de flambagem (N_e) para cada um dos modos estudados. A figura 3 apresenta as configurações deformadas do perfil apresentadas pelo software nos modos de flambagem 1, 3 e 5, respectivamente. As figuras evidenciam a formação de 1, 2 e 3 meia ondas e suas respectivas cargas.



Modo 1: $N_e = 23.203,00 \text{ kN}$ Modo 3: $N_e = 71.101,00 \text{ kN}$ Modo 5: $N_e = 115.100,00 \text{ kN}$

Figura 3. Configuração deformada – 1º, 3º e 5º modos de flambagem – Tubo 13. Fonte: ANSYS®17.0 (2016)

O valor teórico para o N_e calculado de acordo com as normas em estudo para o primeiro modo de flambagem é de 25.883,04 kN. O valor do N_e obtido através do software para o 1º modo de flambagem representa 90% do valor teórico.

O modo 1, ilustrado na figura 3, apresenta a configuração que foi utilizada para incorporar as imperfeições iniciais ao modelo na análise posterior de pós-flambagem.

A partir dos resultados obtidos tem-se que, para esse tubo, a carga de colapso foi de aproximadamente 2025 kN. Esse valor corresponde à 101% do valor do $N_{c,Rd}$ da ABNT NBR 8800:2008 (2007 kN) e à 98% do valor do $N_{c,Rd}$ da ABNT NBR 16239:2013 (2072,26 kN).

A análise do perfil foi feita através da aplicação gradual da carga em uma etapa (step) dividida em dez subetapas (substeps) de carregamento. O controle da aplicação da força e dos deslocamentos gerados foi realizado pelo software através do método de Comprimento de Arco. A partir dessa análise foi possível extrair os valores de força e de deslocamentos para cada passo de carga e criação do gráfico 1.

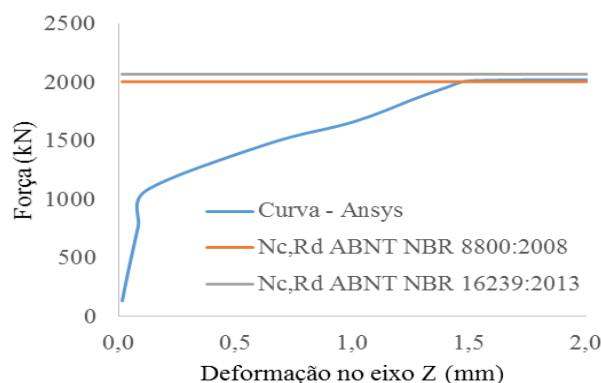


Gráfico 1. Diagrama Carga-Deslocamento – Tubo 13. Fonte: ANSYS®17.0 (2016)

Todo processo de análise detalhado para o tubo 13 foi realizado também para todos os outros tubos selecionados. A tabela 2 apresenta os resultados obtidos para cada um dos perfis escolhidos.

Tabela 2. Forças axiais de flambagem elásticas (N_e) numéricas e teóricas. Fonte: Próprio autor (2016)

Nomenclatura	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5	Tubo 6	Tubo 7	Tubo 8	Tubo 9	Tubo 10	Tubo 11	Tubo 12	Tubo 13	Tubo 14
Ne teórico normativo (kN) (1)	47789	85767	111981	11947	21442	27995	5310	9530	12442	103532	171672	227317	25883	42918
Ne 1º modo - Ansys (kN) (2)	36964	67223	88738	11115	20028	26237	5133	9229	12069	71101	119430	160050	23203	38634
(2)/(1)	77%	78%	79%	93%	93%	94%	97%	97%	97%	69%	70%	70%	90%	90%

Nomenclatura	Tubo 15	Tubo 16	Tubo 17	Tubo 18	Tubo 19	Tubo 20	Tubo 21	Tubo 22	Tubo 23	Tubo 24	Tubo 25	Tubo 26	Tubo 27
Ne teórico normativo (kN) (1)	56829	11504	19075	25257	195438	292772	391093	48859	73193	97773	21715	32530	43455
Ne 1º modo - Ansys (kN) (2)	51354	10930	18159	24088	118970	180260	243870	42038	63229	84838	20233	30369	40653
(2)/(1)	90%	95%	95%	95%	61%	62%	62%	86%	86%	87%	93%	93%	94%

A tabela 3 apresenta o valor numérico encontrado para o $N_{c,Rd}$ assim como os valores teóricos normativos para essa resistência de cada um dos tubos analisados. As relações

percentuais entre os valores apresentadas nessa tabela foram obtidas através da razão entre o valor numérico e o valor teórico da força axial de compressão resistente de cálculo a partir das prescrições de cada uma das normas em estudo.

Tabela 3. Forças axiais de compressão resistentes de cálculo ($N_{c,Rd}$) numéricas e teóricas. Fonte: Próprio autor (2016)

Perfil	$N_{c,Rd}$ Ansys (kN) (1)	$N_{c,Rd}$ ABNT NBR 8800:2008 (kN) (2)	(1)/(2)	$N_{c,Rd}$ ABNT NBR 16239:2013 (kN) (3)	(1)/(3)
Tubo 1	1480	1478	100%	1498	99%
Tubo 2	2801	2799	100%	2838	99%
Tubo 3	3795	3829	99%	3884	98%
Tubo 4	1345	1421	95%	1492	90%
Tubo 5	2422	2686	90%	2825	86%
Tubo 6	3063	3666	84%	3864	79%
Tubo 7	1121	1331	84%	1460	77%
Tubo 8	1960	2506	78%	2758	71%
Tubo 9	2671	3409	78%	3764	71%
Tubo 10	2064	2058	100%	2075	99%
Tubo 11	3561	3539	101%	3570	100%
Tubo 12	4873	4856	100%	4900	99%
Tubo 13	2025	2007	101%	2072	98%
Tubo 14	3477	3448	101%	3564	98%

Perfil	$N_{c,Rd}$ Ansys (kN) (1)	$N_{c,Rd}$ ABNT NBR 8800:2008 (kN) (2)	(1)/(2)	$N_{c,Rd}$ ABNT NBR 16239:2013 (kN) (3)	(1)/(3)
Tubo 15	4768	4726	101%	4891	97%
Tubo 16	1445	1925	75%	2056	70%
Tubo 17	2500	3301	76%	3533	71%
Tubo 18	3430	4518	76%	4845	71%
Tubo 19	2769	2763	100%	2779	100%
Tubo 20	4260	4244	100%	4270	100%
Tubo 21	5877	5843	101%	5880	100%
Tubo 22	2747	2714	101%	2777	99%
Tubo 23	4229	4167	101%	4267	99%
Tubo 24	5820	5734	101%	5875	99%
Tubo 25	2501	2634	95%	2767	90%
Tubo 26	3856	4042	95%	4250	91%
Tubo 27	4122	5556	74%	5851	70%

A partir das tabelas 2 e 3 percebe-se que a relação percentual entre os valores numéricos e os valores teóricos normativos varia para cada um dos tubos. Essa relação se mostra mais satisfatória em um determinado conjunto que apresentam valores mais próximos de 100%. Determinados perfis apresentaram certo distanciamento entre os valores teórico e numérico. Essas divergências foram tratadas como indícios de limitação do modelo numérico utilizado na análise.

Os perfis tubulares modelados possuem diferentes diâmetros externos e comprimentos. Dessa forma o valor obtido a partir da razão entre (L/d) e (d/t) é diferente para cada tubo modelado conforme tabela 4.

Tabela 4. Relações entre as dimensões dos tubos estudados. Fonte: Próprio autor (2016)

Nomenclatura	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Tubo 5	Tubo 6	Tubo 7	Tubo 8	Tubo 9	Tubo 10	Tubo 11	Tubo 12	Tubo 13	Tubo 14
L/d	4,56	4,56	4,56	9,13	9,13	9,13	13,69	13,69	13,69	3,66	3,66	3,66	7,33	7,33
d/t	34,23	17,53	12,52	34,23	17,53	12,52	34,23	17,53	12,52	38,45	21,84	15,60	38,45	21,84

Nomenclatura	Tubo 15	Tubo 16	Tubo 17	Tubo 18	Tubo 19	Tubo 20	Tubo 21	Tubo 22	Tubo 23	Tubo 24	Tubo 25	Tubo 26	Tubo 27
L/d	7,33	10,99	10,99	10,99	3,09	3,09	3,09	6,18	6,18	6,18	9,26	9,26	9,26
d/t	15,60	38,45	21,84	15,60	40,48	25,90	18,50	40,48	25,90	18,50	40,48	25,90	18,50

O gráfico 2 apresenta a variação da relação percentual entre os valores numéricos obtidos e os valores teóricos normativos das forças axiais de flambagem elásticas (N_e) para o primeiro modo em função da relação L/d . A partir desse gráfico percebe-se que quanto maior essa relação, mais satisfatórios são os resultados alcançados a partir do método numérico utilizado.

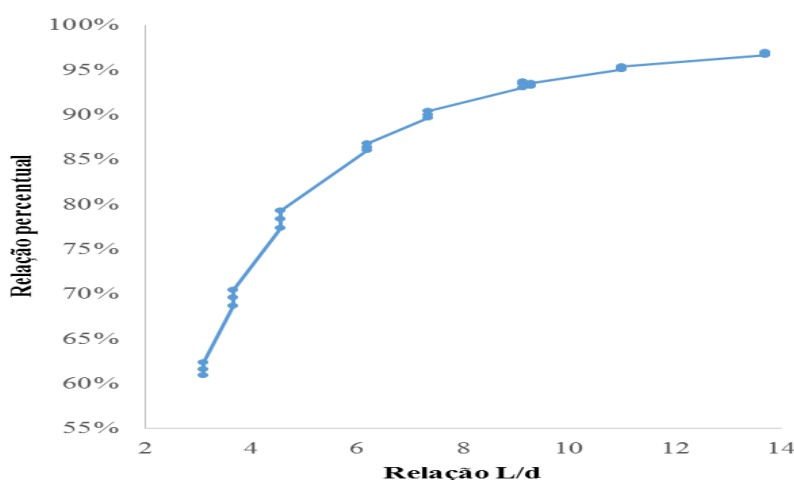


Gráfico 2. Variação da relação percentual entre os valores numéricos e os valores teóricos normativos das forças axiais de flambagem elásticas (N_e) em função da relação L/d .

O gráfico 3 relaciona os resultados obtidos para a relação percentual entre os valores numéricos e teóricos do $N_{c,Rd}$ da ABNT NBR 8800:2008 com a razão L/d . Esse gráfico demonstra que existe uma relação entre esses valores. Apesar de o gráfico não apresentar uma configuração bem definida é possível perceber que quanto maior a razão L/d mais os valores numéricos tendem a se distanciar dos calculados a partir da norma ABNT NBR 8800:2008.

Essa condição pode se justificar ao se considerar que nos tubos de maior comprimento as imperfeições iniciais importadas para a segunda etapa de análise são proporcionalmente maiores e tendem a reduzir o valor do $N_{c,Rd}$ do modelo numérico. Esse comportamento se mantém o mesmo considerando-se os valores do $N_{c,Rd}$ da ABNT NBR 16239:2013.

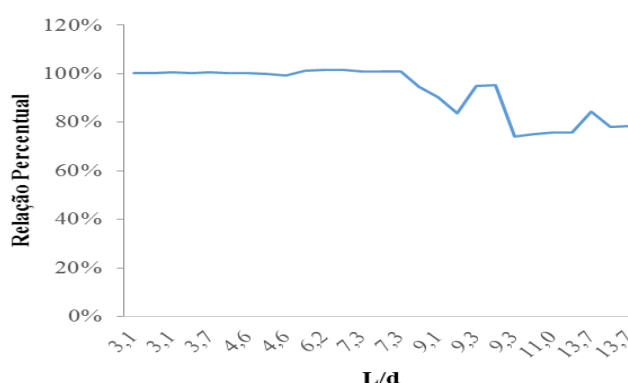


Gráfico 3. Relação percentual entre os valores numéricos e teóricos do $N_{c,Rd}$ da ABNT NBR 8800:2008 em função da razão L/d .

O principal objetivo desse trabalho se trata da comparação entre os valores da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) normativos com os obtidos através da análise numérica. O gráfico 4 apresenta os valores do $N_{c,Rd}$ para cada uma das normas assim como os valores obtidos através do software para cada um dos perfis tubulares estudados.

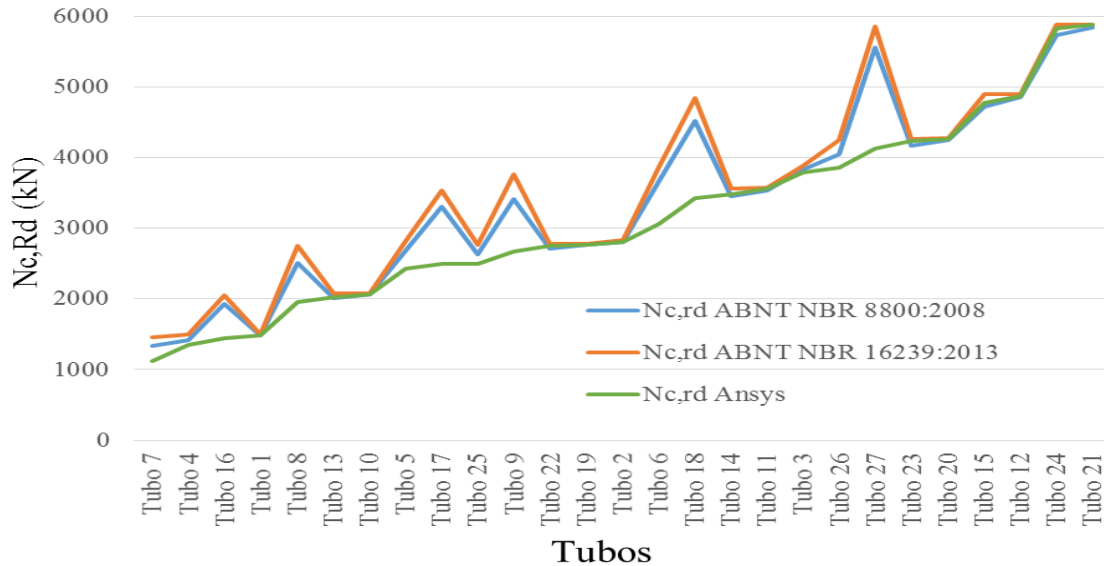


Gráfico 4. Valores numéricos e teóricos do $N_{c,Rd}$ de cada um dos perfis tubulares analisados.

Tem-se que os valores do $N_{c,Rd}$ teóricos são sempre maiores ou aproximadamente iguais aos obtidos através do método numérico. Tem-se também que os valores de $N_{c,Rd}$ calculados através da nova norma são sempre superiores aos obtidos a partir da equação proposta pela ABNT NBR 8800:2008. O gráfico 4 facilita a percepção de que os valores numéricos são próximos dos valores teóricos, exceto em alguns pontos.

Nos pontos de maior divergência de valores no gráfico 4 estão os perfis que possuem os maiores valores para a razão L/d e que, como apresentado anteriormente, aparentemente indicam uma limitação do modelo numérico adotado para esse estudo.

4 CONCLUSÕES

Os valores obtidos através da modelagem numérica apresentam uma boa correlação tanto para a força axial de flambagem elástica (N_e), quanto para a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$). Tem-se, no entanto, que o modelo numérico utilizado apresenta uma variação em sua eficácia de acordo com as dimensões dos perfis modelados.

O modelo apresentou resultados para o N_e mais precisos em tubos em que a relação L/d é maior. Com relação aos valores do $N_{c,Rd}$, estes se aproximam mais dos valores normativos em tubos em que essa relação é menor. Em tubos de menor comprimento, existe uma maior complexidade nos processos de convergência utilizados pelo software para determinar o valor do N_e . Tal fato pode justificar o melhor desempenho do modelo em apresentar bons resultados para o N_e em perfis cuja relação L/d é maior.

Quanto maior o comprimento do perfil, maior é a tendência de que as imperfeições geométricas incorporadas na segunda etapa influenciem no resultado da força de colapso do perfil à compressão. Portanto, são coerentes os resultados que demonstram que os perfis tubulares com os menores valores para a relação L/d apresentam valores numéricos para o $N_{c,Rd}$ mais convergentes com as prescrições normativas.

Os valores do $N_{c,Rd}$ resultantes das análises numéricas se mostraram próximos aos valores normativos. Esses valores em todos os casos se assemelham mais aos valores da ABNT NBR 8800:2008. No entanto, os valores dessa resistência calculados a partir da nova norma são sempre superiores aos alcançados numericamente. Em alguns casos a resistência calculada com o uso do modelo numérico se mostra superior à obtida a partir da ABNT NBR 8800:2008.

Dessa forma, tem-se que os resultados obtidos através da nova norma são sempre mais conservadores. Considerando que o método numérico utilizado não avalia todos os fatores que, em situações reais, geram redução na força axial de compressão resistente de cálculo, percebe-se que a nova norma possui uma maior tendência em considerar todas essas outras influências e gerar um dimensionamento mais adequado.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Dr. Flávio Teixeira de Sousa, da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ao Engenheiro Mecânico, André Durval de Andrade, da Mills Infraestrutura e ao Msc. Carlos Alberto Medeiros, da Universidade de Mogi das Cruzes que prontamente nos auxiliaram no desenvolvimento do presente artigo.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 8800:2008. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT NBR 16239:2013. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

ANSYS®, 2016. *User's Manual for release 17.0*. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA.

Batista, E.M.; Fakury, R.H.; Freitas, A.S.; Requena, J.A.V.; Pimenta, R.J.; Araújo, A.H.M., 2010. Resistência de barras comprimidas de aço: curvas de flambagem para perfis laminados a quente e soldados, formados a frio e tubulares. *Construmetal 2010*, São Paulo.

CAN/CSA S16.1:2003. *Steel structures for buildings – limit states design*. Canadian Institute of Steel Construction, Rexdale, Ontario, Canadian.

Fakury, R. Freitas, A. M. S., Requena, J. A. V., Pimenta, R. J., Batista, E. de M. e Araújo, A.H. M. A futura norma brasileira de projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto com perfis tubulares. *Construmetal 2010*, São Paulo.

Vallourec Tubos do Brasil, 2016. Tubos Estruturais: Seção Circular, Quadrada e Retangular. Catálogo Comercial.