

ANÁLISE DE FLAMBAGEM DISTORCIONAL E RESISTÊNCIA ÚLTIMA DE PERFIL METÁLICO TIPO U ENRIJECIDO

Lucas César Nunes¹, Tauana de Oliveira Batista².

¹ Graduado em Engenharia Civil, FACIG, nunes.cesar.lucas@gmail.com

² Mestre em Estruturas e Materiais, UFRJ/COPPE, tauana@sempre.facig.edu.br

Resumo- As estruturas metálicas apresentam algumas vantagens em comparação com outros materiais (concreto), como exemplo pode-se citar: elevada resistência do aço; redução dos desperdícios na construção; facilidade de transporte e manuseio e peso reduzido. Os perfis metálicos formados à frio de paredes finas, são amplamente empregados no mercado de construção civil. Realizou-se um estudo numérico computacional do comportamento estrutural de colunas de aço bi-apoiadas com seção transversal tipo U enrijecido, sujeitas à compressão axial, o qual apresenta e discute os resultados das análises numéricas de flambagem distorcional obtidas através do programa GBTul 2.0 ao variar as dimensões b_w (altura) em relação a b_f (comprimento). Verificou-se que (i) a medida que se aumenta b_w , a carga crítica diminui, (ii) a coluna de maior carga crítica é a que apresenta relação b_w / b_f igual a 1, apresentando maior rigidez para a coluna e (iii) a carga última cresce de acordo com o aumento de b_w .

Palavras-chave: Flambagem; Flambagem Distorcional; Perfil Formado a Frio; U Enrijecido; MRD.

Área do Conhecimento: Engenharias.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas metálicas apresentam algumas vantagens em comparação com outros materiais (concreto), como exemplo pode-se citar: elevada resistência do aço; redução dos desperdícios na construção; facilidade de transporte e manuseio e peso reduzido. Os Perfis metálicos Formados à Frio (PFF) de paredes finas, são amplamente empregados no mercado de construção civil, sua utilização vem aumentando devido à redução do tempo de produção, custos e agilidade no processo de construção exigidos pelo mercado, sendo empregados como estruturas de galpões, coberturas, mezaninos e até em edifícios de pequeno e médio porte. Os elementos destes perfis possuem no máximo 8mm de espessura, tornando-os altamente suscetíveis a fenômenos de Flambagem, sendo assim, os Perfis de Paredes Finas (PPF), exigem uma análise de estabilidade precisa devido à esbelteza de seus elementos.

Da revisão bibliográfica, sabe-se que a estabilidade estrutural em perfis metálicos tem sido objeto de estudo ao longo dos anos e cada pesquisa realizada na área contribui de forma significativa para elaboração de normas e métodos que auxiliam no dimensionamento destes perfis. Atualmente NBR 14762/2010 trata do dimensionamento de estruturas de aço constituídas por PFF e traz em seu apêndice C o Método da Resistência Direta (MRD) que fornece expressões que permitem estimar a capacidade resistente de perfis de aço submetidos à compressão centrada, com falha nos modos global, local e distorcional.

Realizou-se um estudo numérico computacional do comportamento estrutural de colunas de aço bi-apoiadas com seção transversal tipo U enrijecido, sujeitas à compressão axial, o qual apresenta e discute os resultados das análises numéricas de flambagem distorcional. A partir dos resultados, pretende-se averiguar a influência da variação das dimensões b_w em relação a b_f na resistência final do perfil. Para realização desta análise, será utilizado o programa GBTul 2.0 (BEBIANO et. al, 2010 a,b), que se baseia na “Generalised Beam Theory” e a resistência final da coluna será obtida pelo MRD a partir dos dados fornecidos pelo GBTul.

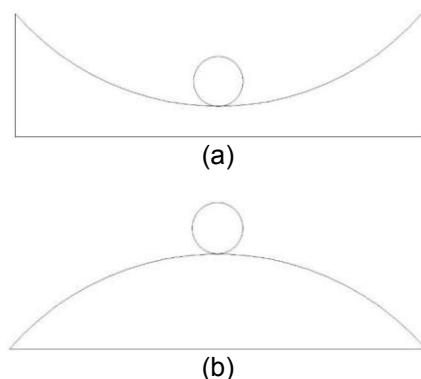
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estabilidade e Equilíbrio

Um fator importante para elaboração de um projeto, além dos requisitos de força e segurança, é a estabilidade da estrutura. Segundo Batista (2016), estabilidade está diretamente associada a condição de equilíbrio. Segundo Dias (2015) fala que um corpo está em equilíbrio quando as forças e cargas que atuam sobre ele são nulas e quando o momento em qualquer posição do corpo também seja nulo. A estabilidade de uma estrutura é avaliada através de seu comportamento exposto a forças externas em uma configuração de equilíbrio, após sofrer uma pequena perturbação por uma força externa. Se o corpo retorna à posição inicial após a perturbação, diz-se que o corpo está em situação de equilíbrio estável; caso o corpo não retorne à posição inicial após a perturbação, a situação do corpo é de equilíbrio instável (BATISTA, 2015; DIAS, 1997; GARCIA, 2015).

Um exemplo prático de estabilidade é a esfera no fundo do vale e em cima da colina. Quando a esfera sofre uma perturbação no fundo do vale, Figura 1 (a), a esfera se desloca da sua origem, e após o término da energia gerada pela perturbação, ela retorna à posição de origem, mostrando que o sistema de equilíbrio está estável. A Figura 1 (b), mostra um sistema de equilíbrio instável, uma vez que a esfera ao sofrer uma perturbação, irá se deslocar para longe da origem, impossibilitada de retornar ao ponto original (BATISTA, 2016).

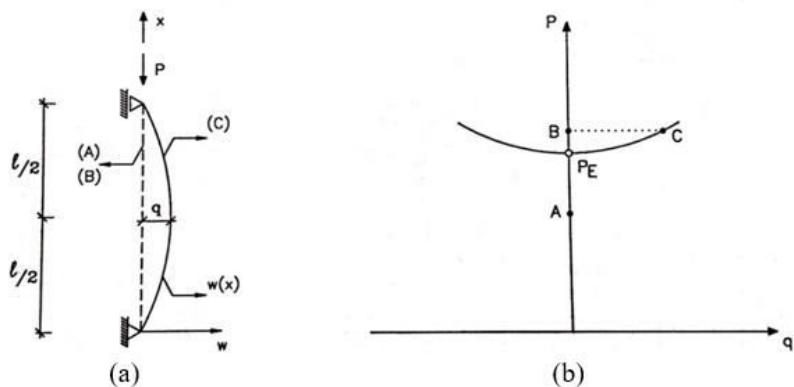
Figura 1 - Estabilidade e Equilíbrio: (a) esfera no fundo do vale e (b) esfera no topo da colina



Fonte: Elaborado pelo autor

O conceito de estabilidade para colunas pode ser exemplificado pela *Coluna de Euler* ou Flambagem de Euler. A carga crítica ou ponto crítico para que ocorra a flambagem, depende de fatores como as dimensões da seção da barra, tipo de vinculação e comprimento livre (DIAS, 2015). Como mostra a Figura 2 (a), a essência da teoria da *Coluna de Euler* consiste em (i) uma coluna elástica, (ii) perfeitamente alinhada (sem deformações previas), (iii) de comprimento L , (iv) com as extremidades simplesmente apoiadas e (v) submetida a uma carga axial de compressão (P). A figura 2 (b) apresenta sua trajetória de equilíbrio, representada pelo deslocamento lateral (q) no meio do vão (sobre o eixo x) vs. carga aplicada (P) (BATISTA, 2016).

Figura 2 - *Coluna de Euler*: (a) geometria e carga e (b) Caminho de equilíbrio

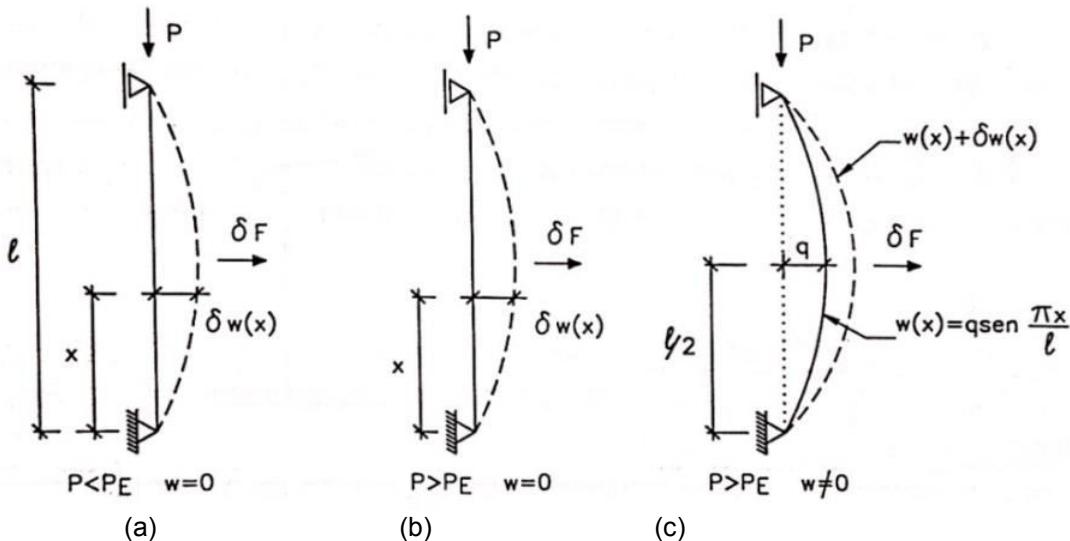


Fonte: REIS e CAMOTIM, 2001

Quando $q = 0$, denomina-se como “trajetória fundamental”, $q \neq 0$ denomina-se como “trajetória pós-flambagem”. A interseção desses dois pontos é designada carga crítica (P_E), resultante da Equação (1), onde EI é a rigidez a flexão da seção transversal da coluna (BATISTA, 2016).

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad \text{Equação (1)}$$

Figura 3 - Configurações de equilíbrio da Coluna de Euler: (a) equilíbrio estável (b) equilíbrio instável e (c) equilíbrio estável



Fonte: REIS e CAMOTIM, 2001

Ainda considerando a trajetória de equilíbrio indicada na Figura 2 (b), os pontos A, B e C representam três configurações diferentes da coluna (B e C correspondem a mesma carga). Depois de uma leve perturbação, devido à aplicação de uma pequena carga δ_F , no ponto A ($P < P_E$ e $q = 0$, Figura 3 (a)) a coluna regrediu à sua posição original. Apresentando um equilíbrio estável. No ponto B ($P > P_E$ e $q = 0$, Figura 3 (b)), a coluna “afasta-se” de sua posição original apresentando um equilíbrio instável. Assim, nesse último caso, a perturbação “conduz” a coluna para a configuração de equilíbrio C. Se, posteriormente, aplica-se uma leve perturbação na estrutura, em C ($P > P_E$ e $q \neq 0$, Figura 3 (c)), verifica-se que o equilíbrio é estável. De fato, a carga crítica marca a transição de equilíbrio estável para instável. A carga de Euler representa a menor carga que faz com que ocorra uma mudança no estado de equilíbrio da coluna idealizada (IYENGAR, 1986).

2.2 Perfil Formado a Frio – PFF

A estabilidade da estrutura, assim como em todos os modelos estruturais deve ser criteriosamente analisada afim de atender as exigências de projetos. Em estruturas metálicas, essa análise é essencial por se trabalhar com perfis que possuem grande relação largura x espessura. Os perfis formados a frio são gerados pelos processos de dobramento a frio de chapas metálicas (em temperatura ambiente). A NBR 6355 padroniza o dimensionamento de perfis metálicos e a NBR 14762 padroniza o dimensionamento de estruturas constituídas por perfil formado a frio.

O processo de obtenção desses perfis é realizado por dobramento de chapas ou tiras, com o intuito de obter uma forma geométrica diferente que resiste a uma carga maior que a chapa de aço. Os PFF são fabricados basicamente por dois processos; (i) dobradeiras ou (ii) perfilção (GARCIA, 2015).

As dobradeiras têm capacidade de dobrar chapas de até 12,5 mm de espessura com comprimento de 3000 mm a 6000 mm (DIAS, 2015). O processo de dobragem pelas dobradeiras é apresentado na Figura 4, onde a chapa é prensada por sua matriz, dobrando-o para formar o perfil desejado (SILVA; SILVA, 2008).

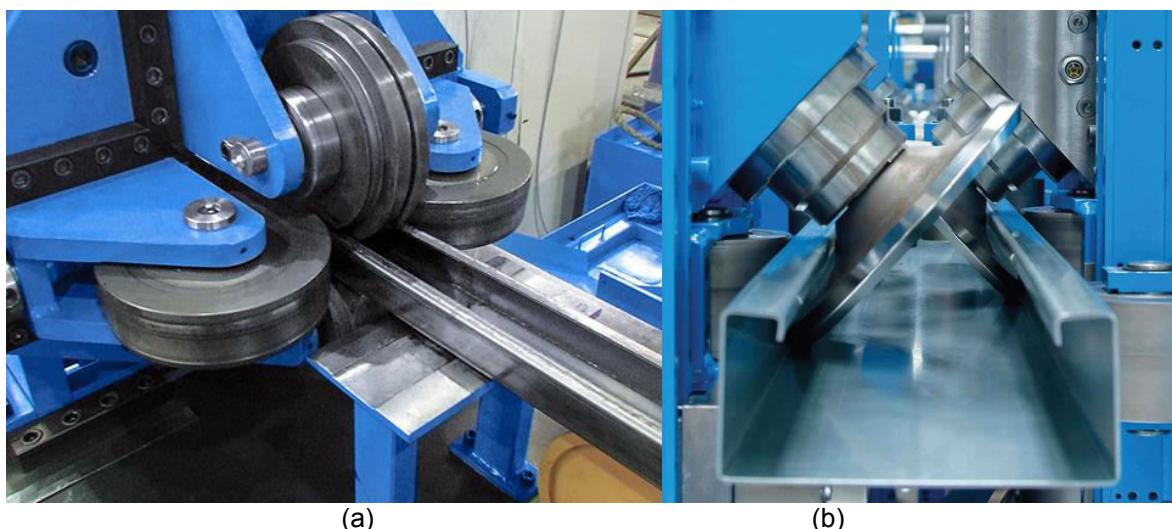
Figura 4 - Processo por Dobradeira



Fonte: SINOS METAL, 2016

As perfiladeiras produzem perfis de qualquer comprimento, em geral de 0,30 mm a 3 mm de espessura com dimensões máximas 1500 mm de largura x 3000 mm de comprimento, para perfis enrijecidos (DIAS, 2015), a chapa se desloca longitudinalmente sobre os roletes que a modelam para formar o perfil, como ilustra a Figura 5 (SILVA; SILVA, 2008).

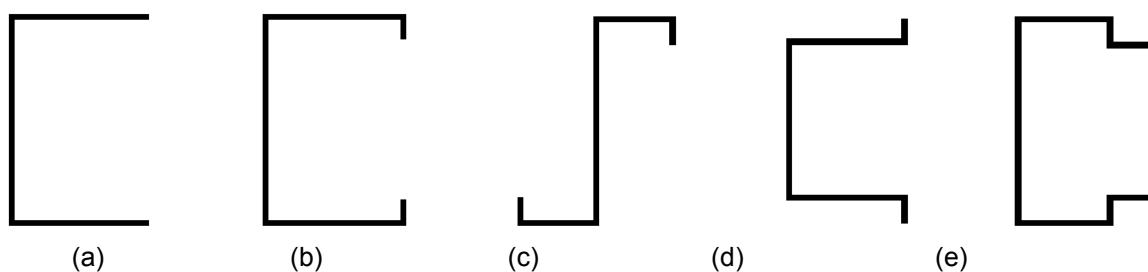
Figura 5 - Processo de perfilação (a) vista lateral e (b) corte longitudinal



Fonte: ZIKELI, 2016

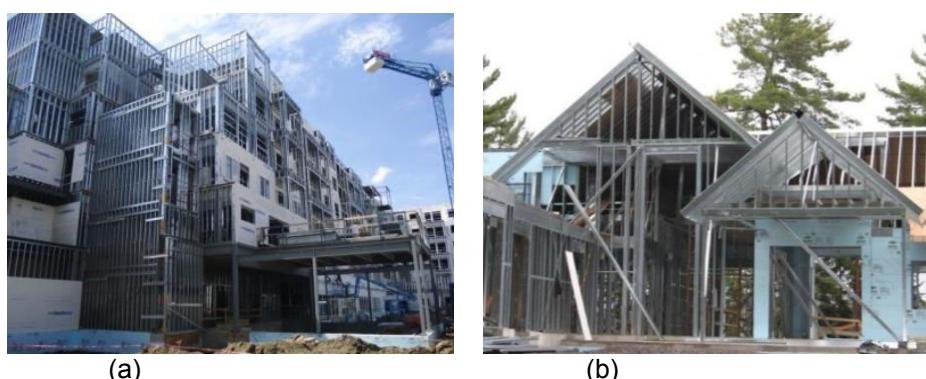
Segundo Pinheiro (2005), várias são as vantagens da utilização de estruturas metálicas, por exemplo; (i) precisão milimétrica, (ii) garantia das dimensões e propriedades do material, (iii) resistência a vibração e choques, (iv) agilidade na execução de obras e redução do desperdício, (v) estruturas leves com alta resistência estrutural, entre outras. As geometrias de PFF mais comuns estão representadas na Figura 6.

Figura 6 - Principais geometrias de PFF; (a) perfil U, (b) perfil U enrijecido, (c) perfil Z enrijecido, (d) perfil rack e (e) perfil rack



Fonte: GARCIA, 2015

Figura 7 - Utilização de PFF em estruturas de (a) médio e (b) pequeno porte



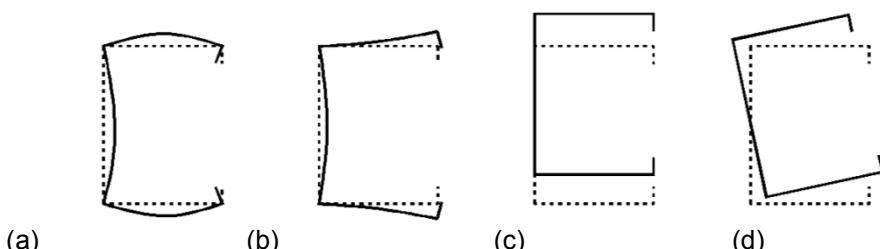
Fonte: CSSBI, 2016

2.3 Flambagem

Um perfil formado a frio pode-se romper de duas maneiras ou ambas, (i) por escoamento, em placas muito espessas, onde a relação largura/espessura é menor do que 10 e seu comprimento também é pequeno e (ii) por flambagem; (a) local L, (b) distorcional D, (c) global G por flexão da coluna ou flexo-torção e (d) pela interação entre os modos de flambagem; LG, LD, DG ou ainda LDG (KOIKE, 2011).

Flambagem é o deslocamento de um elemento estrutural quando submetido a um carregamento. Perfis metálicos, por serem elementos esbeltos, com grande relação largura/espessura, estão muito suscetíveis a fenômenos de flambagem. A carga crítica de um elemento pode estar associada a flambagem local, global ou distorcional, dependendo de seu deslocamento. A flambagem local envolve a flexão de placas e não apresenta deslocamentos transversais nas arestas, a flambagem distorcional envolve mudanças na seção transversal excluindo a flambagem local, tal mudança inclui o deslocamento das arestas e a flambagem global ocorre de duas maneiras, por flexão da coluna ou flexo-torção, ambas sem alteração da seção transversal (BATISTA, 2015).

Figura 8 - Deformações de Flambagem (a) local, (b) distorcional e (c) global e (d) global



Fonte: GARCIA, 2015

As deformações que sofrem, os perfis submetidos a cargas de compressão, podem ser facilmente calculadas por métodos numéricos, segundo Koike (2011), existe três métodos reconhecidos para executar o cálculo da carga crítica de flambagem, sendo (i) método dos elementos finitos (MEF), (ii) métodos das faixas finitas (MFF) e (iii) "Generalised Beam Theory" (GBT).

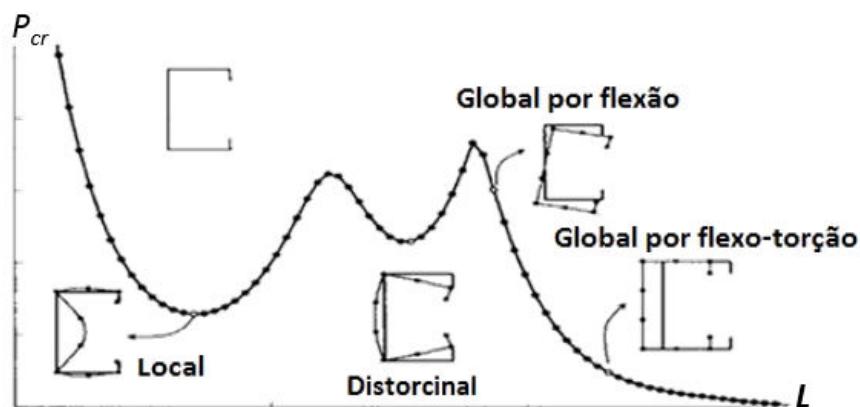
O método dos elementos finitos (MEF), é de longe o método numérico mais geral e mais utilizado. Aplicável a qualquer tipo de elemento estrutural, qualquer carregamento e qualquer condição de contorno. Sua análise gera um grande número de possíveis modos de flambagem, porém o MEF não distingue os modos calculados. O método das faixas finitas (MFF), possui uma programação simplificada, permitindo a utilização de técnicas matriciais de uso corrente, diminuindo a área da memória ocupada para a análise dos dados, porém é limitado a aplicação de perfis de seção aberta e condições de extremidade simplesmente apoiadas e de empenamento livre. O MFF exige uma pequena quantidade de dados de entrada, diminuindo a possibilidade de possíveis erros de lançamento, ao contrário do MEF, onde o número de dados de entrada, a via de regra é muito grande.

Entre eles, o método GBT, que vem despertando o interesse de vários investigadores por todo o mundo como destaca Freitas (2011, p. 1), e.g., Camotim *et al.*, 2004, 2005, 2007; Simão e Silva, 2002, 2003; Baláz, 1999; Rendek e Baláz, 2004; Halme, 2002.

O programa GBTul que utiliza o método GBT, foi desenvolvido no departamento de Engenharia Civil (DECivil) da Universidade Técnica de Lisboa (UL) – Lisboa, Portugal, GBTul é um programa gratuito que realiza análise flambagem elástica e vibração de perfis metálicos. Fornece informações e visualização dos modos de flambagem para análise, permitindo assim, uma visão aprofundada sobre a mecânica do problema a ser resolvido. O programa permite analisar perfis (i) feito de um ou vários materiais isotrópicos ou ortótropicos, e (ii) que apresenta várias condições comuns de suporte, como apoios simples, suportes fixos ou extremidades livres, em uma interface gráfica de alta qualidade 2D e 3D.

Uma de suas vantagens é a análise dos modos de flambagem por meio do auxílio da curva de assinatura, que relaciona o comprimento do perfil e sua carga crítica, como mostra a Figura 9. A caracterização do modo de flambagem é feita com base na identificação dos pontos de mínimo da curva. Alguns dos pontos da curva de assinatura, podem apresentar participação de vários modos de flambagem para a deformada final da estrutura. Para a determinação do modo crítico de flambagem, deve-se considerar a porcentagem de participação modal de cada modo de flambagem.

Figura 9 – Exemplo de curva de assinatura para perfil U enrijecido



Fonte: Modificado GARCIA (2015).

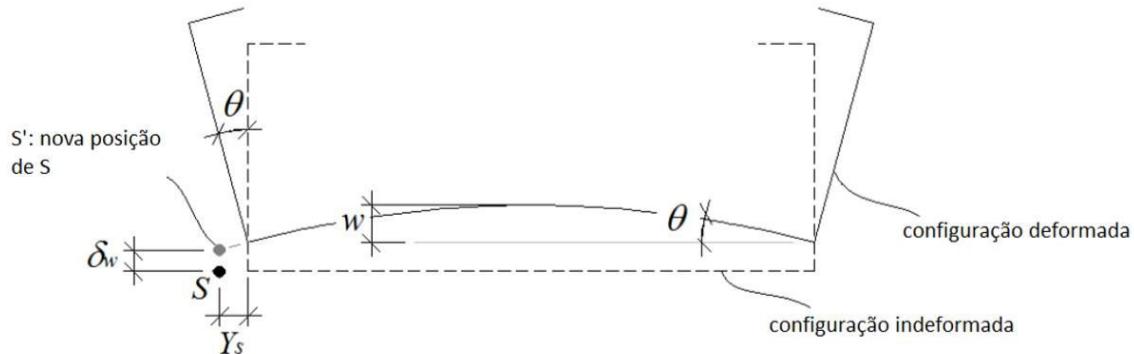
2.4 Flambagem Distorcional

Para perfis do tipo U enrijecido, o modo distorcional caracteriza-se pela rotação do conjunto mesa+enrijecedor em torno do canto dobrado da alma-mesa, com flexão do plano da alma e deslocamentos das arestas. Pode-se dizer que em geral, o conjunto mesa+enrijecedor sofre pequenas deformações por flexão (SALLES, 2016).

Salles (2016), demonstra que o modo de flambagem distorcional pode ser entendido por uma combinação de 3 funções de deslocamentos, a Figura 10 mostra (i) flexão da alma expressa por w ,

(ii) rotação do conjunto flange+enrijecedor em torno do ponto S distante Y_s da junção alma/mesa expressa por θ e (iii) flexão da coluna em torno do seu eixo de menor inércia expressa por δ_w .

Figura 10 – Deslocamentos no modo distorcional



Fonte: SALLES, 2016

2.5 Método da Resistência Direta – MRD

O método da resistência direta – MRD, tem sido muito difundido por se um método simplificado e eficiente. Este foi adicionado nas normas americanas (AISI, 2012), Australiana / Nova Zelândia (AS/NZS, 2005) e Norma Brasileira (ABNT, 2010), no anexo C da NBR 14762 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio (GARCIA, 2015).

O MRD, tem a finalidade de avaliar a resistência última do perfil, utilizando as propriedades da seção bruta. O MRD não considera o cálculo da largura efetiva, porém exige um cálculo preciso do comportamento de flambagem elástica da coluna. Esses dados podem ser obtidos por métodos numéricos como o GBT, que fornece facilmente os cálculos de estabilidade exigidos. Para o cálculo da resistência última utiliza as Equações (2), (3) e (4), do apêndice C da ABNT NBR 14762:2010, (BATISTA, 2016; GARCIA, 2015) onde;

$P_{n,D}$ - Valor característico da força axial de compressão resistente, associado a flambagem distorcional.

A - Área bruta da seção transversal da barra.

f_y - Resistência de escoamento do aço.

λ_D - Índice de esbeltez reduzido associado a flambagem distorcional.

$P_{cr,D}$ - Força axial de flambagem distorcional elástica.

$$P_{n,D} = Af_y, \text{ para } \lambda_D \leq 0.561 \quad \text{Equação (2)}$$

$$P_{n,D} = \left(1 - \frac{0.25}{\lambda_D^{1.2}}\right) \frac{Af_y}{\lambda_D^{1.2}}, \text{ para } \lambda_D > 0.561 \quad \text{Equação (3)}$$

$$\lambda_D = \left(\frac{Af_y}{P_{cr,D}} \right)^{0.5} \quad \text{Equação (4)}$$

3 METODOLOGIA

Realizou-se uma análise computacional de colunas metálicas bi-apoiadas com seção transversal tipo U enrijecido, submetidas a compressão axial, com o objetivo de apresentar e discutir os resultados das análises numéricas de flambagem distorcional, ao variar as dimensões b_w em relação a b_f . Utiliza-se o programa GBTul 2.0 (BEBIANO et. al, 2010 a,b), para análise numérica da

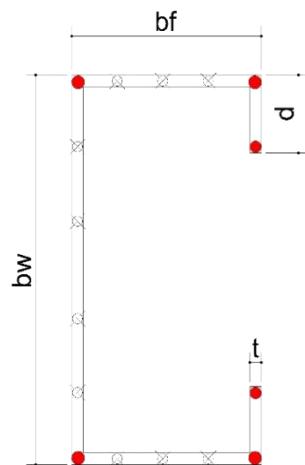
flambagem distorcional e o método da resistência direta presente no apêndice C da NBR 14762/2010 para obter a resistência última da coluna.

Para a realização da análise de flambagem no programa GBTul, considera-se $E=210$ e 205GPa (módulo de Young), $\nu=0.3$ (coeficiente de Poisson) e condição de apoio de extremidade simplesmente apoiada (deslocamentos e rotações globais/lokais e empenamento livres), as colunas selecionadas devem apresentar modo de flambagem “puramente” distorcional, pode-se dizer que as colunas apresentam modo de deformação “puro” quando o modo distorcional apresenta uma contribuição dominante em relação aos demais modos de deformação. Os comprimentos críticos de flambagem distorcional estão associados ao comprimento de uma semi-onda.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira etapa do presente trabalho consistiu em selecionar cuidadosamente as dimensões do perfil. A Figura 4.1 ilustra os parâmetros geométricos da seção transversal, a serem (i) altura (b_w), (ii) largura (b_f), (iii) enrijecedor (d) e (iv) espessura (t), ainda traz os nós principais representados pelos círculos preenchidos de vermelho e os nós intermediários que foram empregados na discretização do modelo.

Figura 11 – Perfil U enrijecido



Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado final da escolha dos 16 perfis encontra-se na Tabela 1 e envolve um processo que se divide em (i) escolha da dimensão inicial do perfil, (ii) variação do valor de b_w em relação à dimensão inicial, mantendo-se o valor de b_f , d e t , (iii) divisão das colunas em quatro grupos, denominados G1, G2, G3 e G4, que apresentam o mesmo valor de b_f , d , t e E e (iv) escolha do valor de E .

Da Tabela 1 deve-se definir como iniciais as colunas 1, 4, 7 e 10. As colunas (i) 2, 3 e 3.1 do grupo G1, (ii) 5, 6 e 6.1 do grupo G2, (iii) 8, 9 e 9.1 do grupo G3 e (iv) 11, 12 e 12.1 do grupo G4, são definidas como colunas secundárias.

Tabela 1 – Dados geométricos dos perfis utilizado para análise

<i>Coluna</i>	b_w (mm)	b_f (mm)	d (mm)	t (mm)	A (cm ²)	E (GPa)	b_w/b_f	
G1	1	60	60	10	2	4	210	1,00
	2	70	60	10	2	4,2	210	1,17
	3	80	60	10	2	4,4	210	1,33
	3.1	100	60	10	2	4,8	210	1,67
G2	4	75	75	10	2	4,9	210	1,00
	5	85	75	10	2	5,1	210	1,13
	6	95	75	10	2	5,3	210	1,27
	6.1	115	75	10	2	5,7	210	1,53
G3	7	85	85	10,6	2,65	7,1	205	1,00
	8	95	85	10,6	2,65	7,6	205	1,12
	9	105	85	10,6	2,65	7,8	205	1,24
	9.1	125	85	10,6	2,65	8,4	205	1,47
G4	10	100	142,9	10,6	2,65	10,8	205	0,70
	11	110	142,9	10,6	2,65	11,1	205	0,77
	12	120	142,9	10,6	2,65	11,3	205	0,84
	12.1	140	142,9	10,6	2,65	11,8	205	0,98

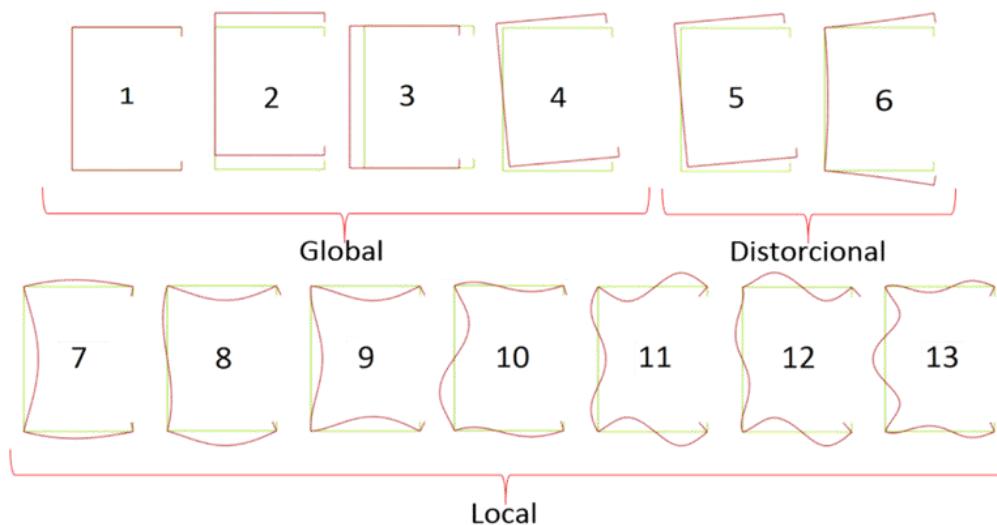
Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 Análise de Flambagem Via GBTul

A análise de flambagem foi realizada utilizando-se o código GBTul (BEBIANO *et al.* 2010 a,b), com objetivo de satisfazer os seguintes requisitos: (i) as colunas selecionadas devem apresentar modo de flambagem “puramente” distorcional, (ii) as dimensões da seção transversal envolvem diferentes valores de b_w . Este requisito visa permitir a análise da influência do b_w sobre a carga crítica, modo de deformação e resistência final da coluna e (iii) Obtenção dos comprimentos de meia-onda associados aos modos de flambagem críticos distorcional. Antes de mostrar os resultados das análises de flambagem, apresenta-se e discute-se o significado da palavra "flambagem distorcional", com o objetivo de esclarecer as escolhas adotadas neste trabalho. Primeiramente, é consensual que, no plano da seção transversal, as deformações no modo distorcional estão associadas a deslocamentos das arestas (HANCOCK, 2003). Pode-se dizer que os perfis tipo U enrijecido apresentam modo de deformação "puro" quando o modo distorcional apresenta uma contribuição dominante em relação aos demais modos de deformação. De acordo com tais definições e aproveitando a linguagem modal do programa GBTul (BEBIANO *et al.* 2010 a,b), a Figura 12 apresenta os modos de deformação local, distorcional e global para a geometria em estudo.

Analizando a Figura 12, o presente trabalho considera os modos de números (i) 1 a 4 como modos críticos de flambagem global, (ii) 5 e 6 como modos críticos de flambagem distorcional e (iii) 7 a 13 como modos críticos de flambagem local.

Figura 12 – Modos de deformação via GBTul



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a realização da análise de flambagem no programa GBTul considera-se $E=210$ e 205 GPa (módulo de Young), $\nu=0.3$ (coeficiente de Poisson) e condição de apoio de extremidade simplesmente apoiada (deslocamentos e rotações globais/lokais e empenamento livres), os resultados das análises estão apresentados nas Tabela 2, que fornece (i) o comprimento crítico associado a flambagem distorcional (LD), (ii) carga crítica correspondente a flambagem distorcional ($P_{cr.D}$) e (iii) a participação modal para cada modo de deformação (P_5 e P_6).

Tabela 2 – Resultados de flambagem distorcional

Coluna	L_D (cm)	$P_{cr.D}$ (kN)	p_5 (%)	p_6 (%)	p_{outros} (%)
G1	1	30	165,9	97,47	0
	2	30	165,8	97,34	0
	3	30	165,7	97,71	0
	3.1	40	159,9	97,35	0
G2	4	40	128,9	97,73	0
	5	40	128,4	97,68	0
	6	40	127,9	96,33	0
	6.1	40	126,1	96,91	0
G3	7	40	217,3	97,63	0
	8	40	217,1	97,62	0
	9	40	216,8	97,55	0
	9.1	40	215,6	97,16	0
G4	10	60	121	96,97	0
	11	60	120,8	96,41	0
	12	60	120,7	97,09	0
	12.1	60	120,7	97,17	0

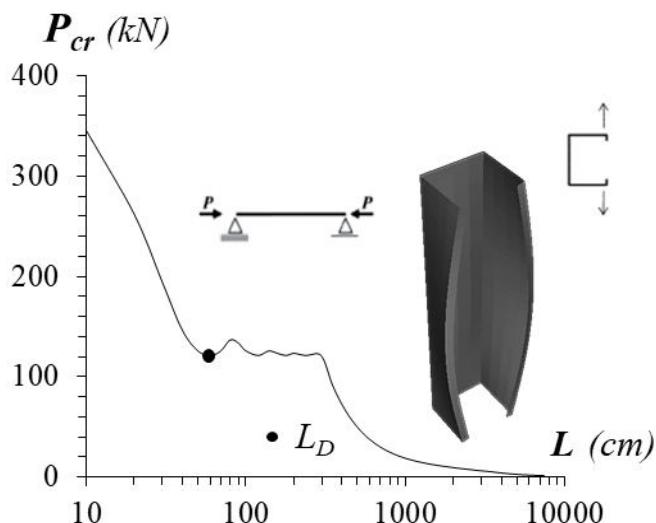
Fonte: Elaborado pelo autor

Sobre os resultados apresentados na Tabelas 2 as seguintes observações podem ser apontadas:

- (i) O valor da participação modal do modo de deformação 5, varia de 96,33% a 97,73%. Como pretendido, todas as colunas selecionadas apresentam flambagem crítica no modo distorcional.
- (ii) Em comparação com as colunas iniciais; 1, 4, 7 e 10, observa-se que as colunas secundárias apresentam carga crítica distorcional inversamente proporcional ao aumento de b_w .
- (iii) Os maiores valores de carga crítica são encontrados no grupo G3, sendo o valor máximo correspondente à coluna 7, que apresenta relação b_w / b_f igual a 1 e maior valor de espessura e comprimento do enrijecedor em relação às colunas dos grupos G1 e G2.

A Figura 12 ilustra um produto final obtido após a realização da análise de flambagem: a curvas P_{cr} vs L (L em escala logarítmica) para uma das colunas analisadas. Os valores do comprimento crítico de flambagem distorcional L_D está indicado na figura, que também inclui o modo de deformação crítico correspondente, distorcional.

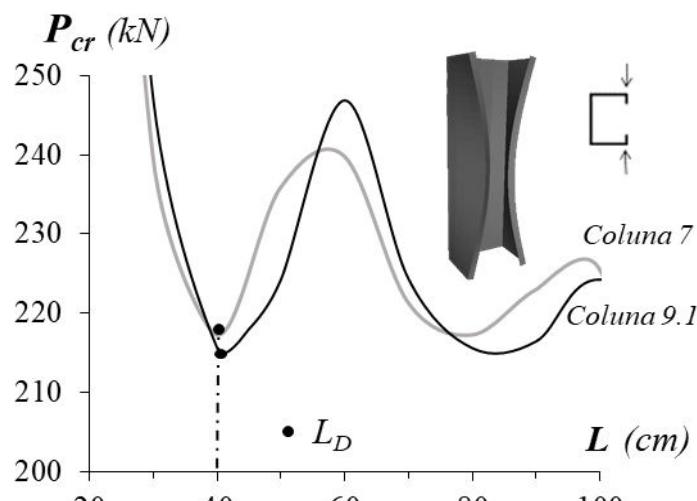
Figura 12 – Curva P_{cr} vs. L da Coluna 12



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 12 ilustra a comparação das curvas P_{cr} vs L para as colunas 7 e 9.1 analisadas. As duas colunas apresentam condição de apoio pinadas com carga de compressão centrada.

Figura 13 – Curva P_{cr} vs. L das Colunas 7 e 9.1



Fonte: Elaborado pelo autor

As curvas apresentadas na Figura 13 evidenciam a redução da carga crítica com o aumento de b_w , para o modo distorcional. Nota-se que as arestas ligadas aos enrijecedores das colunas 7 e 9.1, deslocam-se em direção ao centro, sendo este comportamento contrário ao apresentado pela coluna 12. Vale ressaltar que o modo de deformação 5 inclui o deslocamento de tais arestas, para dentro ou para fora da seção transversal.

4.2 Dimensionamento

De posse dos resultados das cargas críticas de flambagem distorcional, pode-se obter a carga última (P_u) das colunas em estudo para $f_y = 250$ MPa. A carga última é obtida através da aplicação do MRD presente no Apêndice C da NBR 14762, os resultados estão apresentados na Tabela 3 onde P_y representa o valor característico da força axial de compressão resistente, associado a flambagem distorcional ($P_{n,D}$) e λ_D representa a esbeltez distorcional.

Analizando a Tabela 3, nota-se que a carga última (P_u) é diretamente proporcional ao aumento de b_w , tal resultado era esperado, considerando-se que o dimensionamento das colunas é influenciado diretamente pela área da seção transversal, sendo assim, apesar da diminuição da carga crítica distorcional, as colunas em estudo apresentaram ganho de resistência última considerando-se aço com $f_y = 250$ MPa.

Tabela 3 – Carga última para perfil U enrijecido com falha no modo distorcional.

Coluna	L_D (cm)	$P_{cr,D}$ (kN)	A (cm ²)	f_y (MPa)	P_y (kN)	λ_D (kN)	P_u (kN)
G1	1	165,9	4	250	100,0	0,78	89,6
	2	165,8	4,2	250	105,0	0,80	92,7
	3	165,7	4,4	250	110,0	0,81	95,7
	3.1	159,9	4,8	250	120,0	0,87	100,2
G2	4	128,9	4,9	250	122,5	0,97	93,7
	5	128,4	5,1	250	127,5	1,00	95,9
	6	127,9	5,3	250	132,5	1,02	98,0
	6.1	126,1	5,7	250	142,5	1,06	101,7
G3	7	217,3	7,1	250	177,5	0,90	143,8
	8	217,1	7,6	250	190,0	0,94	150,1
	9	216,8	7,8	250	195,0	0,95	152,4
	9.1	215,6	8,4	250	210,0	0,99	159,2
G4	10	121	10,8	250	270,0	1,49	141,0
	11	120,8	11,1	250	277,5	1,52	142,9
	12	120,7	11,3	250	282,5	1,53	144,1
	12.1	120,7	11,8	250	295,0	1,56	147,3

Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho estudou-se o comportamento estrutural de colunas constituídas por perfis metálicos com seção U enrijecido de paredes finas. Este estudo teve por objetivo central aprofundar o conhecimento sobre a estabilidade de seções tipo U enrijecido, observando a influência do aumento de b_w no comportamento de flambagem e resistência última.

Pode-se concluir que; (i) como pretendido, todas as colunas selecionadas apresentam flambagem crítica no modo distorcional, representada pelo modo 6, onde a deformação das arestas ligadas aos enrijecedores das colunas, deslocam-se em direção ao centro ou para fora da seção transversal; (ii) em comparação com as colunas iniciais; 1, 4, 7 e 10, observa-se que as colunas secundárias apresentam carga crítica distorcional inversamente proporcional ao aumento de b_w , sendo muito sutil a diferença; (iii) os maiores valores de carga crítica são encontrados no grupo G3, sendo o valor máximo correspondente à coluna 7, que apresenta relação b_w/b_f igual a 1 e maior valor

de espessura e comprimento do enrijecedor em relação às colunas dos grupos G1 e G2, tal comportamento evidencia a maior rigidez associada a colunas que tendem para o formato quadrado; (iv) apesar da diminuição da carga crítica de flambagem distorcional com o aumento de b_w , nota-se que a carga última das colunas, aumenta dentro de cada um dos grupos (G1, G2, G3 e G4) à medida em que b_w cresce, tal fato se deve ao aumento da área das seções secundárias em relação à coluna inicial, conseguir superar a redução da carga crítica.

6 REFERÊNCIAS

ABNT, 2016. Norma Brasileira para Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio (NBR 14762:2016), Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.

BEBIANO R., PINA P., SILVESTRE N., CAMOTIM D., 2010a. GBTul 1.0 – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members, DECivil/IST, Technical University of Lisbon. (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>).

BEBIANO R., PINA P., SILVESTRE N., CAMOTIM D., 2010b. Manual user.GBTul 1.0 – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members, DECivil/IST, Technical University of Lisbon. (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>).

CHODRAUI, G.: MALITE, M. Flambagem por distorção da seção transversal em perfis de aço formados a frio submetidos a compressão centrada e flexão. **Caderno de Engenharia de Estruturas**, v. 9, N. 37, P. 27-47, 2007.

CSSBI – CandianSheet Steel BuildingInstitute. Lightweight Steel Framing, Galeria de fotos. <http://www.cssbi.ca/products/commercial/lightweight-steel-framing/photo-gallery>. Acessado em 02 de outubro, 2016.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem**. São Paulo: Zigarate Editora, 1997.

FREITAS, Inês Isabel Cunha dos Santos Gaspar. **Formulação Fisicamente não – Linear da Teoria Generalizada de Vigas**. 2001. Tese – FCT, Faculdade de Ciencias e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2011.

GARCIA, Rafaela Alves Sanches. **Behaviour and DSM desing of cold-formed steel web/flange stiffened lipped channel columns experiencing distortional failure**. 2015. Tese – COOPE UFRJ, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

HANCOCK, G.J. “Cold-formed steel structures”, **Journal of Constructional Steel Research**, v.59, p.473-487, 2003.

IYENGAR, N.G.R., 1986. Structural stability of columns and plates, East-West Press PVT, New Delhi.

PINHEIRO, Antônio Carlos da Fonseca Bragança. **Estruturas Metálicas: cálculos, detalhamentos, exercícios e projetos**. São Paulo: Blucher, 2005.

REIS, A., CAMOTIM, D., 2001. Estabilidade e dimensionamento de estruturas. McGraw-Hill.

SALLES, G.: CARDOSO, D.: BATISTA, E: GONÇALVES, P.: Formulação do Modo de Flambagem Distorcional em Perfis de Aço Formados a Frio de Seção 'U Enrijecido' sob Compressão Axial. **Construmetal 2016 – Congresso Latino-americano da Construção Metálica**, 20 a 22 de setembro de 20,16, São Paulo, SP, Brasil.

SIKELI – Portfolio, Perfiladeiras estruturais. www.zikeli.com.br/portfolio/perfiladeira-estruturais/. Acessado em 22 de outubro, 2016.

SILVA, Edson Lubas; SILVA, ValderPignatta. **Dimensionamento de Perfis Formados a Frio Conforme NBR 14762 e NBR 6355**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2008.

SINOS METAL – Serviços. <http://www.sinosmetal.com.br/servi%C3%A7os.php>. Acessado em 22 de outubro, 2016.

VERGANA, Sylvia Constant. **Projeto e Relatórios de Pesquisa em Administração**. São Paulo: Atlas S.A., 2007.