

ANÁLISE NUMÉRICA DO MOMENTO CRÍTICO ELÁSTICO À FLT DE VIGAS I DUPLAMENTE SIMÉTRICAS

Daniel Hideyuki Saito¹, Alexandre Rossi² e Carlos Humberto Martins³

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá – UEM, dhideyuki@hotmail.com

² Doutorando na Universidade Federal de São Carlos-UFSCar, Departamento de Engenharia Civil-DEC, alexandre-rossi@hotmail.com

³ Prof. Dr. Carlos Humberto Martins, Departamento de Engenharia Civil-DEC, chmartins@uem.br

RESUMO

Vigas são elementos horizontais que compõem a estrutura de modo a transmitir esforços transversais recebidas na laje até os pilares. Se tratando de peças metálicas e esbeltas, as vigas metálicas perfil I estão sujeitas aos fenômenos de flambagem. A análise do equilíbrio é fundamental para determinação da capacidade resistente das estruturas, visto que o momento crítico correspondente à transição do equilíbrio estável para o instável se torna um importante parâmetro de projeto. Para determinação do momento crítico, o procedimento analítico da norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 considera apenas a flambagem lateral com torção (FLT) como modo de ruptura desses elementos. Entretanto, como será demonstrado ao final desse trabalho, o estudo de alguns perfis I, por meio da análise numérica realizada no software GBTUL, resulta em valores mais conservadores em comparação com a norma brasileira. Isso devido a fatores como o acoplamento de outros modos de flambagem junto à FLT e a posição do carregamento (carga desestabilizante aplicada na mesa superior) que reduzem o valor do momento crítico.

Palavras-chave: Perfis metálicos, Momento crítico, GBTUL.

1. INTRODUÇÃO

As condições de projeto estrutural dos elementos requerem a verificação de sua resistência afim de respeitar os valores dos chamados estados-limites que podem ser classificados em duas categorias: estado-limite de serviço e estado-limite último. O estado-limite de serviço refere-se a perda da capacidade de segurança da estrutura contra deslocamentos e flechas, sendo associados ao desconforto daqueles que fazem uso de uma edificação. Já o estado-limite último associa-se a perda de capacidade resistente da estrutura, seja por meio de sua ruptura ou por meio da perda de estabilidade. Por se tratar de peças esbeltas, as vigas metálicas em perfil I estão sujeitas aos fenômenos de instabilidade.

Define-se configuração de equilíbrio, segundo Rossi (2018), a capacidade de uma dada estrutura em estabelecer uma posição de equilíbrio após a aplicação de qualquer perturbação externa, ação exterior.

A teoria clássica de flambagem busca determinar a intensidade do carregamento a partir do qual a configuração inicial deixa de ser estável. Conforme Camotim (2001), o estado correspondente à transição da situação de equilíbrio estável e instável denomina-se “estado crítico”, cujo carregamento condiz ao “carregamento crítico”. De acordo com Ahnlén e Westlund (2013 *apud* ROSSI 2018), o momento crítico elástico, M_{cr} , é um parâmetro importante de projeto nos casos em que a FLT é responsável pelo colapso da estrutura. Em normas de especificação de projetos de estruturas metálicas são apresentadas expressões analíticas para o cálculo do momento crítico. No entanto, devido ao complexo fenômeno da FLT não são considerados todos os parâmetros e premissas que as afetam. Dentre esses parâmetros, a distorção da alma, na chamada FLTD não é levada em consideração.

Como descrito por Rossi (2018), nomeia-se a perda de estabilidade de vigas de aço por flambagem. A perda de estabilidade se dá por dois modos: modos de instabilidades globais, modos de instabilidade locais ou ainda pela simultaneidade desses dois modos. Essa flambagem ocorre principalmente em função das características geométricas dos perfis, das condições de vinculação e de carregamento.

A determinação do Momento Crítico (M_{cr}) pelo procedimento normativo da norma NBR 8800:2008 para estado-limite FLT em regime elástico linear contido no Anexo G não faz algumas considerações acerca da posição de aplicação de carga na seção I e a combinação dos efeitos dos modos de flambagem global e de flambagem local. Os valores provenientes de cálculo da norma acabam que se mostrando não conservativos, à medida em que seu equacionamento prevê apenas um coeficiente C_b (fator de momento equivalente).

Conforme Abreu (2011), o cálculo para prevenção da flambagem lateral por torção é um aspecto importante de projeto porque pode haver falhas inesperadas e até mesmo catastróficas, especialmente durante a montagem. Flambagem lateral com torção é um problema bastante complexo, pois depende de diversos parâmetros que nem sempre são previstos pelas formulações normalizadas.

Sendo assim, torna-se o objetivo desse presente trabalho, a análise numérica de estabilidade elástica de uma amostra de vigas I de perfis soldados da série VS por meio do software GBTUL 2.06 – Teoria Geral de Vigas -, de modo a identificar, por meio de gráficos, a disparidade entre os valores de momentos críticos determinados por conta da influência da combinação dos modos de flambagem global e local e do ponto de aplicação da carga.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 MODOS DE FLAMBAGEM

De acordo com Rossi (2018), elementos estruturais de aço submetidos a ações de flexões podem chegar ao colapso por meio da perda de estabilidade das peças fletidas ou pela plastificação do material. Quando o colapso destes elementos, no caso, as vigas de aço, se dá pela perda de estabilidade se diz que estas sofreram flambagem. A perda de estabilidade nesse tipo de viga é governada por dois modos: modos de instabilidade globais e modos de instabilidade locais.

2.1.1. Flambagem local (FL)

A flambagem local (FL) é um fenômeno que ocorre nos elementos total ou parcialmente comprimidos da seção transversal, que apresentam deslocamentos perpendiculares a seu plano na forma de semiondas longitudinais. No caso de perfis I fletidos, esses elementos são a mesa comprimida (totalmente comprimida) e a alma (parcialmente comprimida). Pode ocorrer ainda simultaneamente as flambagens locais da mesa e da alma. (SILVA, 2017)

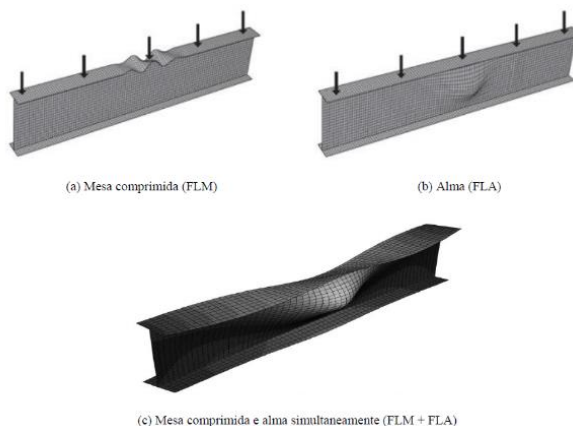


Figura 1: Flambagem local

Fonte: Silva (2017)

Neste modo de flambagem, o eixo reto do elemento estrutural, no caso as vigas de aço, permanece reto e as deformações e translações ocorrem na direção perpendicular ao plano médio dos elementos da peça, mesas e alma. (ROSSI, 2018)

A instabilidade local verifica-se geralmente para altas relações altura/espessura ou largura/espessura da seção, e se dá pela distorção da seção transversal em seu próprio plano, resultando da flambagem dos elementos de chapa componentes do perfil. Nesse caso, não ocorrem deslocamentos transversais nos encontros dos elementos componentes da seção transversal. (FRUCHTENGARTEN, 2005)

Conforme Rossi (2018), a ocorrência de flambagem local é responsável pela redução da rigidez global da barra à flexão, o que ocasiona a redução na resistência final do elemento estrutural. Quando os perfis são solicitados a flexão e/ou compressão, os valores da carga crítica podem indicar que a estrutura se instabilizou localmente, sofreu flambagem local, antes da ocorrência da flambagem global ou antes do material atingir a tensão de escoamento. Assim, a compressão uniforme nas mesas e na alma podem levar o perfil a perda de estabilidade por flambagem local da mesa comprimida (FLM) e a flambagem local da alma (FLA).

A flambagem local da mesa comprimida (FLM) se caracteriza pela ocorrência na chapa das seções que apresentam uma mesa comprimida pelo momento fletor paralela ao eixo de flexão. Já a flambagem local da alma (FLA) ocorre pela distorção da alma, em situação de elementos fletidos ou com cargas externas que agem perpendicularmente ao eixo axial do elemento, no plano normal ao de flexão. (ROSSI, 2018)

2.2.2 Flambagem lateral com torção (FLT)

Segundo Rossi (2018), o modo de flambagem no qual o estado limite último se dá pela perda de estabilidade, em vigas de estruturas metálicas, por meio de deformações geradas pela combinação de deslocamentos e rotações é chamado de flambagem lateral com torção (FLT). Ainda, conforme Fruchtengarten (2005), também chamado de flexo-torção, é o modo de instabilidade que envolve uma combinação de flexão, torção e empenamento sem modificação na seção transversal.

Quando estas vigas metálicas esbeltas estão submetidas a carregamentos que geram flexão em torno do eixo de maior rigidez flexural com restrições laterais insuficientes, ocorrem deslocamentos laterais ortogonais a este eixo, acompanhada da torção da seção transversal, caracterizando assim a flambagem lateral com torção (FLT). (ROSSI, 2018)

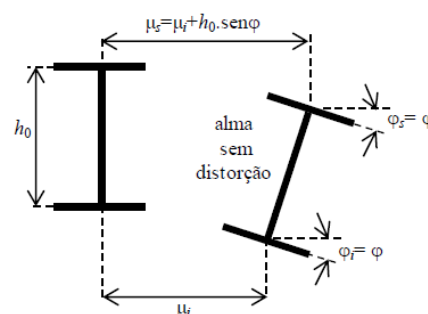


Figura 2: Flambagem lateral com torção

Fonte: Silva (2017)

Segundo Silva (2017), a translação lateral, μ , e torção, ϕ , ocorrem simultaneamente e ambos os movimentos podem ser explicados pelo efeito desestabilizante da parte comprimida da seção transversal que tende a se movimentar lateralmente e é parcialmente contida pelo efeito estabilizante da parte tracionada, ocasionando então na FLT.

A flambagem lateral com torção (FLT) se trata de um modo de flambagem global. Assim como todo modo de flambagem global, como a flambagem lateral em colunas, a FLT pode ocorrer em dois intervalos distintos de comportamento: as instabilidades no regime elástico e no regime inelástico. Além disso, em situações em que a viga não se instabiliza, seções compactas, a plastificação é o regime de colapso que governa a resistência nominal. (ROSSI, 2018)

A FLT no regime elástico é característica de vigas com grande comprimento destravado, ou seja, vigas com índice de esbeltez global elevado (λ). A flambagem elástica ocorre para vigas cujo índice de esbeltez global é superior ao índice de esbeltez limite para seções semicompactas (λ_r). Na flambagem lateral com torção (FLT) a resistência nominal (M_n) no regime elástico é determinada pelo valor do momento crítico elástico (M_{cr}). (ROSSI, 2018)

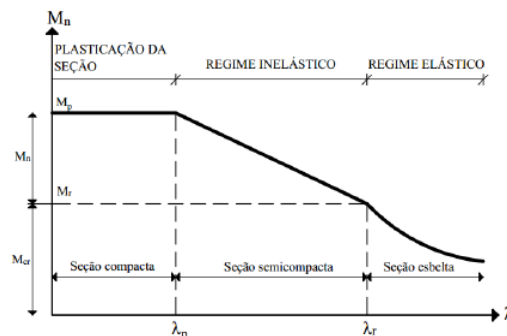


Figura 3: Curva de momento resistente

Fonte: Rossi (2018)

A resistência nominal à flambagem lateral com torção, M_n , ou o momento crítico elástico, M_{cr} , depende de vários fatores, entre os quais merecem destaque: propriedades do material, da seção transversal, das condições de restrição, do carregamento e as imperfeições física material e geométrica iniciais.

Tabela 1: Fatores que influenciam a FLT

Fatores que afetam a flambagem lateral com torção (FLT)	
Propriedades do material	Módulo de elasticidade longitudinal (E)
	Módulo de elasticidade transversal (G)
Propriedades da seção transversal	Momento de inércia a torção (J)
	Constante de empenamento (C_w)
	Momento de inércia a flexão (I)
Propriedades geométricas	Comprimento destravado (L)
Imperfeições físicas e geométricas	Tensão residual e Curvatura inicial
Condições de restrição	Restrições de deslocamento, rotação e empenamento
Carregamento	Tipo de carregamento (concentrado, uniformemente distribuído ou momento constante), o qual afeta a distribuição do momento fletor
	Ponto de aplicação da carga (desestabilizante, estabilizante ou neutra)

Fonte: Rossi (2018)

Pode-se citar também a influência da distorção da alma. A alma dos perfis I pode apresentar flexão lateral (distorção), influenciando nos valores de resistência à FLT, diferente do que as teorias clássicas de estabilidade nos informam, no qual a seção transversal da viga se mantém indeformável no seu plano. Essa distorção da alma é responsável por originar um outro modo de flambagem chamado de flambagem distorcional (FD) ou flambagem lateral com torção e distorção da alma (FLTD). Este modo de flambagem consiste na combinação de modo de flambagem locais (FL) com a flambagem lateral com torção (FLT). (ROSSI, 2018; SILVA, 2017)

As normas de projeto de estruturas de aço, como a brasileira ABNT NBR 8800:2008 e a europeia EM 1993-1-1:2005, para obtenção do momento fletor resistente, usam como referencial importante o valor do momento fletor que causam a flambagem de uma viga perfeitamente reta em regime elástico, chamado de momento crítico elástico. (SILVA, 2017)

A determinação deste momento crítico é realizada com a utilização de algumas hipóteses de simplificação, que tornam a descrição de um problema bastante complexo em equações consideravelmente simples. Contudo, estas simplificações desprezam situações que muitas vezes são comuns ao meio real, como por exemplo: diferentes condições de vinculações, a posição de aplicação dos carregamentos e a possível ocorrência de modos de flambagem locais combinados à FLT para vigas com qualquer parâmetro de esbeltez de alma. (ROSSI, 2018)

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 apresenta procedimentos de cálculo que não consideram os efeitos combinados de modos de flambagem globais e locais. Além disso, deve-se destacar que o procedimento dessa norma somente abrange a situação de vínculo de garfo nas duas extremidades do comprimento destravado e cargas transversais atuando na semialtura da seção transversal (centro de torção), desconsiderando outras condições de carregamento como as cargas desestabilizantes, aplicadas na mesa superior. (SILVA, 2017)

A norma europeia EN 1993-1-1:2005 é mais abrangente, pois deixa a cargo do projetista a determinação do momento crítico, que pode usar qualquer método para isso, inclusive análise numérica, e considerar quaisquer situações quanto às condições de contorno para flambagem lateral com torção (vínculo de garfo ou rígido) e quanto ao nível de aplicação das cargas transversais (neutras, desestabilizantes e estabilizantes). Ela não cita explicitamente que deve ser considerado o efeito da distorção da alma, mas, evidentemente, essa consideração conduzirá a resultados mais precisos. (SILVA, 2017)

2.2 TEORIAS CLÁSSICAS

Conforme Fruchtengarten (2005), na teoria clássica de barras da Resistência dos Materiais, denominada Teoria de Bernoulli-Euler, supõe-se que as seções permanecem planas e ortogonais a um determinado eixo da barra, não sendo, portanto, considerados o empenamento e a distorção por força cortante. A distorção da seção transversal por força cortante é considerada na Teoria de barras de Timoshenko, onde se admite que as seções inicialmente planas permanecem planas, mas não necessariamente ortogonais ao eixo da barra, e que as rotações são independentes dos deslocamentos. A hipótese cinemática da dependência entre os deslocamentos e as rotações denomina-se vínculo de Bernoulli-Euler.

De acordo com Rossi (2018), a flambagem lateral com torção e distorção da alma se difere das considerações realizadas pelos procedimentos clássicos na determinação da resistência da viga que sofrem a FLT. Nestes procedimentos é considerado que a seção transversal permanece plana após a flambagem lateral com torção, não apresentando nenhuma distorção em seu plano, situação que em muitos casos não é real.

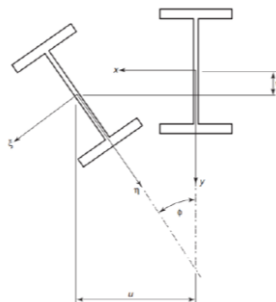


Figura 4: Seção transversal antes e após FLT

Fonte: Rossi (2018)

O momento crítico elástico é determinado na fase elástica da FLT e passa a ser denominado de momento crítico básico (M_{ocr}) ao respeitar as seguintes hipóteses: (ROSSI, 2018)

- a viga se comporta de forma elástica;
- a viga é simplesmente apoiada com presença de restrições laterais em suas extremidades (vínculo de garfo);
- é submetida a momento constante em torno do eixo de maior inércia;
- a seção transversal é bissimétrica, portanto o centro de gravidade e o centro de torção são coincidentes;
- a flexão ocorre na direção do eixo principal.

O equacionamento é baseado nas seguintes hipóteses: (ROSSI, 2018)

- os deslocamentos e os ângulos de torção são pequenos;
- o material é elástico, homogêneo e isotrópico;
- não há flambagem local das mesas e da alma;
- não ocorre a distorção da seção transversal durante a flambagem.

Desse modo, a partir da proposta de Timoshenko e Gere (1961), a equação do momento crítico básico no regime elástico de flambagem é apresentado a seguir:

$$M_{ocr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \frac{EC_w}{GJ}} \quad (1)$$

Onde:

M_{ocr} : momento crítico básico;

L: comprimento destravado;

E: módulo de elasticidade longitudinal;

I_y : momento de inércia em torno do eixo y;

G: módulo de elasticidade transversal;

J: momento de inércia a torção;

C_w : constante de empenamento.

2.3 ABNT NBR 8800:2008

Segundo Silva (2017), a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 apresenta procedimento para cálculo do momento crítico para vigas com seção I duplamente simétrica com bastante similaridade com os princípios fundamentais apresentados anteriormente.

O procedimento da norma brasileira se aplica às seguintes situações: (Silva, 2017)

- vínculo de garfo nas extremidades do comprimento destravado, exceto a extremidade de um balanço, que pode ter todos os deslocamentos livres;
- forças transversais externas, caso existam, aplicadas na semialtura da seção transversal (nas seções duplamente simétricas, a semialtura coincide com o nível do centro de torção, ou seja, não são previstas forças transversais estabilizantes ou desestabilizantes);
- seção transversal constante ao longo do comprimento destravado.

O momento crítico ou momento fletor de flambagem elástica, dado pela NBR 8800:2008, é obtido pela multiplicação do coeficiente de modificação da distribuição do momento fletor pelo momento crítico básico, no caso fundamental, assim como mostra a equação seguinte:

$$M_{cr} = C_b M_{ocr} \quad (2)$$

Onde:

M_{cr} : momento crítico no regime elástico;

C_b : fator de modificação para o diagrama de momento fletor não-uniforme;

M_{ocr} : momento crítico básico.

O fator de modificação para o diagrama do momento fletor não-uniforme (C_b) é responsável pela uniformização da distribuição do momento fletor ao longo do comprimento destravado da seção e é determinado a partir da equação a seguir: (Rossi, 2018)

$$C_b = \frac{12,5M_{m\acute{a}x}}{2,5M_{m\acute{a}x} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} R_m \leq 3,0 \quad (3)$$

Onde:

$M_{m\acute{a}x}$: momento fletor máximo solicitante de cálculo no comprimento destravado;

M_A : momento fletor solicitante de cálculo situado na seção correspondente a $\frac{1}{4}$ do comprimento destravado;

M_B : momento fletor solicitante de cálculo situado na seção correspondente a $\frac{1}{2}$ do comprimento destravado;

M_C : momento fletor solicitante de cálculo situado na seção correspondente a $\frac{3}{4}$ do comprimento destravado;

R_m : parâmetro de monossimetria da seção transversal, tendo valor unitário para seções I de dupla simetria.

A figura posterior representa a esquematização desses momentos fletores:

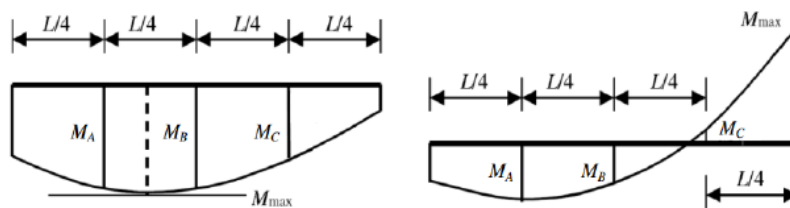


Figura 5: Posição dos momentos para cálculo do C_b

Fonte: Rossi (2018)

Para o estado-limite FLT, o momento crítico ocorre na situação em que a esbeltez se encontra em região de seção esbelta, ou seja, quando o índice de esbeltez (λ) é maior do que o índice de esbeltez limite para seções semcompactas (λ_r).

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

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (5)$$

Onde:

L_b : comprimento destravado;

r_y : raio de giração da seção em relação ao eixo y;

C_w : constante de empenamento, definido pela equação 6

$$C_w = \frac{I_y(d - t_f)^2}{4} \quad (6)$$

Onde:

d: altura total da seção transversal;

t_f: espessura das mesas;

β₁: coeficiente de correção para a esbelteza crítica, definido pela equação 6

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W_x}{EJ} \quad (7)$$

Onde:

σ_r: tensão residual de compressão nas mesas, cujo valor é de 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado, conforme estabelecido pela norma brasileira;

W_x: módulo resistente elástico.

Por fim, se a situação λ > λ_r for satisfeita, tem-se que o momento crítico elástico resulta na seguinte equação:

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{I L_b^2}{C_w} \right)} \quad (8)$$

2.4 EN 1993-1-1:2005

Segundo Rossi (2018), a edição do Eurocode 3, EM 1993-1-1:2002, fornece uma expressão para a determinação do momento crítico elástico. Essa expressão conhecida como fórmula dos três fatores leva em consideração as características de restrição da viga, além de considerar a posição de aplicação do carregamento e a assimetria ou não do perfil da viga analisada.

A equação apresentada para a determinação do momento crítico para vigas metálicas fletidas em torno do seu eixo principal é dada por:

$$M_{cr,0} = \frac{C_1 \pi^2 E I_y}{(k_y L)^2} \sqrt{\left(\frac{k_y}{k_w} \right) \frac{C_w}{I_y} + \frac{(k_y L)^2 G J}{\pi^2 E I_y} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - C_1 \frac{\pi^2 E I_y}{(k_y L)^2} (C_2 z_g - C_3 z_j) \quad (9)$$

Onde:

C₁: coeficiente de distribuição do momento fletor para situações de momento não uniforme;

C₂: coeficiente para consideração da altura de aplicação da carga na seção transversal;

C₃: coeficiente que leva em consideração a assimetria da seção transversal;

k_y: fator de comprimento efetivo correspondente a restrição contra a flexão lateral, sendo equivalente a 1 para situações destravadas;

k_w: fator de comprimento efetivo correspondente a restrição contra o empenamento, sendo equivalente a 1 para situações destravadas;

z_g: distância do ponto de aplicação da carga ao centro de torção, sendo positivo quando aplicada na mesa superior e negativo quando aplicada na mesa inferior;

z_j: parâmetro calculado pela seguinte equação:

$$z_j = z_s - 0,5 \int_A \frac{(x^2 + y^2)}{I_x} x dA \quad (10)$$

Onde:

z_s: distância do centro geométrico da seção transversal ao centro de torção.

Para o caso de vigas com seção transversal duplamente simétricas e com vínculo de garfo, a equação 9 se reduz a expressão a seguir:

$$M_{cr,0} = \frac{C_1 \pi^2 E I_y}{L^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} + \frac{L^2 G J}{\pi^2 E I_y} + (C_2 Z_g)^2} - C_2 Z_g \quad (11)$$

Os valores dos coeficientes C_1 , C_2 e C_3 podem ser consultados em EN 1993-1-1:2005

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 METODOLOGIA

O estudo em questão se baseia na análise de estabilidade elástica de vigas metálicas por meio da utilização do Software GBTUL, cuja formulação se dá por meio da Teoria Geral de Vigas (GBT – Generalized Beam Theory).

Conforme Abambres (2014), a Teoria Geral de Vigas se trata de uma teoria de barras de paredes finas, válida para elementos prismáticos, de eixo reto e sem perfurações, e que contabiliza todos os tipos de deformações da seção transversal, sejam elas global, local e distorcional.

De acordo com Rossi (2018), diferentemente dos softwares que fazem uso do MEF, a GBT aproxima o campo de deslocamentos por meio de funções de forma definidas ao longo de toda a linha média da seção como uma combinação de modos de deformação (globais e locais). Os graus de liberdade são os deslocamentos modais (ao invés de nodais) que permitem avaliar o comportamento estrutural, tendo em vista os fatores de participação de cada modo de deformação na configuração deformada da barra.

A análise de participação de cada um dos modos de deformação na configuração deformada faz da GBT uma importante ferramenta em demonstrar a influência dos modos de deformação locais e distorcional combinados a deformação global nos valores do momento crítico elástico (ROSSI, 2018).

Os elementos para análise no software GBTUL são compostos de vigas com seção transversal do tipo perfil I, bissimétrico.

Quanto ao tipo de vinculação, optou-se pelo vínculo do tipo garfo, no qual o deslocamento lateral e a torção são restringidos nas extremidades, e essa é livre para rotacionar lateralmente e a seção transversal é liberada para o empenamento.

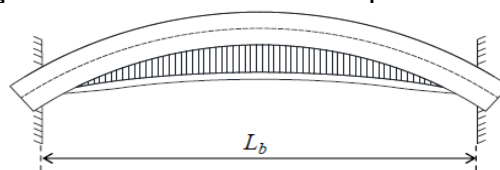


Figura 6: Vínculo de garfo
Fonte: Silva (2011)

Em relação ao carregamento, considerou-se nas análises os carregamentos uniformemente distribuídos, aplicados tanto no centro de torção quanto na mesa superior.

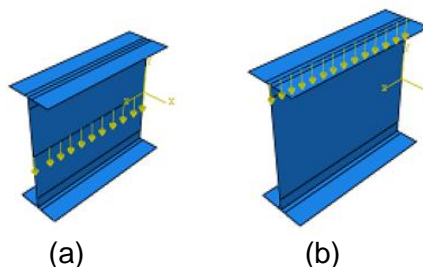


Figura 7: Esquema de aplicação dos carregamentos
Fonte: Rossi (2018)

O material consiste na utilização de chapas de aço ASTM A572, cujos módulo de elasticidade longitudinal (E) e coeficiente de Poisson (ν) equivalem a 200GPa e 0,3, respectivamente.

Em relação à geometria, fez-se a utilização dos valores referentes aos perfis soldados. O esquema e as dimensões podem ser observados na Figura 7 e Tabela 2, respectivamente:

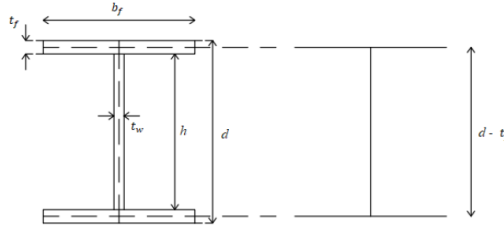


Figura 8: Representação da geometria dos perfis
Fonte: Rossi (2018)

Tabela 2: Perfis analisados

DESIGNAÇÃO	Massa	Área	DIMENSÕES					EIXO X-X				EIXO Y-Y				Prop. Torção	
Altura x Massa	Linear	A	d	bf	tw	tf	h	Ix	Wx	rx	Zx	Iy	Wy	ry	Zy	It	Cw
[mm x kg/m]	[kg/m]	[cm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm]	[cm ³]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm]	[cm ³]	[cm ⁴]	[cm ⁶]
VS 500X86	86	109.5	500	250	6.3	16	468	52259.70	2090.00	21.80	2281.00	4167.60	333.40	6.20	504.60	72.20	2440737.77
VS 550X88	88.4	112.6	550	250	6.3	16	518	64345.34	2339.83	23.90	2558.61	4167.75	333.42	6.08	505.14	72.58	2971144.47
VS 750X140	140.2	178.6	750	320	8	19	712	186545.27	4974.54	32.32	5458.37	10379.57	648.72	7.62	984.19	158.50	13866095.12
VS 800X129	128.6	163.8	800	320	8	16	768	187572.77	4689.32	33.84	5193.73	8741.41	546.34	7.30	831.49	100.49	13432400.47
VS 850X120	120.5	153.5	850	350	8	12.5	825	190878.39	4491.26	35.26	5025.31	8935.81	510.62	7.63	778.83	59.70	15669085.38
VS 950X127	126.8	161.5	950	350	8	12.5	925	245035.68	5158.65	38.95	5812.81	8936.24	510.64	7.44	780.43	61.40	19635289.31
VS 1000X180	179.8	229	1000	400	8	19	962	425094.72	8501.89	43.09	9306.49	20270.77	1013.54	9.41	1535.39	199.30	48769499.11

Fonte: Autor (2019)

Os comprimentos das vigas analisadas foram definidos para os valores acima índice de esbeltez limite para seções semicompactas (λ_r), região de regime elástico para FLT.

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados os resultados referentes aos valores do momento crítico para os perfis demonstrados na Tabela 2. Os gráficos correspondem aos valores obtidos pela análise numérica através do software GBTUL, juntamente com aqueles alcançados por meio dos procedimentos normativos.

Para cargas concentrada e distribuída aplicadas no centro de torção, os valores dos momentos críticos se demonstraram bastantes próximos na comparação entre os procedimentos normativos da NBR 8800:2008 e EN 1993-1-1:2005, isso devido ao fato de que as condições de contorno apresentadas da norma brasileira e os coeficientes (C_1 , C_2 e C_3) da norma europeia se correspondem.

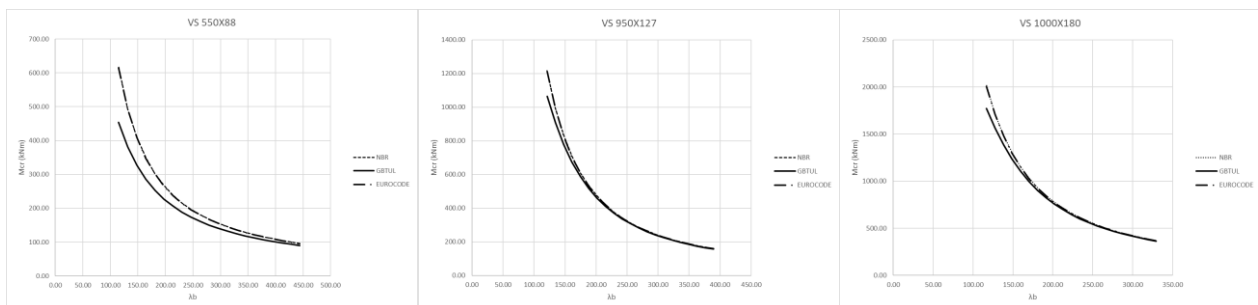
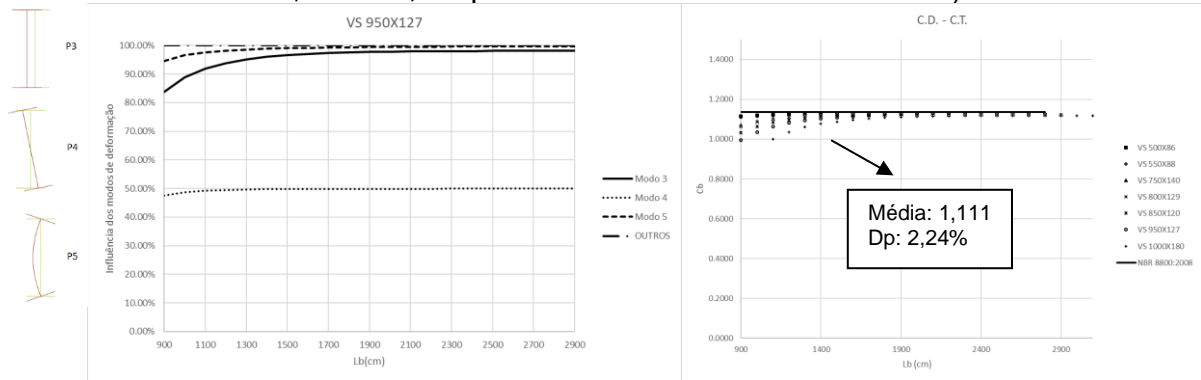


Figura 9: Curvas de comportamento (C.D. – C.T.)
Fonte: Autor (2019)

Quanto aos resultados da análise numérica, a discrepância entre os valores é relativamente baixa. Essa diferença se acentua à medida que o índice de esbeltez diminui e os modos de deformação locais passam a ser mais influentes e se combinam à FLT. Tal relação pode ser percebida por meio da influência dos modos de deformação e através da comparação realizada entre os valores C_b da norma nacional e o C_b alterado (razão entre o M_{cr} , da análise numérica, e o M_{cr} , do procedimento normativo brasileiro).



(a) Influência dos modos (b) Comparação do coeficiente C_b

Figura 10: Resultados (C.D. – C.T.), Fonte: Autor (2019)

Já para as condições de carregamento aplicado na mesa superior, os valores dos momentos críticos obtidos por meio do procedimento da NBR 8800:2008 se diferiram consideravelmente em relação aos resultados aferidos através do procedimento da EN 1993-1-1:2005 e da análise numérica. Tal disparidade pode ser explicada por conta de a norma brasileira não dispor de um coeficiente que leve em conta o carregamento na mesa superior, situação de carga desestabilizante. Diferentemente da norma europeia que faz essa consideração por meio do coeficiente C_2 .

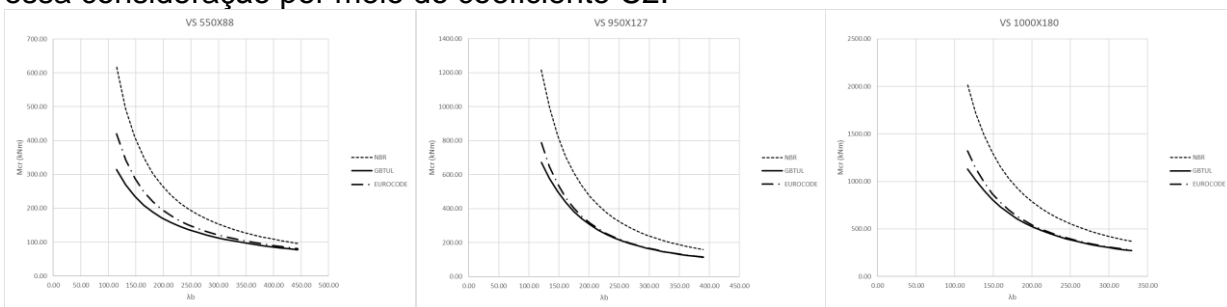
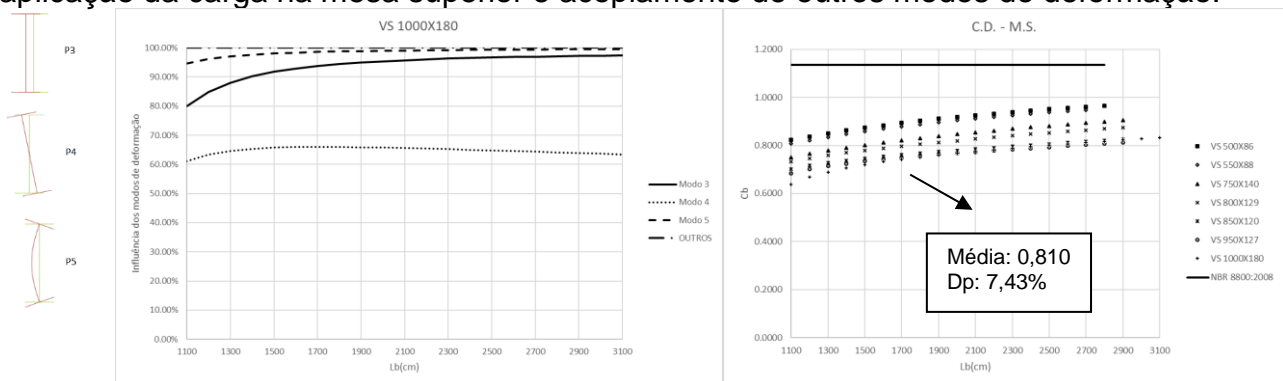


Figura 11: Curvas de comportamento (C.D. – M.S.)

Fonte: Autor, (2019)

Há ainda influência dos modos de deformação locais acoplados à FLT os quais são responsáveis por distanciar os resultados da análise em relação aos normativos. Observa-se que os valores C_b estão mais distantes pela desconsideração desses dois fatores: aplicação da carga na mesa superior e acoplamento de outros modos de deformação.



(a) Influência dos modos (b) Comparação do coeficiente C_b

Figura 12: Influência dos modos (C.D. – M.S.)

Fonte: Autor (2019)

4. CONCLUSÃO

As seguintes conclusões podem ser tomadas em relação as análises do momento crítico elástico à FLT realizados a partir de procedimentos numéricos (GBTUL) e normativos (ABNT NBR 8800:2008 e EN 1993-1-1:2005).

Para as situações de análises onde é possível impor as mesmas condições de contorno consideradas pela norma brasileira como restrições do vínculo de garfo, momento constante e aplicação da carga no centro de torção, os procedimentos numérico e europeu apresentaram-se relativa proximidade. Essa sentença pode ser confirmada através da comparação entre o valor de C_b obtido nessa condição equivalente a 1,111. Resultado próximo do valor nominal igual a 1,136.

Não obstante, as disparidades entre os valores são acentuadas onde se observa maior participação de outros modos de deformação, acoplados à FLT.

Já para a situação de carregamento aplicado na mesa superior, circunstância em que a NBR não aborda em seu procedimento, os resultados se demonstraram menos conservadores. O procedimento EN 1993-1-1:2005 apresentou resultados mais conservadores por atribuir aos cálculos o coeficiente C_2 referente ao local de aplicação da carga. Nesse caso, o valor médio de C_b de 0,810 obtido pela análise numérica já se denotou mais distante do valor nominal de 1,136.

5. REFERÊNCIAS

ABAMBRES, M. **Análises Elastoplásticas de 1ª e 2ª Ordem de Perfis Metálicos de Parede Fina Utilizando a Teoria Generalizada de Vigas**. 2014. Dissertação (Doutorado em Engenharia). Universidade de Lisboa – Instituto Superior Técnico – IST.

ABREU, L. M. P. Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Belo Horizonte.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 8800**. Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro. 2008.

EUROCODE 3 EM 1993-1-1:2005 – Design of Steel Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings – Eurocode 3, 2005.

FRUCHTENGARTEN, J. **Sobre o estudo de flambagem lateral de vigas de aço por meio da utilização de uma teoria não-linear geometricamente exata**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. São Paulo.

REIS, A.; CAMOTIM, D. **Estabilidade Estrutural** – McGraw-Hill; 2000.

ROSSI, A. **Flambagem lateral com torção e distorção da alma em vigas de perfis I metálicos duplamente simétricos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Estadual de Maringá, UEM. Maringá.

SILVA, C. C. **Estudo da Influência da Distorção da Alma no Momento Crítico Elástico de Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço de Alma Não Esbelta com Seção I**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Belo Horizonte.