

NOTA TÉCNICA

Avaliação das prescrições da norma ABNT NBR 8800:2024 sobre a flambagem lateral com torção de barras com seção T

João Victor Fragoso Dias^{1*}, Mariana Zeni dos Reis² e Ricardo Hallal Fakury³

¹Universidade Federal do Espírito Santo, joaovfdias@gmail.com

²Universidade Federal do Espírito Santo, mariana.z.reis@edu.ufes.br

³Universidade Federal de Minas Gerais, fakury@dees.ufmg.br

Assessment of the requirements of the Brazilian standard ABNT NBR 8800:2024 on lateral torsional buckling of tee section bars

Resumo

O procedimento da norma ABNT NBR 8800:2024 para determinação do momento fletor resistente nominal de barras com seção T para flambagem lateral com torção baseia-se no valor do momento crítico. Para obtenção desse momento, a norma fornece uma única equação, que independe do carregamento e do nível de aplicação de forças transversais em relação à altura da seção transversal (equação de momento uniforme). Neste trabalho é avaliada a influência do uso dessa equação nos valores do momento resistente para alguns carregamentos usuais, por meio de comparação com o uso do momento crítico obtido por análise de estabilidade elástica. Verificou-se que, para a extremidade livre da alma tracionada, os momentos resistentes obtidos a partir do uso da equação do momento crítico da norma foram sempre inferiores aos obtidos com o uso do momento crítico da análise de estabilidade elástica. Para essa extremidade comprimida, foram superiores para muitos casos de carregamento. Assim, para evitar dimensionamentos antieconômicos ou contrários à segurança, concluiu-se por recomendar que, ao se determinar o momento resistente com o procedimento da ABNT NBR 8800:2024, seja utilizado o momento crítico obtido por meio de análise de estabilidade elástica.

Palavras-chave: estruturas de aço, seções T, flambagem lateral com torção.

Abstract

The procedure of the Brazilian standard ABNT NBR 8800:2024 for determining the nominal resistant bending moment of tee section bars for lateral-torsional buckling is based on the value of the critical moment. To obtain this moment, the standard provides a single, equation, which is independent of the loading and the level of application of transverse forces in relation to the height of the cross section (uniform moment equation). In this work, the influence of the use of this equation on the values of the resistant moment for some common loadings is evaluated by means of comparison with the use of the critical moment obtained by elastic stability analysis. It was found that, when the free end of the stem is tensioned, the resistant moments obtained using the critical moment equation of the Brazilian standard were always lower than those obtained using the critical moment of the elastic stability analysis. When the free end of the stem is compressed, the resistant moments were higher for many loading cases. Thus, to avoid uneconomical or unsafe results, it was concluded to recommend that, when determining the resistant moment using the procedure of ABNT NBR 8800:2024, the critical moment obtained through elastic stability analysis be used.

Keywords: steel structures, tee sections, lateral-torsional buckling.

* autor correspondente

1 INTRODUÇÃO

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2024, publicada recentemente, altera a determinação do momento fletor resistente nominal de barras fletidas com seção T para o estado-limite último de flambagem lateral com torção (FLT) em relação à edição de 2008 (ABNT NBR 8800:2008). O novo procedimento segue com rigor o adotado pela norma estadunidense ANSI/AISC 360-22, e, em relação ao precedente, fornece resultados iguais ou menores, e também se baseia no valor do momento crítico. No entanto, esse momento continua sendo fornecido pela equação da edição de 2008, desenvolvida para seções I monossimétricas submetidas a momento uniforme e ajustada, com algumas aproximações, para seções T (Ziemian, 2010). Ocorre que a ABNT NBR 8800:2024 é omissa quanto ao carregamento que pode ser considerado e, por conseguinte, quanto ao diagrama de momento fletor, e quanto ao nível de aplicação de forças transversais, caso existam, em relação à altura da seção transversal.

Diante do exposto, este trabalho tem o objetivo de avaliar a pertinência dos valores do momento resistente obtidos pelo novo procedimento com o uso da equação do momento crítico da norma para alguns carregamentos usuais, com as forças transversais aplicadas em diferentes níveis em relação à altura da seção transversal (base, semialtura e topo), para os casos em que a extremidade livre da alma se encontra tracionada ou comprimida. Além disso, de propor soluções para aprimorar os resultados a serem obtidos.

2 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DA ABNT NBR 8800:2024

Segundo a ABNT NBR 8800:2024, para o estado-limite último de flambagem lateral com torção, as barras com seção T carregadas no plano de simetria, portanto, com a flexão ocorrendo em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma (eixo x), quando a extremidade livre da alma estiver tracionada em todo o comprimento destravado, o momento fletor resistente nominal é dado por (Figura 1 – S e G indicam as posições do centro de cisalhamento e do centro geométrico da seção transversal, respectivamente):

- para $\lambda \leq \lambda_p$,

$$M_{Rk} = M_{p\ell} \quad (1)$$

- para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$,

$$M_{Rk} = M_{p\ell} - (M_{p\ell} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \quad (2)$$

- para $\lambda > \lambda_r$,

$$M_{Rk} = M_{cr} \quad (3)$$

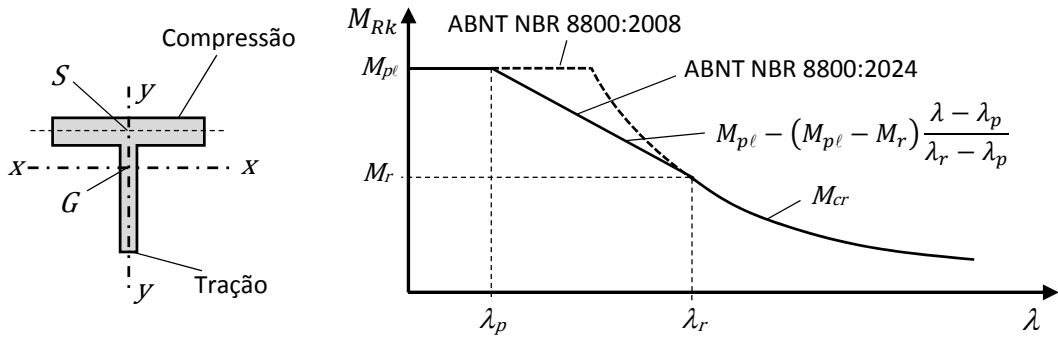


Figura 1 – Momento fletor resistente nominal para extremidade livre da alma tracionada

Nessas equações e na Figura 1, λ , λ_p e λ_r são, respectivamente, o parâmetro de esbeltez da barra fletida, o parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação e o parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento, dados por:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (4)$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (5)$$

$$\lambda_r = \frac{1,95 E}{r_y f_y} \frac{\sqrt{I_y J}}{W_x} \sqrt{2,36 \frac{f_y}{E} \frac{d W_x}{J} + 1} \quad (6)$$

em que L_b é o comprimento destravado da barra, r_y o raio de giração da seção transversal em relação ao eixo y (eixo que passa pelo plano médio da alma), E o módulo de elasticidade do aço, f_y a resistência ao escoamento do aço, I_y o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y , J a constante de torção da seção transversal, W_x o menor módulo de resistência da seção transversal em relação ao eixo x e d a altura total da seção transversal.

Ainda nas equações (1) a (3) e na Figura 1, $M_{p\ell}$ é o momento fletor de plastificação da seção transversal, M_r o momento fletor correspondente ao início da plastificação e M_{cr} o momento fletor crítico, iguais a:

$$M_{p\ell} = Z_x f_y \quad (7)$$

$$M_r = W_x f_y \quad (8)$$

$$M_{cr} = \frac{1,95 E}{L_b} \sqrt{I_y J} \left(B + \sqrt{1 + B^2} \right) \quad (9)$$

em que Z_x é o módulo de resistência plástica da seção transversal e

$$B = 2,3 \frac{d}{L_b} \sqrt{\frac{I_y}{J}} \quad (10)$$

A ABNT NBR 8800:2024, ainda, para impedir escoamento precoce sob ações de serviço, exige que o momento resistente nominal seja limitado a $1,5 W_x f_y$.

Por sua vez, se a extremidade livre da alma estiver comprimida em alguma parte do comprimento destravado, o momento fletor resistente nominal é dado pela seguinte expressão (Figura 2):

$$M_{Rk} = M_{cr} \leq W_x f_y \quad (11)$$

com

$$M_{cr} = \frac{1,95 E}{L_b} \sqrt{I_y J} \left(-B + \sqrt{1 + B^2} \right) \quad (12)$$

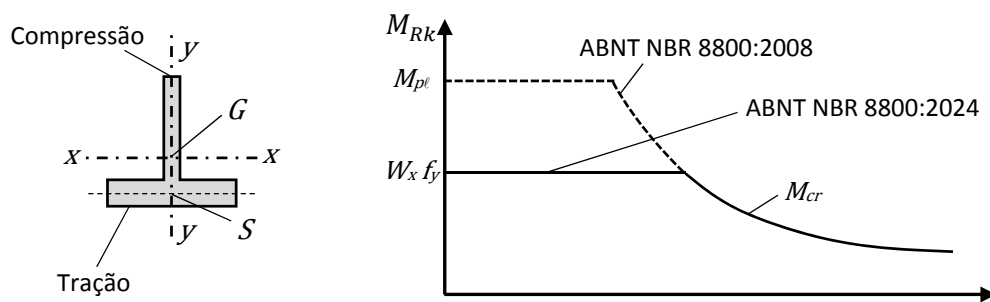


Figura 2 – Momento fletor resistente nominal para a extremidade livre da alma comprimida

Observa-se que para o caso em que a extremidade livre da alma está tracionada, o procedimento da ABNT NBR 8800:2024 segue o formato geral para momento resistente, já consolidado, com três faixas, quais sejam, a de momento de plastificação e a de momento crítico, tendo entre elas uma reta de transição representativa do momento em regime elastoplástico. Para o caso em que a extremidade livre da alma se encontra comprimida, conforme explicita o ANSI/AISC 360-22, o momento resistente é limitado, conservadoramente, ao momento correspondente ao início de escoamento ($W_x f_y$), por falta de estudos conhecidos sobre os valores que esse momento pode atingir.

Apenas a título de comparação, na edição anterior da norma brasileira (ABNT NBR 8800:2008), tanto para extremidade livre da alma tracionada quanto comprimida, o momento resistente nominal é dado pela equação do momento crítico, Equação (9) ou Equação (12), limitado ao momento de plastificação da seção transversal (ver figuras 1 e 2) e a $1,5 W_x f_y$.

3 METODOLOGIA

Para avaliação do procedimento da ABNT NBR 8800:2024 com o uso da equação do momento crítico fornecido, inicialmente, foram selecionadas oito seções transversais

(seções WT), obtidas pelo corte perpendicular à alma, na semialtura, de perfis W com formas de I e H constantes da norma ABNT NBR 15980:2024, com alturas nominais variando do mínimo de 150 mm ao máximo de 610 mm. Em seguida, a fim de se trabalhar com seções com maior parâmetro de esbelteza para FLT, mais oito seções transversais foram consideradas. Essas novas seções são as mesmas anteriores, todavia, tomando apenas um terço da largura da mesa, sendo aqui representadas pela denominação WT-M. Todas as seções transversais, com suas dimensões, são listadas na Tabela 1, na qual d é a altura total, b_f a largura da mesa, t_w a espessura da alma e t_f a espessura da mesa, observando-se que os triângulos circulares entre a alma e a mesa foram desprezados.

Tabela 1 – Seções transversais WT e WT-M utilizadas

Seção W Original	Seção T Derivada	d (mm)	b_f (mm)	t_w (mm)	t_f (mm)	λ_r ($f_y = 350$ MPa)
W 150 × 18 (I)	WT	76,5	102	5,8	7,1	547,72
	WT-M		34			356,93
W 150 × 29,8 (H)	WT	78,5	153	6,6	9,3	960,28
	WT-M		51			508,74
W 250 × 32,7 (I)	WT	129	146	6,1	9,1	415,14
	WT-M		48,7			263,74
W 250 × 85 (H) (Obs.: Perfil HP)	WT	127	260	14,4	14,4	807,97
	WT-M		86,7			505,59
W 360 × 51 (I)	WT	177,5	171	7,1	11,6	365,81
	WT-M		57			237,91
W 360 × 101 (H)	WT	178,5	255	10,5	18,3	750,96
	WT-M		85			400,01
W 460 × 82 (I)	WT	230	191	9,9	16	357,71
	WT-M		63,7			241,52
W 610 × 125 (I)	WT	306	229	11,9	19,6	318,29
	WT-M		76,3			221,98

No que se refere ao comprimento destravado de cada um dos modelos numéricos, 12 valores foram adotados. Para isso, no caso de a extremidade livre da alma estar tracionada, foram calculados os valores de λ_p e λ_r segundo as equações (5) e (6), respectivamente, considerando a resistência ao escoamento do aço igual a 350 MPa (valor intermediário entre o mínimo de 250 MPa e o máximo permitido na norma brasileira de 450 MPa – λ_p tem valor constante de 42,07 e λ_r é fornecido na Tabela 1). Assim, foi tomado como primeiro comprimento aquele correspondente a λ_p e, depois, 11 comprimentos sequenciais correspondentes a um sexto da diferença entre λ_r e λ_p , permitindo avaliar valores de esbelteza nos quais se espera que ocorra flambagem em regimes elástico e elastoplástico. Para o caso de a extremidade livre da alma estar comprimida, como a formulação não envolve os parâmetros de esbelteza em regimes elástico e plástico, os mesmos valores de comprimento foram utilizados.

Com relação ao carregamento, 14 situações foram analisadas, começando com a barra sujeita a momento fletor uniforme. Em seguida, considerou-se uma força distribuída atuando em todo o comprimento da barra, em três níveis relativos à altura da seção transversal, a saber: na face externa da mesa, na semialtura e na extremidade livre da alma. Por fim, considerou-se uma força concentrada no meio do comprimento da barra, nos mesmos três níveis com relação à altura da seção transversal. As barras foram avaliadas tanto a momento fletor tracionando quanto comprimindo a extremidade livre da alma da seção transversal.

Os 2.688 modelos (16 perfis WT e WT-M, 12 comprimentos destravados e 14 condições de carregamento, sendo 7 com a extremidade da alma tracionada e 7 com essa extremidade comprimida) tiveram seus momentos críticos calculados por meio de análise de estabilidade elástica com o uso do programa europeu *LTBeamN-v.2.0.1*, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF). Foram considerados 100 elementos em cada barra, número que conduziu a resultados muito próximos dos que se obtêm com o máximo permitido de 250 e com menor custo computacional.

As seguintes etapas foram realizadas, para cada um dos modelos: (a) cálculo do momento crítico usando as equações da norma ($M_{cr,NBR}$) – equações (9) e (12) para os casos de a extremidade livre da alma tracionada e comprimida, respectivamente; (b) cálculo do momento crítico usando a análise de estabilidade elástica ($M_{cr,Num}$); (c) disposição em gráfico da razão $M_{cr,NBR}/M_{cr,Num}$ em função do parâmetro de esbeltez da barra, λ , dado pela Equação (4); (d) determinação de $M_{Rk,NBR}$, ou seja, do momento resistente nominal usando os procedimentos da norma, com $M_{cr,NBR}$ calculado na etapa a, para aços com resistências ao escoamento de 250 MPa e 450 MPa (limites inferior e superior permitidos pela norma); (e) determinação de $M_{Rk,Num}$, ou seja, do momento resistente nominal usando o procedimento da norma, mas com $M_{cr,Num}$ calculado na etapa b, para aços com resistências ao escoamento de 250 MPa e 450 MPa; (f) disposição em gráfico da razão $M_{Rk,NBR}/M_{Rk,Num}$ em função do parâmetro de esbeltez λ .

O parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento, λ_r , para o caso de tração na extremidade livre da alma, também foi determinado a partir da análise de estabilidade elástica, quando necessário para o cálculo do momento resistente, por meio da pesquisa do valor em que o comprimento destravado tornava M_{cr} igual a M_r (ver Figura 1).

4 RESULTADOS E COMENTÁRIOS

4.1 Extremidade da alma tracionada

A Figura 3 mostra a razão entre os momentos críticos obtidos com a Equação (12), da ABNT NBR 8800:2024 ($M_{cr,NBR}$), e com a análise de estabilidade elástica ($M_{cr,Num}$) em função do parâmetro de esbelteza λ , para todos os casos de carregamento previstos.

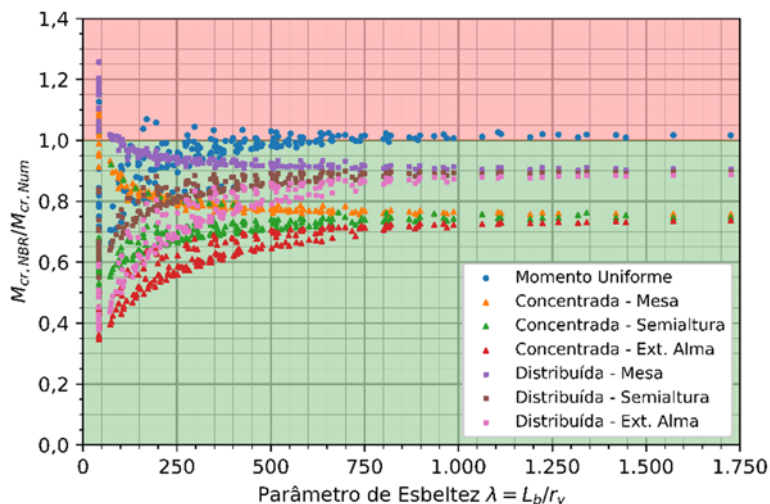


Figura 3 – Razão $M_{cr,NBR}/M_{cr,Num}$ em função de λ para extremidade da alma tracionada

Evidencia-se que o momento crítico dado pela Equação (9), da norma brasileira, leva a bons valores para a condição de momento uniforme (razão $M_{cr,NBR}/M_{cr,Num}$ próxima de 1,0, com maiores desvios para parâmetros de esbelteza mais baixos), como era esperado, dada à origem dessa equação. Para todas as outras condições de carregamento, o momento crítico numérico é superior ($M_{cr,NBR}/M_{cr,Num}$ abaixo de 1,0), exceto para forças concentrada ou distribuída atuantes na mesa e parâmetros de esbelteza inferior a 50. Trata-se de resultados que obedecem à lógica de que, na seção T com a extremidade da alma tracionada, nunca haverá forças desestabilizantes, uma vez que o centro de cisalhamento (S) se situa no encontro das linhas médias da mesa e da alma (ver Figura 1) – força na mesa é neutra e forças na semialtura e na extremidade livre da alma são estabilizantes.

Para avaliação dos resultados fornecidos pelo procedimento da ABNT NBR 8800:2024, a Figura 4 mostra os valores da razão $M_{Rk,NBR}/M_{Rk,Num}$ em função do parâmetro de esbelteza para aços com resistências ao escoamento de 250 MPa e 450 MPa. Nota-se que o procedimento da norma brasileira com o momento crítico fornecido pela Equação (9) sempre conduz a valores do momento resistente inferiores aos obtidos com o momento crítico determinado por meio de análise de estabilidade elástica (a razão $M_{Rk,NBR}/M_{Rk,Num}$ chega a ter valores da ordem de 0,6). Uma única exceção ocorre para a condição de

momento uniforme, quando o uso da Equação (9) pode levar a momentos resistentes ligeiramente superiores, mas sem ultrapassar o patamar de 5%.

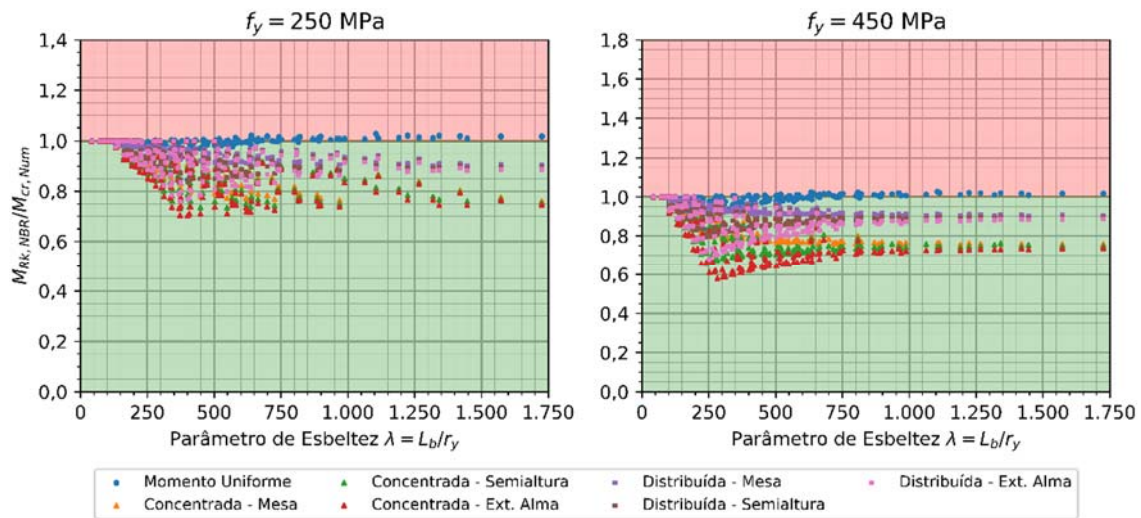


Figura 4 – Razão $M_{Rk,NBR}/M_{cr,Num}$ em função de λ com a extremidade da alma tracionada

4.2 Extremidade da alma comprimida

A razão entre os momentos críticos obtidos com a Equação (12), da ABNT NBR 8800:2024 ($M_{cr,NBR}$), e com a análise de estabilidade elástica ($M_{cr,Num}$) em função do parâmetro de esbeltez λ , para todos os casos de carregamento considerados, é mostrada na Figura 5.

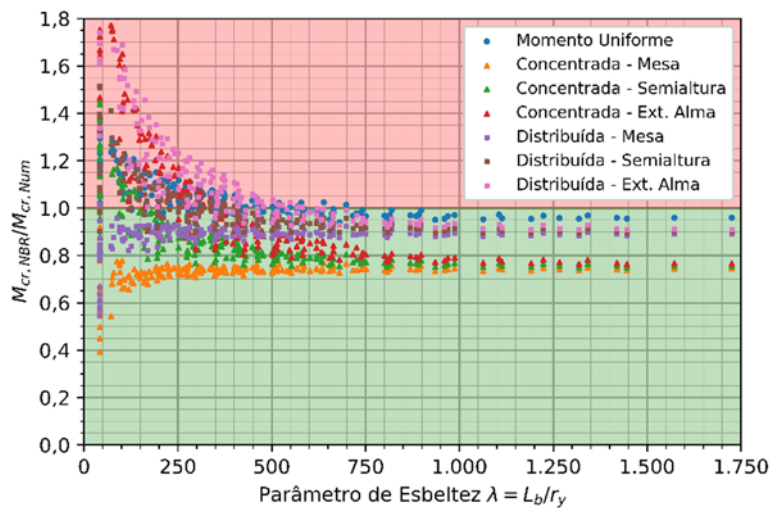


Figura 5 – Razão $M_{cr,NBR}/M_{cr,Num}$ em função de λ para extremidade da alma comprimida

Observa-se que o momento crítico fornecido pela Equação (12), da norma brasileira, tem valores que, surpreendentemente, superam os obtidos pela análise de estabilidade elástica para momento uniforme. Superam também para os casos de força uniformemente distribuída atuante na extremidade livre da alma, força concentrada no meio da barra atuante na extremidade livre da alma, força uniformemente distribuída atuante na semialtura e força concentrada no meio da barra atuante na semialtura. Para

as forças concentrada ou distribuída atuantes na mesa superior, que são forças neutras – as demais são desestabilizantes –, ocorre o contrário, com os momentos críticos numéricos chegando a ser até cerca de 50% maiores que os da norma brasileira.

Para avaliação dos resultados fornecidos pelo procedimento da norma brasileira, na Figura 6 são mostrados os valores da razão $M_{Rk,NBR}/M_{Rk,Num}$ em função do parâmetro de esbeltez para aços com resistências ao escoamento de 250 MPa e 450 MPa.

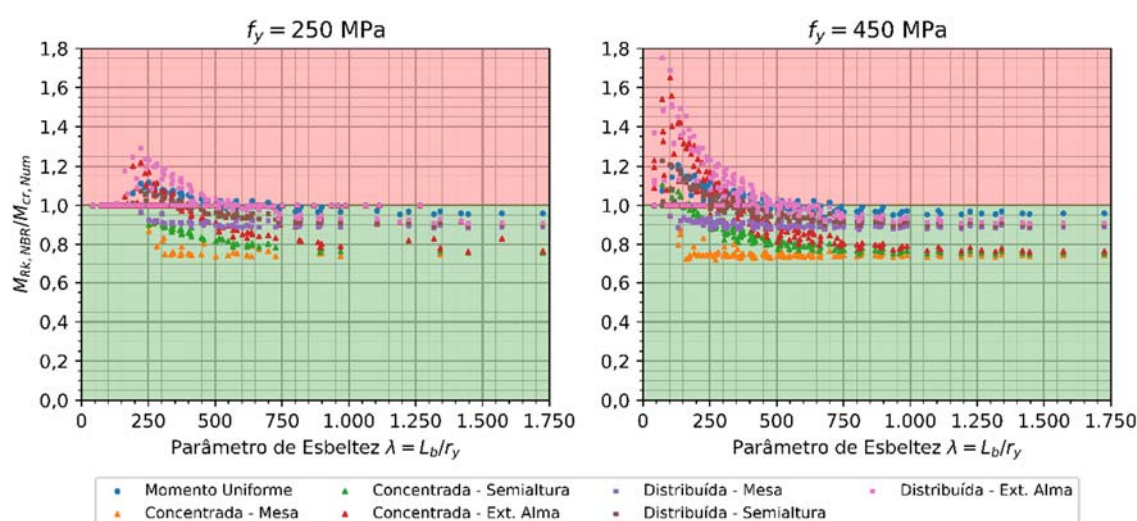


Figura 6 – Razão $M_{Rk,NBR}/M_{Rk,Num}$ em função de λ com a extremidade da alma comprimida

Verifica-se que procedimento da norma brasileira com o momento crítico fornecido pela Equação (12) pode conduzir a valores do momento resistente superiores aos valores obtidos com o momento crítico da análise de estabilidade elástica para momento uniforme – possivelmente por imprecisão da Equação (12) –, força uniformemente distribuída atuante na extremidade livre da alma, força uniformemente distribuída atuante na semialtura da seção transversal, força concentrada no meio da barra atuante na extremidade livre da alma e força concentrada no meio da barra atuante na semialtura da seção transversal, quando o parâmetro de esbeltez da barra, λ , é inferior a aproximadamente 600, 500, 400, 350 e 150, respectivamente. Para as forças concentrada ou distribuída atuantes na mesa, os momentos resistentes obtidos com o momento crítico da Equação (12) são sempre inferiores aos obtidos com os momentos críticos da análise de estabilidade elástica (a razão $M_{Rk,NBR}/M_{Rk,Num}$ atinge valores de cerca de 0,7).

5 CONCLUSÕES

Os resultados fornecidos neste trabalho indicam que, nas barras com seção T, quando a extremidade livre da alma encontra-se tracionada em todo o comprimento destravado,

o momento fletor resistente nominal para flambagem lateral com torção (FLT) pode ser determinado, com segurança, pelo procedimento da norma brasileira ABNT NBR 8800:2024, inclusive com o momento crítico calculado pela Equação (9), para os carregamentos considerados neste trabalho, com as forças transversais se situando em qualquer nível ao longo da altura da seção transversal. Indicam ainda que para muitas situações, esse procedimento, com o uso do momento crítico da Equação (9), leva a momentos resistentes muito inferiores aos obtidos com o momento crítico da análise de estabilidade elástica.

Quando a extremidade livre da alma se encontra comprimida, ao contrário, o procedimento da ABNT NBR 8800:2024 com o uso da Equação (12) para cálculo do momento crítico pode conduzir a valores do momento resistente superiores àqueles quando se usa o momento crítico da análise de estabilidade elástica, especialmente para parâmetros de esbeltez da barra mais baixos, exceto para os casos com apenas forças transversais na mesa, quando pode-se ter momentos resistentes inferiores.

Tendo em vista o exposto, para evitar dimensionamentos antieconômicos ou contrários à segurança, recomenda-se, ao determinar o momento resistente com o procedimento da ABNT NBR 8800:2024, que seja utilizado o valor do momento crítico obtido por meio de análise de estabilidade elástica.

REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360-22**: Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, IL, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15980**: Perfis laminados de aço para uso estrutural - Dimensões e tolerâncias. Rio de Janeiro, 2024.

CENTRE TECHNIQUE INDUSTRIEL DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE. Spécifications Techniques pour le logiciel LTBeamN - CTICM document n° DRV/22-RCM-XXX/001-A, Saint-Aubin, FR., 2022.

ZIEMIEN, R. (Editor). *Guide to stability design criteria for metal structures*. 6a. ed. Hoboken, NJ, EUA: John Wiley & Sons, 2010.