



Estudo teórico-comparativo sobre a determinação do fator de redução de flambagem global em pilares soldados de aço

Lucas Fadini Favarato¹, Thiago Tononi Turini², Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani³

¹ Universidade Federal do Espírito Santo (Departamento de Engenharia Civil) | ArcelorMittal Tubarão – lucas.favarato@arcelormittal.com.br

² Universidade Federal do Espírito Santo (Departamento de Engenharia Civil) – thiagoturini99@gmail.com

³ Universidade Federal do Espírito Santo (Departamento de Engenharia Civil) – afcalenzani@gmail.com

Resumo

No projeto de elementos de aço submetidos à compressão, parâmetros tais como o eixo de flexão e o tipo de seção transversal têm grande influência na resistência final, dada pelo produto entre a força que provoca o escoamento e um fator de redução associado à flambagem por flexão ou flexo-torção. A rigor, a determinação deste parâmetro é complexa, baseada em ensaios laboratoriais e análises numéricas sofisticadas, que englobam a distribuição das tensões residuais e a curvatura inicial da barra, tomada, no máximo, igual a $L/1500$. Por outro lado, o referido coeficiente pode ser obtido através de um procedimento analítico, assumindo-se uma curvatura inicial superior ao valor mencionado, a fim de prever também a influências das tensões residuais. A resistência pode ser aproximada pela interseção das curvas correspondentes aos regimes elástico e plástico, momento em que ocorre a formação abrupta da rótula plástica. Neste contexto, a fim de verificar a acurácia do método indicado, este estudo propõe a realização de um estudo paramétrico, em que diferentes curvaturas iniciais são adotadas para avaliar a resistência de pilares de aço utilizando perfis soldados. Ao final, os resultados obtidos são comparados às prescrições normativas das normas brasileira ABNT NBR 8800:2008 e europeia EN 1993-1-1:2005, confirmando a boa precisão do procedimento em estudo.

Palavras-chave

Flambagem global; fator de redução; estudo comparativo; perfis de aço soldados; curvatura inicial; tensão residual.

Abstract

In the design of steel elements under compression, the bending axis and the cross-sectional geometry directly affects the resistance, given by the product between the yielding force and a reduction factor related to global buckling. Indeed, its calculation is complex, based on laboratory tests and sophisticated numerical analyses that include the residual stresses distribution and the initial curvature, taken as $L/1500$ at most. Nevertheless, it can be obtained through an analytical procedure that overestimate the initial curvature so that the residual stress effects are taken into account. Hence, the intersection between both elastic and plastic curves states the plastic hinge formation, which defines the ideal resistance. In this context, this article proposes a parametric study in which different initial curvatures are tested to evaluate the resistance of welded steel columns. Finally, the results are compared to prescriptions from the Brazilian National Design Code ABNT NBR 8800:2008 and the European Design Code EN 1993-1-1:2005, assessing the method's accuracy.

Keywords:

Global buckling; reduction factor; comparative analysis; welded steel profiles; initial curvature; residual stress.

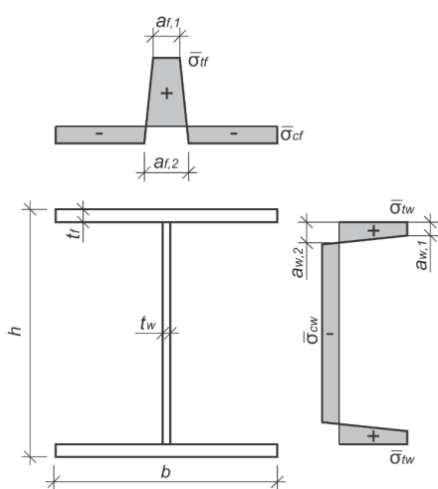


1. Introdução

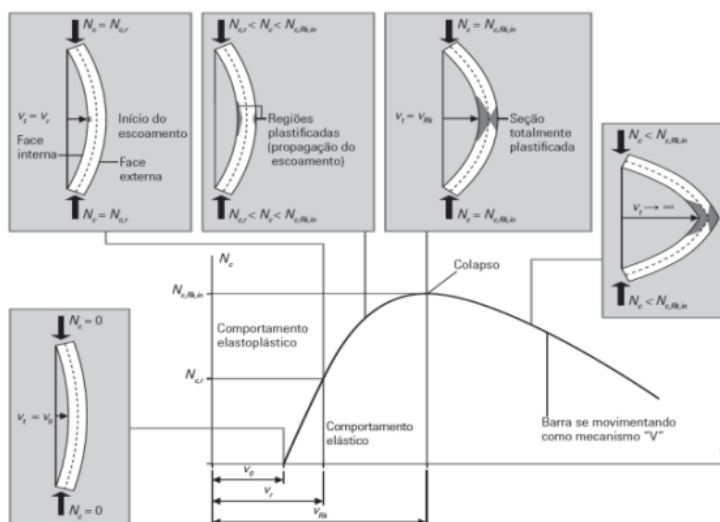
Os perfis de aço soldados são constituídos pela união de diversas chapas através de solda elétrica contínua, disponíveis em geometrias variadas (FAKURY; CASTRO E SILVA; CALDAS, 2017), com tamanhos capazes de atender às necessidades estruturais com economia. Além disso, seu uso é bastante comum em projetos pela elevada flexibilidade arquitetônica, sobretudo no que tange à produção de elementos com seção transversal variável (BAPTISTA; MUZEAU, 2001). Outro exemplo de sua aplicação são as vigas mistas de aço e concreto, cuja mesa superior do perfil de aço é composta por uma chapa de menor espessura e/ou largura, uma vez que a laje de concreto é o principal elemento de compressão.

Adicionalmente, perfis soldados são bastante vantajosos para pilares de aço, seja pela variedade de seções disponíveis além daquelas padronizadas pela NBR 5884 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), seja pela possibilidade de projetar elementos com máximo aproveitamento do material. No dimensionamento, a determinação da força resistente característica (N_{Rk}) deve englobar a influência de dois parâmetros chave, originários do processo de fabricação da peça.

As tensões residuais, em primeiro lugar, são induzidas pelo aquecimento localizado durante o processo de solda das mesas na alma (Figura 1a), afetando diretamente a resistência à flambagem da barra em decorrência da superposição dos estados de tensão, o que causa escoamento primário da peça e perda de rigidez (TANKOVA et al., 2019). A descrição detalhada de sua distribuição e magnitude, comumente assumida igual a um percentual da tensão de escoamento do aço, afetam a precisão dos procedimentos de dimensionamento das normas de cálculo. Em segundo lugar, as barras apresentam imperfeições geométricas na prática, traduzidas por uma curvatura inicial (Figura 1b), o que torna seu comportamento diferente das barras de eixo reto. Ao passo que estas preservam seu eixo retilíneo inalterado até que a força de compressão atinja a carga crítica de flambagem elástica, aquelas exibem deslocamentos laterais contínuos com incrementos de força, até a formação da rótula plástica na seção mais solicitada (FAKURY; CASTRO E SILVA; CALDAS, 2017).



(a) Fonte: TANKOVA et al. (2019)



(b) Fonte: FAKURY; CASTRO E SILVA; CALDAS (2017).

Figura 1 – (a) Tensões residuais em perfis soldados; (b) Comportamento de barras comprimidas com curvatura inicial.

Estes fatores são contemplados no cálculo do esforço resistente à compressão por meio do fator de redução associado à resistência à compressão (χ), cuja determinação é complexa, baseada em ensaios e análises numéricas sofisticadas, assumindo uma curvatura inicial de, no máximo, $L/1500$. Por outro lado, este parâmetro pode ser estimado de forma analítica, adotando-se uma curvatura superior ao valor mencionado a fim de incluir a influência das tensões residuais (FAKURY, 2019). Neste contexto, o objetivo deste estudo é verificar a acurácia do método simplificado para perfis I soldados, comparando-se os valores obtidos de χ com aqueles encontrados literatura especializada, tomando por base a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) e o EN 1993-1-1 (CEN, 2005) para cálculo de estruturas metálicas.

2. Determinação do fator de redução χ

2.1 ABNT NBR 8800:2008

O cálculo do fator de redução χ requer a determinação da carga crítica de flambagem global (N_e). Para seções com dupla simetria, o valor da carga crítica deve ser tomado como o menor valor entre as cargas críticas de flambagem por flexão em torno dos eixos x e y , conforme Eq. (1) e (2), respectivamente.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{L_x^2} \quad (1)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_y^2} \quad (2)$$

onde E é o módulo de elasticidade longitudinal do aço, tomado como 200 GPa conforme a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008); I_x é o momento de inércia em relação ao eixo x , centroidal, paralelo às mesas; I_y é o momento de inércia em relação ao eixo y , centroidal, paralelo à alma; e L_x e L_y são os comprimentos de flambagem em relação aos eixos x e y , respectivamente, tomados igual ao próprio comprimento no caso de barras biarticuladas.

Em seguida, calcula-se o índice de esbeltez reduzido (λ_0) para o eixo de flexão analisado, obtido conforme Eq. (3), em que Q é o fator de redução total associado à flambagem local, calculado conforme o Anexo F da NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008); A_g é a área bruta da seção; e f_y é a tensão de escoamento do aço.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} \quad (3)$$

Por fim, o fator de redução de flambagem global (χ) pode ser determinado pela Eq. (4).

$$\chi = \begin{cases} 0,658^{\lambda_0^2} & \lambda_0 \leq 1,5 \\ \frac{0,877}{\lambda_0^2} & \lambda_0 > 1,5 \end{cases} \quad (4)$$

2.2 EN 1993-1-1:2005

O EN 1993-1-1 (CEN, 2005) classifica as seções transversais em quatro grandes grupos, conforme item 5.6, a depender da esbeltez dos elementos. Para as classes 1, 2 e 3 – caso das seções analisadas neste estudo – o fator de redução deve ser determinado com base na esbeltez reduzida $\bar{\lambda}$, conforme Eq. (5), em que A_g é a área bruta da seção transversal; f_y é a tensão de escoamento do aço; e N_e é a força crítica de flambagem.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}} \quad (5)$$

Em seguida, deve-se calcular o fator ϕ pela Eq. (6), que leva em conta as imperfeições através do parâmetro α , assumindo valores de 0,34, 0,49 ou 0,76 para perfis soldados fletidos em torno dos eixos x ou y , segundo as curvas de flambagem a , b ou c , respectivamente.

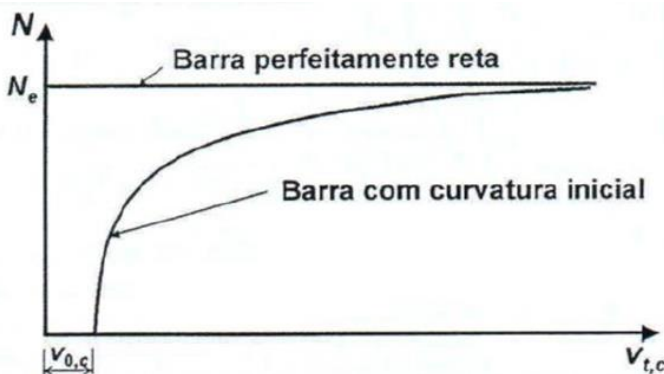
$$\phi = \frac{1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2}{2} \quad (6)$$

Por fim, o fator de redução associado à flambagem global deve ser obtido segundo a Eq. (7).

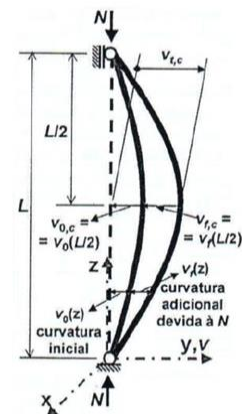
$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1, \quad (7)$$

2.3 Procedimento analítico simplificado

Barras com curvatura inicial exibem deslocamentos laterais contínuos à medida que a solicitação aumenta (Figura 2a). Em regime elástico, o colapso ocorre quando força de compressão se aproxima da carga crítica de Euler, caracterizado por deslocamentos excessivos. Para uma barra birrotulada, seus valores máximos são verificados na seção central (Figura 2b), calculados conforme Eq. (8), em que $v_{t,c}$ é o deslocamento total; N é a força de compressão aplicada; N_e é a carga crítica de flambagem de Euler para o eixo analisado; e $v_{0,c}$ é o deslocamento inicial na seção central.



(a) Fonte: FAKURY (2019).



(b) Fonte: FAKURY (2019).

Figura 2 – Comportamento de barras com curvatura inicial.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

$$v_{t,c} = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_e}} v_{0,c} \quad (8)$$

Por outro lado, o colapso em regime plástico ocorre pela formação da rótula plástica na seção central, mais solicitada, pela ação do momento solicitante $M = Nv_{t,c}$ em decorrência da curvatura inicial. Para o caso de perfis soldados fletidos em torno do eixo x , a linha neutra plástica (LNP) pode tanto passar pela mesa como pela alma. Logo, dois casos são possíveis, conforme Figura 3.



Figura 3 – Plastificação da seção central de perfis fletidos em torno do eixo x : (a) LNP na mesa; e (b) LNP na alma.

Fazendo o equilíbrio de forças na seção plastificada, o deslocamento lateral da seção central $v_{t,c,x}$ pode ser calculado igualando-se o momento solicitante ao momento de plastificação, conforme as Eq. (9) e (10), para LNP cortando a mesa ou a alma, respectivamente.

$$v_{t,c,x} = \frac{f_y}{4Nb_f} \left(A_g - \frac{N}{f_y} \right) \left(2b_f d - A_g + \frac{N}{f_y} \right) \quad (9)$$

$$v_{t,c,x} = \frac{f_y}{N} \left[b_f t_f (d - t_f) + \frac{t_w h^2}{4} - \frac{N^2}{4t_w f_y^2} \right] \quad (10)$$

Para perfis fletidos em torno do eixo y , a LNP pode tanto cortar as mesas como a alma do perfil soldado (Figura 4). O deslocamento lateral da seção central pode ser calculado conforme as Eq. (11) e (12), respectivamente.

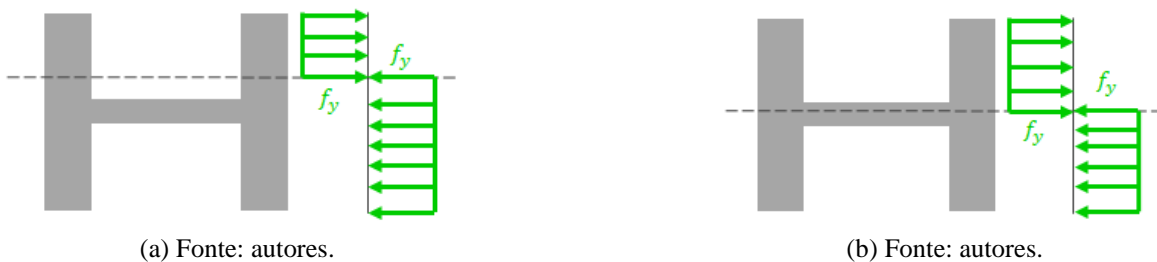


Figura 4 – Plastificação da seção central de perfis fletidos em torno do eixo y : (a) LNP nas mesas; e (b) LNP na alma.

$$v_{t,c,y} = \left(\frac{A_g f_y}{2N} - \frac{1}{2} \right) \left(b_f - \frac{A_g}{4t_f} + \frac{N}{4t_f f_y} \right) \quad (11)$$



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

$$v_{t,c,y} = \frac{t_f f_y}{2N} (b_f^2 - t_w^2) + \frac{h f_y}{N} \left(\frac{t_w^2}{4} - \frac{N^2}{4h^2 f_y^2} \right) \quad (12)$$

Conhecendo-se o comportamento elástico e plástico do elemento, a resistência à compressão nominal ideal pode ser determinada através da interseção das curvas correspondentes aos comportamentos elástico e plástico, no ponto “b”, conforme Figura 5.

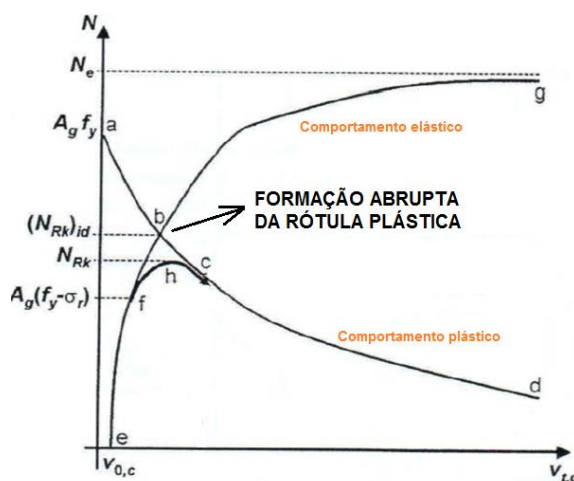


Figura 5 – Determinação da resistência axial nominal ideal (FAKURY, 2019).

Observe que no ponto “f”, por influência das tensões residuais, o escoamento se inicia e a formação da rótula plástica ocorre no ponto “h”, de fato, o que condiciona a resistência real da barra. A determinação deste ponto é complexa, feita com base em ensaios e análises numéricas sofisticadas. No entanto, a adoção de uma curvatura inicial superior a $L/1500$ permite englobar sua influência, de modo que os pontos “b” e “h” se aproximem. Assim, o coeficiente de resistência global ideal χ_{id} da barra pode ser calculado conforme a Eq. (13).

$$\chi_{id} = \frac{(N_{Rk})_{id}}{A_g f_y} \quad (13)$$

3. Método

O estudo aqui proposto consiste em determinar o valor do coeficiente de redução associado à resistência à compressão pelo procedimento analítico simplificado e pelas normas brasileira ABNT NBR 8800:2008 e europeia EN 1993-1-1:2005, conforme item 2, comparando-os ao final através do desvio percentual, de acordo com a Eq. (14).

$$\delta = \left(\frac{\chi_{\text{simplificado}}}{\chi_{\text{normativo}}} - 1 \right) \times 100 \quad (14)$$

Neste contexto, foram selecionadas duas geometrias padronizadas de perfis soldados para as colunas de teste, cujos parâmetros estão especificados a seguir, fabricados com aço CST CIVIL 300 ($f_y = 300 \text{ MPa}$, $f_u = 400 \text{ MPa}$).

- CS 400x106: $A_g = 135,6 \text{ cm}^2$, $d = 400 \text{ mm}$, $t_w = 9,5 \text{ mm}$, $t_f = 12,5 \text{ mm}$, $b_f = 400 \text{ mm}$.
- CS 500x207: $A_g = 263,9 \text{ cm}^2$, $d = 500 \text{ mm}$, $t_w = 16 \text{ mm}$, $t_f = 19 \text{ mm}$, $b_f = 500 \text{ mm}$.

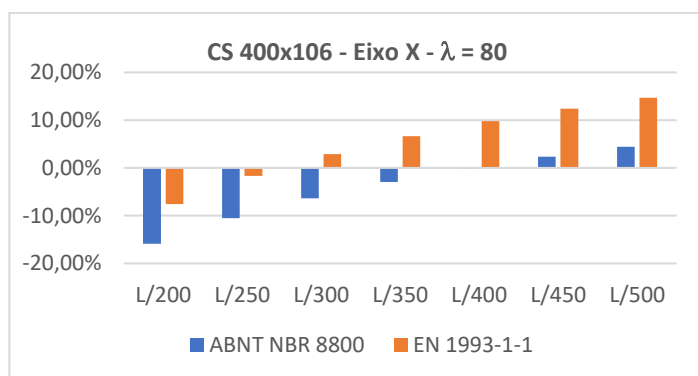
Além disso, foram analisados dois casos em que a flambagem por flexão em torno dos eixos x e y é crítica, para dois índices distintos de esbeltez: $\lambda = 80$ e $\lambda = 160$, em que $\lambda = L/r$, sendo L o comprimento da coluna biarticulada e r o raio de giração correspondente ao eixo analisado.

Por fim, para cada seção, cada eixo de flexão e cada esbeltez, foram testadas sete curvaturas iniciais, a fim de determinar aquela que conduziria a resultados mais próximos das referências normativas. São elas: $L/200$, $L/250$, $L/300$, $L/350$, $L/400$, $L/450$ e $L/500$.

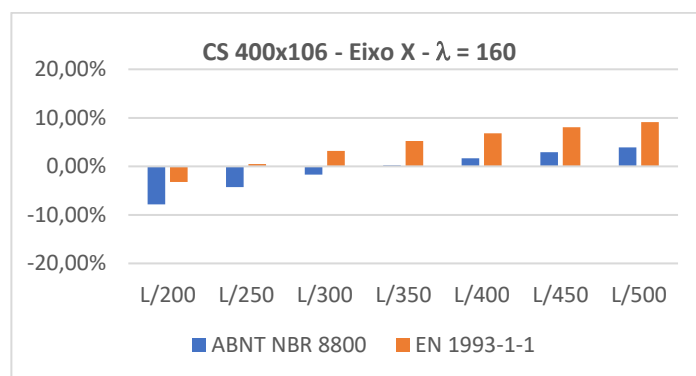
4. Resultados e discussões

Os resultados das análises para o perfil CS 400x106 estão apresentados na Figura 6. É possível observar que, para todos os cenários analisados, os desvios de χ em relação à ABNT NBR 8800:2008 são menores que aqueles verificados para o EN 1993-1-1:2005. Além disso, a curvatura inicial presumida que iguala os resultados do método analítico às prescrições normativas é sempre menor para a norma brasileira do que a norma europeia.

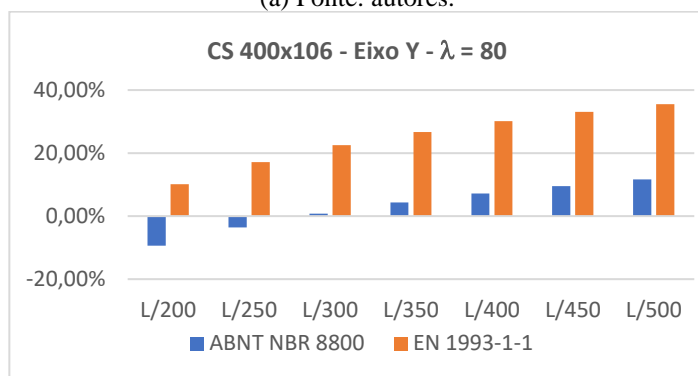
Em relação ao segundo caso analisado, i.e., flexão do perfil CS 500x207, os resultados são mostrados na Figura 7, bastante similares ao perfil menos robusto. É possível verificar que os desvios em relação à norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 também permanecem sempre inferiores aos verificados para o EN 1993-1-1:2005, além de serem necessárias menores curvaturas iniciais para igualar o coeficiente de redução aproximado ao prescrito pela norma brasileira.



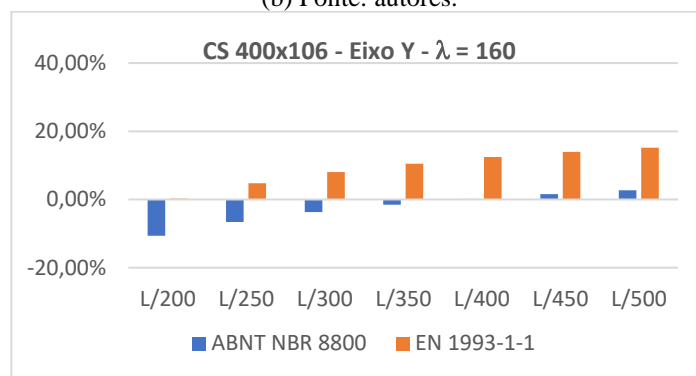
(a) Fonte: autores.



(b) Fonte: autores.



(c) Fonte: autores.

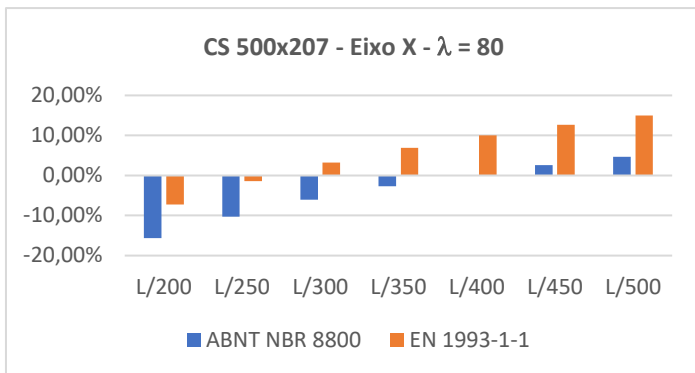


(d) Fonte: autores.

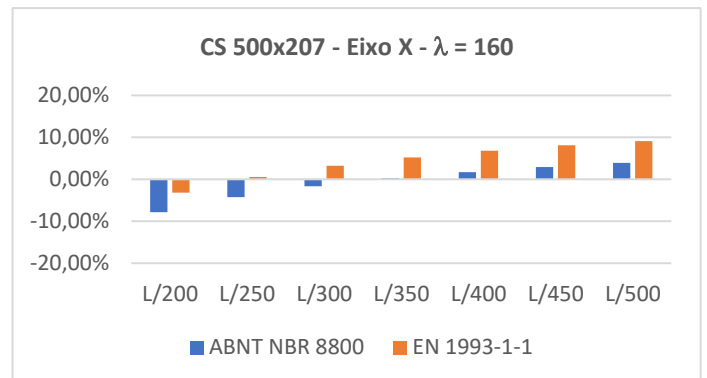
Figura 6 – Resultados para o perfil CS 400x106 considerando: (a) flexão em torno do eixo x e $\lambda = 80$; (b) flexão em torno do eixo x e $\lambda = 160$; (c) flexão em torno do eixo y e $\lambda = 80$; e (a) flexão em torno do eixo y e $\lambda = 160$.



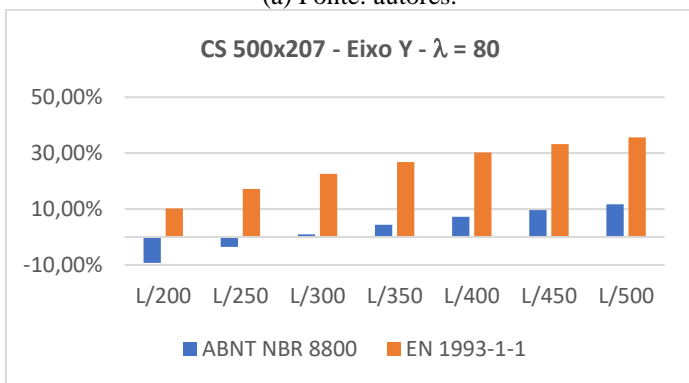
XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual



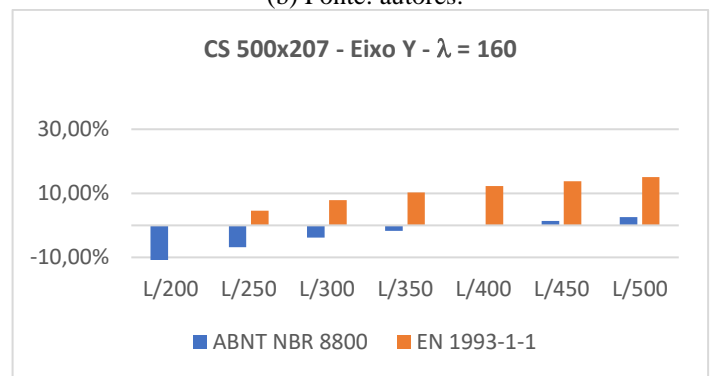
(a) Fonte: autores.



(b) Fonte: autores.



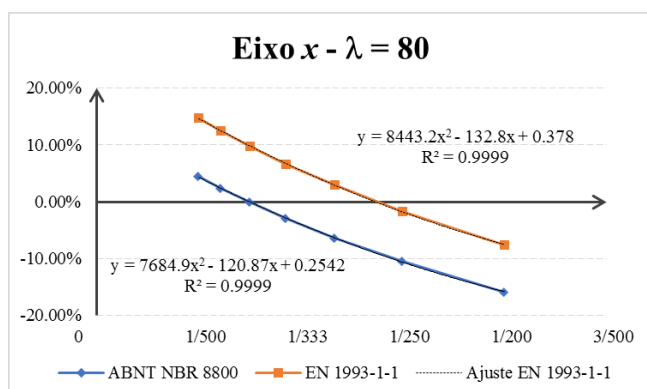
(c) Fonte: autores.



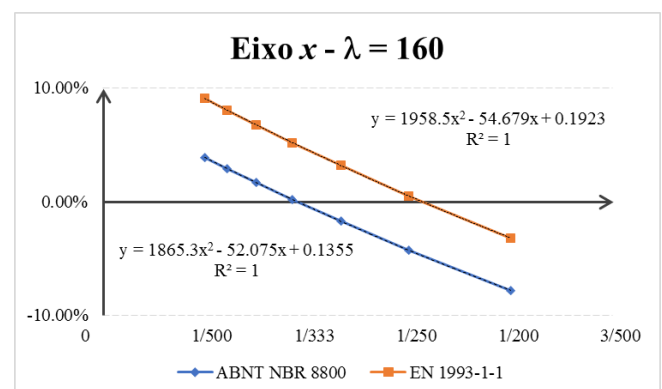
(d) Fonte: autores.

Figura 7 – Resultados para o perfil CS 500x207 para: (a) flexão em torno do eixo x e $\lambda = 80$; (b) flexão em torno do eixo x e $\lambda = 160$; (c) flexão em torno do eixo y e $\lambda = 80$; e (a) flexão em torno do eixo y e $\lambda = 160$

A determinação precisa da curvatura inicial que faz coincidir os valores normativos com o analítico pode ser feita através de um ajuste de curva pelo método dos mínimos quadrados utilizando um polinômio de segundo grau para expressar o desvio em função da curvatura inicial dividida pelo comprimento da coluna. Partindo-se da equação ajustada, com coeficiente de ajuste (R^2) próximo da unidade, o valor procurado será sempre a menor raiz. Os ajustes oriundos desta operação para os dois casos analisados são apresentados na Figura 8 e na Figura 9.



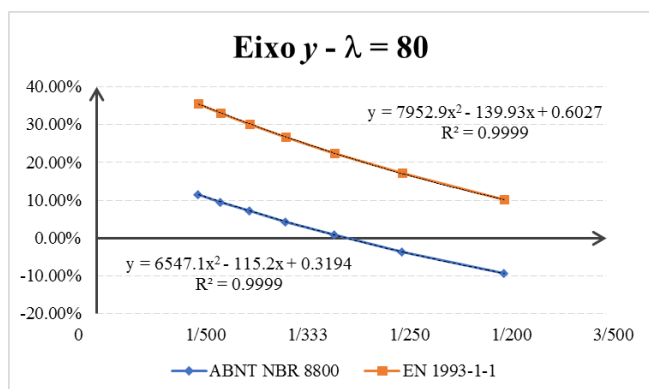
(a)



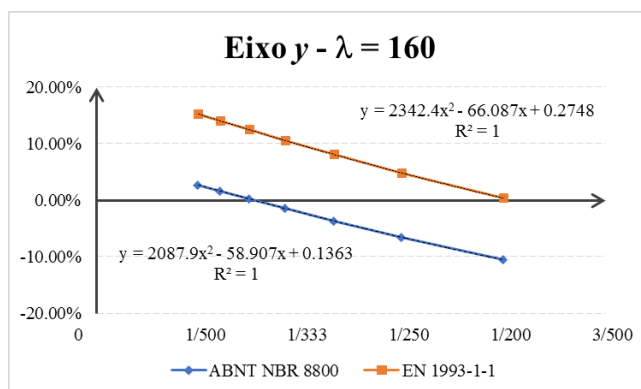
(b)



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

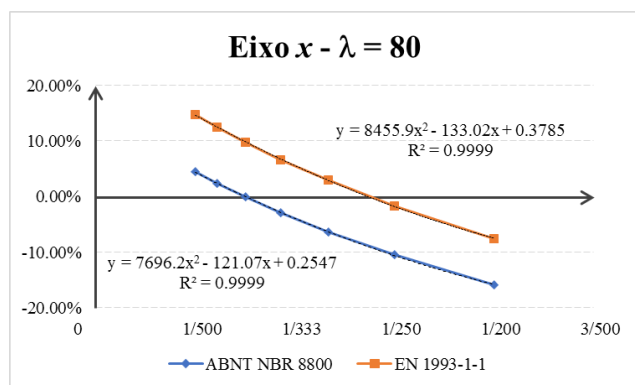


(c)

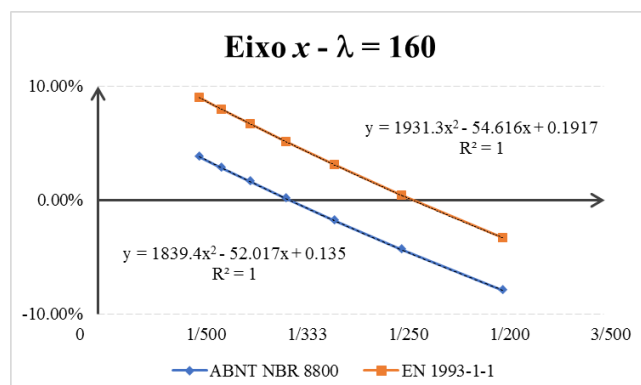


(d)

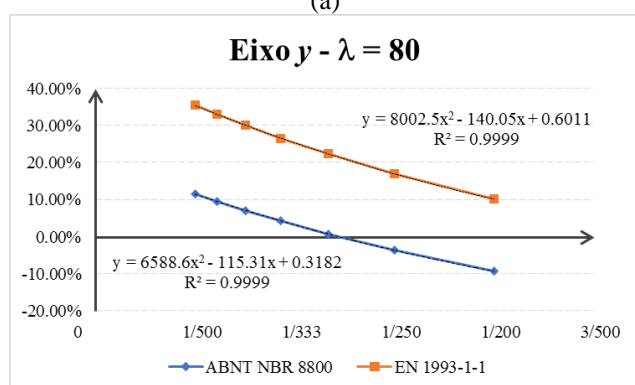
Figura 8 – Determinação precisa da curvatura inicial para o perfil CS 400x106 para: (a) flexão em torno do eixo x e $\lambda = 80$; (b) flexão em torno do eixo x e $\lambda = 160$; (c) flexão em torno do eixo y e $\lambda = 80$; e (d) flexão em torno do eixo y e $\lambda = 160$.



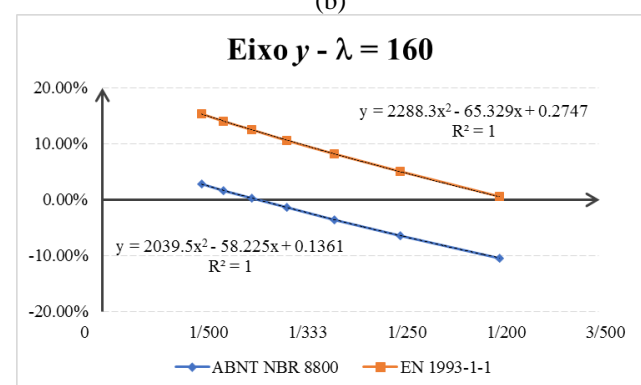
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9 – Determinação precisa da curvatura inicial para o perfil CS 500x207 para: (a) flexão em torno do eixo x e $\lambda = 80$; (b) flexão em torno do eixo x e $\lambda = 160$; (c) flexão em torno do eixo y e $\lambda = 80$; e (d) flexão em torno do eixo y e $\lambda = 160$.

Resolvendo as equações apresentadas na Figura 8 e na Figura 9, as curvaturas iniciais exatas que produzem os mesmos resultados que as prescrições normativas estão resumidas na Tabela 1. Vale ressaltar que o coeficiente μ mede o desvio percentual da curvatura inicial calculada para o EN 1993-1-1:2005 em relação à ABNT NBR 8800:2008. De posse destes dados, observe que, em todos os casos, os valores do parâmetro analisado tendo por base a norma europeia são superiores em mais de 42% àqueles obtidos através da norma



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

brasileira (90% em média). Além disso, o valor médio da curvatura inicial de referência que produz os mesmos resultados que a ABNT NBR 8800:2008 é $L/351$, bem próximo a $L/350$ (valor testado), contra $L/182,5$ para o EN 1993-1-1:2005, sem fazer distinção entre os eixos de flexão, ou $L/215,5$ para o eixo x e $L/158,25$ para o eixo y .

Tabela 1 - Curvaturas iniciais exatas obtidas pelo procedimento analítico simplificado.

NORMA	CS 400x106				CS 500x207			
	Eixo x		Eixo y		Eixo x		Eixo y	
	$\lambda = 80$	$\lambda = 160$	$\lambda = 80$	$\lambda = 160$	$\lambda = 80$	$\lambda = 160$	$\lambda = 80$	$\lambda = 160$
ABNT NBR 8800:2008	1/400	2/689	1/290	1/393	1/400	1/346	3/874	1/389
EN 1993-1-1:2005	1/268	3/727	6/797	4/789	1/268	2/287	2/265	1/195
μ	49%	42%	118%	99%	49%	141%	120%	99%

O fato de maiores curvaturas iniciais serem necessárias para compensar o efeito das tensões residuais evidencia na norma europeia o fato que a magnitude das tensões incluídas no método de dimensionamento é superior ao considerado pela norma brasileira, a qual, além disso, utiliza uma curva única de resistência contra três distintas do EN 1993-1-1:2005, que leva em conta também o eixo em torno do qual ocorre a flexão.

5. Conclusão

Conforme os resultados apresentados, observa-se que os desvios de χ do método analítico em relação às prescrições do EN 1993-1-1:2005 são sempre superiores àqueles calculados com base na ABNT NBR 8800:2008, para todas as curvaturas iniciais testadas. Além disso, a partir da análise dos resultados, é possível verificar que maiores curvaturas iniciais são necessárias para igualar os valores de χ àqueles determinados pelo EN 1993-1-1:2005 do que pela ABNT NBR 8800:2008. Este fato evidencia, portanto, a maior influência das tensões residuais na norma europeia em relação à norma brasileira, em especial no caso de flexão em torno do eixo de menor inércia.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ArcelorMittal Tubarão, à CAPES e ao CNPq pelo auxílio, apoio e incentivo concedidos durante a realização deste trabalho.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 2. ed. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5884: Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico - Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- BAPTISTA, A.; MUZEAU, J.-P. Dimensionamento de Vigas de seção variável. 3º Encontro Nacional de Construção Metálica e Mista. Anais...2001
- COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Bruxelas, 2005.
- FAKURY, R. H. Notas de aula de Estudos Avançados em Aço. Belo Horizonte, 2019.
- FAKURY, R. H.; CASTRO E SILVA, A. L. R.; CALDAS, R. B. Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. São Paulo: Person Education, 2017.
- TANKOVA, T. et al. Residual stresses in welded I section steel members. Engineering Structures, v. 197, n. July, p. 109398, 2019.