



FACULDADE DE CIÊNCIAS GERENCIAIS DE MANHUAÇU

**ESTABILIDADE ESTRUTURAL PARA PERFIL METÁLICO DE PAREDES FINAS
TIPO U ENRIJECIDO**

Bianca do Nascimento Silva

Manhuaçu – MG

2017



BIANCA DO NASCIMENTO SILVA

**ESTABILIDADE ESTRUTURAL PARA PERFIL METÁLICO DE PAREDES FINAS
TIPO U ENRIJECIDO**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado no curso de Engenharia Civil da faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas Metálicas

Orientador (a): Tauana de Oliveira Batista

Manhuaçu – MG

2017



BIANCA DO NASCIMENTO SILVA

**ESTABILIDADE ESTRUTURAL PARA PERFIL METÁLICO DE PAREDES FINAS
TIPO U ENRIJECIDO**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado no curso de Engenharia Civil da faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas Metálicas

Orientador (a): Tauana de Oliveira Batista

Banca Examinadora

Data de Aprovação:

Mestre Tauana de Oliveira Batista; FACIG

Mestre José Francisco Anunciação Pinto; FACIG

Especialista Leandro José Lima; FACIG

Manhuaçu – MG

2017



AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre me deu a força necessária para seguir em frente, sem ele não teria chegado até aqui.

Aos meus pais Julio e Silvana, que sempre me apoiaram e forneceram toda a base que permitiu alcançar mais este objetivo, principalmente nos momentos em que eu não acreditava que seria possível conseguir, evitando que os muitos obstáculos me desestimulassem ou fizessem desistir, sendo um exemplo de dedicação e perseverança.

A minha orientadora, professora Tauana de Oliveira Batista, pela dedicação, paciência, amizade, incentivo e experiências transmitidas durante a elaboração de cada etapa deste trabalho.

As minhas amigas Chayene Gomes e Natalia Januário, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando, me ajudando nos momentos mais difíceis, e tornando essa caminhada mais suave.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.



RESUMO

As estruturas metálicas vêm alcançando lugar de destaque no mercado da construção civil, por suas diversas vantagens, comparadas com outros materiais construtivos como o concreto armado, como exemplo pode-se citar: elevada resistência do aço, redução de desperdício nas construções possibilitando a reutilização dos perfis, alívio das fundações, facilidade de transporte e manuseio devido seu peso reduzido, rapidez de execução de obra, visto a simplicidade na instalação desses elementos e economia de transporte e manuseio. Os perfis metálicos formados a frio (PFF) de paredes finas ganham cada vez mais espaço no setor da construção civil. O presente trabalho trata da flambagem distorcional em perfis formados a frio de paredes finas de seção U enrijecido. Realizou-se um estudo numérico do comportamento estrutural de colunas de aço bi-apoiadas sujeitas a compressão axial, sob o modo de deformação distorcional, no qual a análise numérica de flambagem, foram obtidas através do programa GBTul 2.0 ao variar as dimensões b_w em relação a b_f . Verificou-se que (i) nas seções onde $b_w < b_f$ apresenta rotação da mesa enrijecida, com pequenos deslocamentos da junção alma/mesa por flexão, (ii) nas seções onde $b_f < b_w$, é possível observar uma maior flexão no plano de simetria (iii) a coluna que apresenta maior carga crítica é a que apresenta relação b_w/b_f igual a 1, apresentando maior rigidez a coluna.

Palavras-Chave: flambagem, flambagem distorcional, perfil formado a frio, U enrijecido.



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Estabilidade e Equilíbrio	9
FIGURA 2 – Coluna de Euler e configurações de equilíbrio, geometria e carga aplicada	9
FIGURA 3 – Processos de Perfis formados a Frio (a) Perfiladeira.....	10
FIGURA 4 – Processo de fabricação de perfil U enrijecido por Perfilação.....	11
FIGURA 5 – Processos de fabricação dos PFFs:	12
FIGURA 6 – Principais geometrias de PFF.....	13
FIGURA 7 – Exemplos da utilização de PFF : edificações de (a) grande porte	13
FIGURA 8 – Deformações de Flambagem.....	14
FIGURA 9 – Exemplo de curva de assinatura para perfil U enrijecido	15
FIGURA 10 – Flambagem distorcional da seção transversal tipo U enrijecido	15
FIGURA 11 – Deslocamento no modo distorcional	16
FIGURA 12 – Ensaio de coluna bi-engastada sobre o efeito da flambagem distorcional	16
FIGURA 13 – Perfil Tipo U enrijecido	17
FIGURA 14 – Modos de deformação associados a flambagem distorcional via GBTul	18
FIGURA 15 – Curva P_{cr} vs. L da Coluna 10, com configuração deformada.....	21
FIGURA 16 – Curva P_{cr} vs. L da Coluna 11, com configuração deformada.....	21
FIGURA 17 – Curva P_{cr} vs. L da Coluna 12, com configuração deformada.....	22



LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Dados geométricos dos perfis utilizados para análise	18
TABELA 2 – Resultado de flambagem distorcional.....	20



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. DESENVOLVIMENTO	8
2.1. Referencial teórico	8
2.1.1. Estabilidade e Equilíbrio	8
2.1.2. Perfil formado a frio – PFF	10
2.1.3. Flambagem	13
2.1.4. Flambagem Distorcional.....	15
3. METODOLOGIA.....	16
4. ANÁLISE DE DADOS.....	17
4.1. ANÁLISE DE FLAMBAGEM VIA GBTUL	18
5. CONCLUSÃO.....	22
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	23

1. INTRODUÇÃO

As estruturas metálicas vêm alcançando lugar de destaque no mercado da construção civil, por suas diversas vantagens, comparadas com outros materiais construtivos como o concreto armado, como exemplo pode-se citar: elevada resistência do aço, redução de desperdício nas construções possibilitando a reutilização dos perfis, alívio das fundações, facilidade de transporte e manuseio devido seu peso reduzido, rapidez de execução de obra, visto a simplicidade na instalação desses elementos e economia de transporte e manuseio (BATISTA, 2016).

Os perfis metálicos formados a frio (PFF) de paredes finas ganham cada vez mais espaço no setor da construção civil, devido principalmente ao grande e rápido avanço tecnológico que se tem ocorrido, tornando-se uma solução técnica e viável, sendo empregados como estruturas de galpões, mezaninos, sistemas de cobertura inclusive em prédios de médio e pequeno porte, entre outros. Por serem perfis com alta relação largura/espessura (elementos esbeltos), ficam suscetíveis a fenômeno de flambagem (local, global e distorcional) que podem ser determinantes no dimensionamento estrutural, deste modo para minimizar tal efeito é muito importante o estudo do comportamento dessas estruturas (GARCIA, 2015).

O presente trabalho tem como objetivo um estudo de estabilidade dos perfis de aço de parede fina seção tipo U enrijecido. Será realizada uma análise do comportamento estrutural de colunas de aço com seção transversal tipo U enrijecido sujeitas à compressão axial o que apresenta e discute os resultados das análises de flambagem distorcional, a partir desses resultados pretende-se verificar a influência das dimensões b_w em relação a b_f na resistência final do perfil, dando continuidade ao trabalho de Nunes 2016. O processo envolverá análises de flambagem utilizando o programa (GBTul) 2.0. (BEBIANO *et.al*, 2010a, b) que se baseia na “*Generalised Beam Theory*”.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Referencial teórico

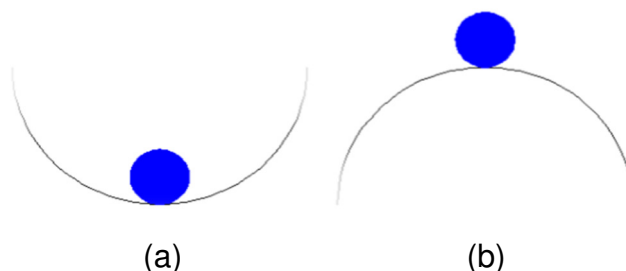
2.1.1. Estabilidade e Equilíbrio

Além das condições de segurança relacionadas à resistência e deformação, os projetos estruturais devem considerar os aspectos de estabilidade (SILVA, 2017).

A estabilidade estrutural está diretamente ligada ao conceito de equilíbrio de uma estrutura, na medida em que se é possível avaliar e efetuar classificações quanto as suas condições de equilíbrio. Assim, admita-se que uma estrutura, submetida a um sistema de cargas exteriores, exibe uma condição de equilíbrio caracterizada pelos valores dos deslocamentos de seus pontos. A estabilidade desta condição é avaliada através do comportamento estrutural após sofrer uma ligeira perturbação produzida pela aplicação de uma carga externa (força ou deslocamento) (BATISTA, 2016).

Sendo assim, o equilíbrio poderá ser avaliado como estável retornando suas condições originais ou “instável”, não retornando suas condições originais, após o fim de uma perturbação (REIS E CAMOTIM, 2011). Segundo Reis e Camotim (2011) a estabilidade do equilíbrio, está relacionada com um conceito fundamental da Mecânica dos Corpos Rígidos, desta forma o conceito referido poder ser compreendido, através do problema de uma esfera rígida, submetida a ação do seu peso próprio e em repouso sobre (i) uma superfície côncava equilíbrio estável, Figura 1 (a), (ii) uma superfície convexa (equilíbrio instável) Figura 1 (b).

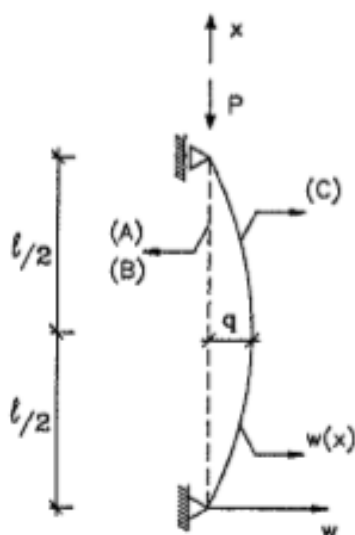
FIGURA 1 – Estabilidade e Equilíbrio: (a) Equilíbrio Estável (b) Equilíbrio Instável



Fonte: Fereguetti, 2016.

Para colunas, o conceito de estabilidade é exemplificado com o clássico problema da *coluna de Euler*. As premissas adotadas para essa teoria são: (i) uma coluna elástica, (ii) perfeitamente alinhada (sem deformações prévias), (iii) de comprimento L , (iv) com as extremidades simplesmente apoiadas e (v) submetida a uma carga axial de compressão (P) (FERNANDES, 2017; BATISTA, 2016).

FIGURA 2 – Coluna de Euler e configurações de equilíbrio, geometria e carga aplicada



Fonte: Reis e Camotim, 2011.

As regiões em que $q = 0$ e $q \neq 0$ são denominadas como "trajetória fundamental" e "trajetória de pós-flambagem". O ponto de interseção das duas trajetórias é designado como carga crítica de *Euler* (P_E), onde o valor correspondente a essa carga é definido pela equação 1.0, onde EI representa a rigidez à flexão da seção transversal da coluna (BATISTA, 2016; FERNANDES, 2017).

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

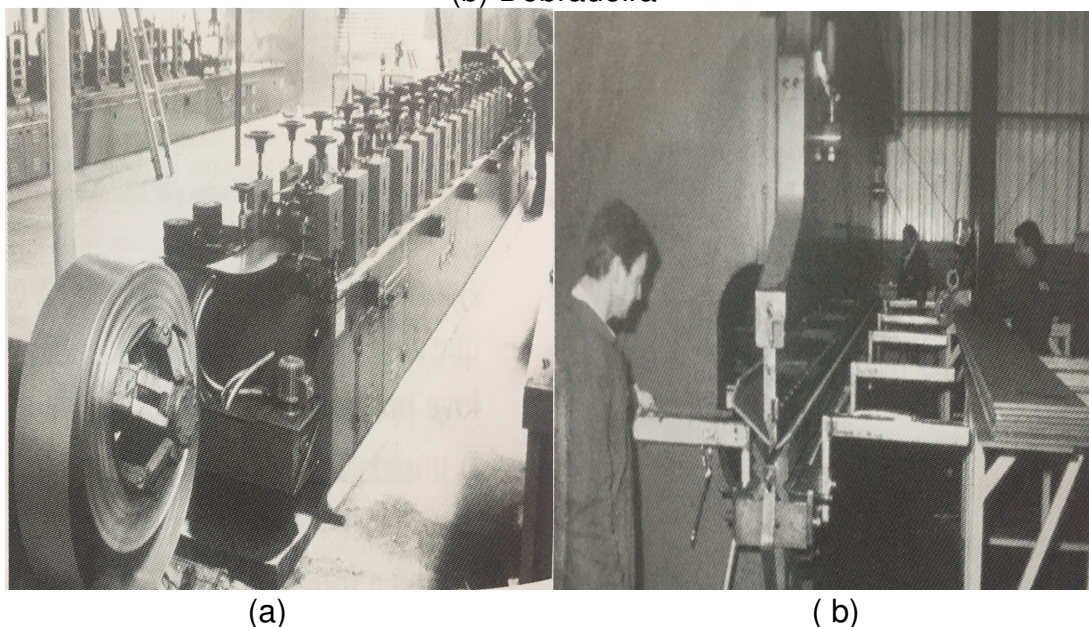
(Eq. 1.0)

2.1.2. Perfil formado a frio – PFF

Atualmente a constante busca de meios construtivos que atendam simultaneamente soluções econômicas e estéticas, vem impulsionando o aumento da utilização dos perfis de aço formado a frio (PFF) na indústria da construção civil, devido ao baixo peso dos componentes estruturais e sua elevada resistência, somando assim a redução do tempo da construção e aumento da produtividade (CRUZ, 2015; GARCIA, 2015).

Os perfis formados a frio são obtidos através de dobragem à temperatura ambiente, denominadas de dobragem a frio, de chapa finas de aço. Tal processo pode ser obtidos através de duas maneiras, (a) por meio de perfiladeira ou, (b) através de prensas dobradeiras. A NBR 6355 padroniza o dimensionamento de perfis metálicos e a NBR 14762 padroniza o dimensionamento de estruturas constituídas por perfil formado a frio (CRUZ, 2015; DIAS, 1997).

FIGURA 3 – Processos de Perfis formados a Frio (a) Perfiladeira
(b) Dobradeira



Fonte: Dias, 1997.

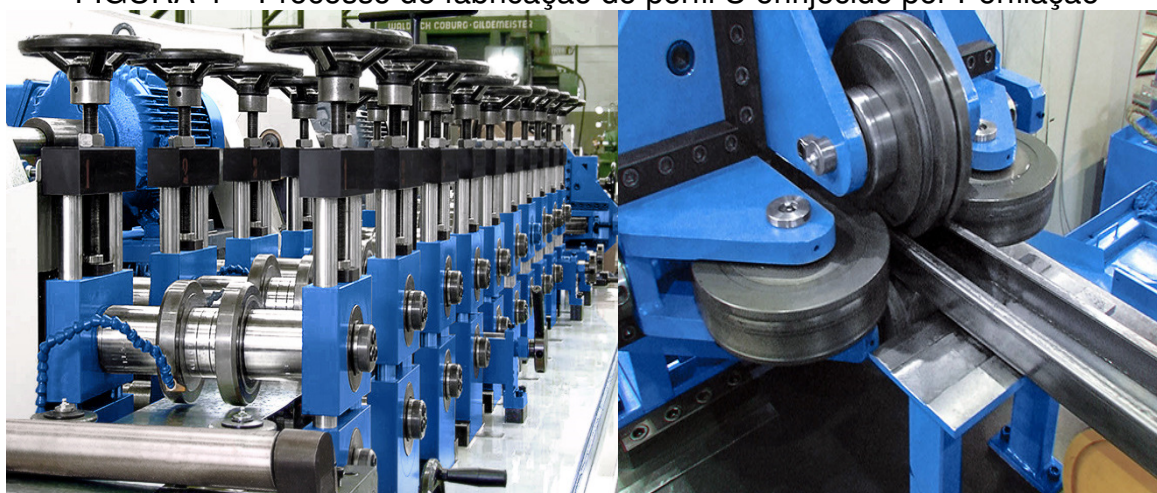
QUADRO 1 – Comparativo entre os métodos de fabricação

PRENSA-DOBRADEIRA	PERFILADEIRA
Muita flexibilidade para produzir diversas formas de perfis	Pouca flexibilidade para produzir diversas formas de perfis
Com poucas ferramentas se produz uma série grande de perfis	Cada tipo de perfil necessita de um trem de perfilação
Baixo custo de equipamento	Alto custo de equipamento
Regulagem simples do equipamento	Regulagem do equipamento requer cuidados
Tensões residuais menos distribuídas no Contorno da seção (mais concentradas nos cantos dos perfis)	Tensões residuais mais distribuídas ao longo da seção (distribuição mais suave nos cantos)
Perfis curtos (máx. 6m)	Perfis com comprimento ilimitado
Razoável mão-de-obra envolvida	Pouca mão-de-obra envolvida

Fonte: Almeida, 2007.

O processo de fabricação através de perfilação, constitui-se no deslocamento longitudinal da chapa fina de aço sobre os roletes de uma linha de perfilação, obtendo um perfil com seção desejada como ilustra a Figura 4 (SILVA, 2017; CRUZ 2015).

FIGURA 4 – Processo de fabricação de perfil U enrijecido por Perfilação



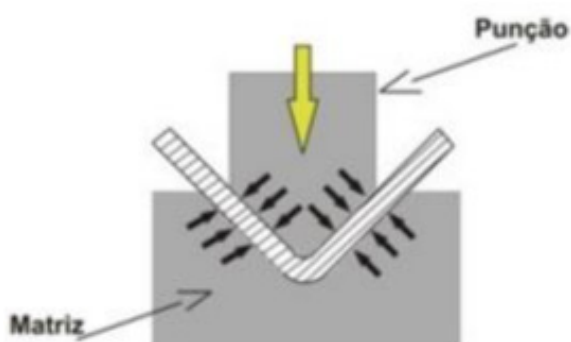
(a)

(b)

Fonte: Zikeli, 2017.

No processo de dobragem utiliza-se uma prensa dobradeira, onde a chapa de aço é prensada por sua matriz, segundo o número de dobras necessárias para a obter a geometria desejada conforme apresentada na Figura 5 (SILVA, 2015).

FIGURA 5 – Processos de fabricação dos PFFs: (a) prensa dobradeira e respectivas representações esquemáticas dos processos de fabricação (b) processo de dobramento



(a)

Fonte: Silva, 2017.



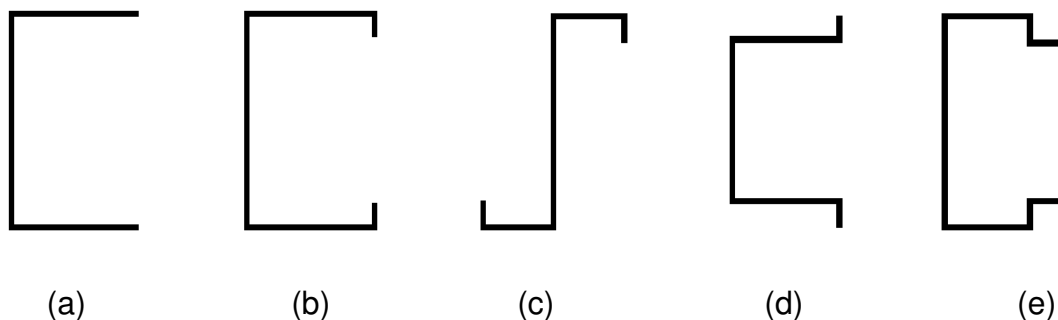
(b)

Fonte: STAMPCOM, 2017.

Enquanto as dobradeiras trabalham com comprimento de 3.000 a 6000 mm, com capacidade de dobrar chapas até 12,5 mm de espessura, as perfiladeiras podem produzir perfis de qualquer comprimento, estando limitadas a perfis mais leves, por trabalhar com chapas mais finas. Em geral, esse tipo de equipamento opera com espessura máxima de 3 mm e com dimensões máximas dos perfis de 50 x 150 x 50 mm, para perfis enrijecidos (DIAS, 1997, p.92).

Os perfis de aço formados a frio, propiciam grande versatilidade das formas geométricas das seções transversais, alcançando lugar de destaque entre as estruturas metálicas. As geometrias de PFF mais comuns estão representadas na Figura 6 (GARCIA, 2015).

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.

Os perfis de aço formados a frio de paredes Finas, são formados por elementos de aço que trabalham em conjunto com o objetivo de suportar aos esforços solicitantes. As vantagens dos elementos estruturais em PFF são inúmeras, comparadas com outros sistemas construtivos podendo se destacar: (i) elevada relação resistência-peso; (ii) facilidade na fabricação, devido à grande variabilidade de formas geométricas diversificadas; (iii) menor tempo de execução (iv) facilidade de transporte e manuseio. Essas vantagens resultam em um sistema estrutural eficiente e competitivo (FERNANDES, 2017; FEREGUETTI, 2016).

FIGURA 7 – Exemplos da utilização de PFF : edificações de (a) grande porte (b) pequeno porte



Fonte: CSSBI, 2017.

2.1.3. Flambagem

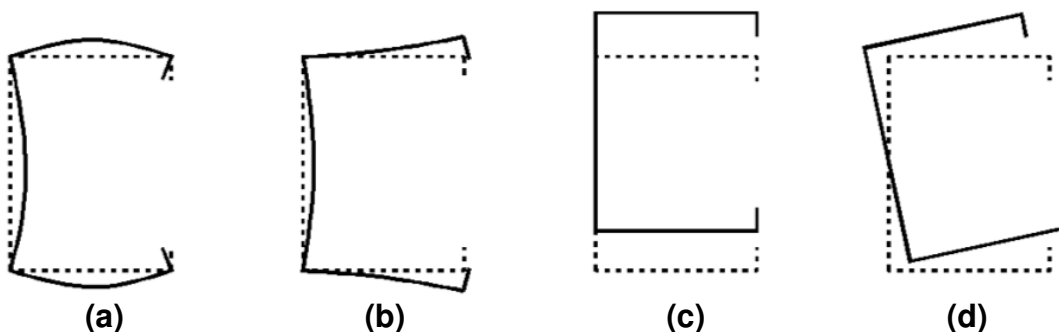
Um perfil formado a frio de Paredes Finas pode entrar em colapso, alcançando um dos seguintes estados limites: escoamento, flambagem global, flambagem local ou flambagem por distorção (ALMEIDA, 2007).

Flambagem é a perda da forma original de um membro como resultado da deformação elástica ou inelástica (ZIEMIAN, 2010).

Perfis de Paredes Finas por serem elementos esbeltos, com elevada relação largura/espessura estão muito suscetíveis a fenômenos de flambagem. Tal fenômeno ocorre quando um elemento é submetido a um carregamento maior do que a sua carga crítica, modificando sua forma e resistência original (SILVA, 2017; FERNANDES, 2017).

Esses perfis quando, sujeitos a esforços de compressão axial ou flexão apresentam três tipos de flambagem: (i) flambagem local (envolvendo somente a flexão de placa, não apresentando deformações transversais nas arestas), (ii) flambagem distorcional envolve a mudança na forma transversal excluindo flambagem local e (iii) flambagem global (flambagem por flexão, torção ou flexo-torção para peças comprimidas e flambagem lateral com torção para peças sujeitas à flexão) (SILVA, 2017; FERNANDES, 2017; BATISTA, 2016).

FIGURA 8 – Deformações de Flambagem (a) local (b) distorcional (c) global e (d) global



Fonte: Garcia, 2015.

Segundo Koike (2011) existe três métodos existem reconhecidos para executar o cálculo da carga crítica de flambagem, sendo eles: o Métodos dos Elementos Finitos (MEF), o Método das Faixas Finitas (MFF) e *Generalised Beam Theory* (GBT). Esses procedimentos podem ser considerados eficientes e amplamente empregados como método de determinar as cargas críticas, onde cada método numérico tem suas limitações (KOIKE, 2011).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é o método numérico mais utilizado, podendo ser aplicado a qualquer tipo de problema estrutural, é aplicável a qualquer carregamento e qualquer condição de contorno. Sua análise gera um grande número de possíveis modos de flambagem os quais o MEF não consegue distinguir os modos calculados. Já o Método das Faixas Finitas (MFF) tenta solucionar o problema de identificação do Método dos elementos Finitos (MEF) fazendo a definição automática da carga crítica de flambagem como uma função do comprimento de flambagem (KOKIE, 2011).

O método das Faixas Finitas apresenta uma programação mais simplificada possibilitando meios de técnicas matriciais de uso corrente de suas análises, sendo limitado a elementos de paredes finas com apoios simples nos extremos, (simplesmente apoiados) na flexão global e na flexão local das placas e com empenamento livre. Sendo que o MFF exige uma menor quantidade de dados de entrada diminuindo a possibilidade de erros, ao contrário da MEF, onde o número de dados de entrada é, via de regra, muito grande (KOIKE, 2011).

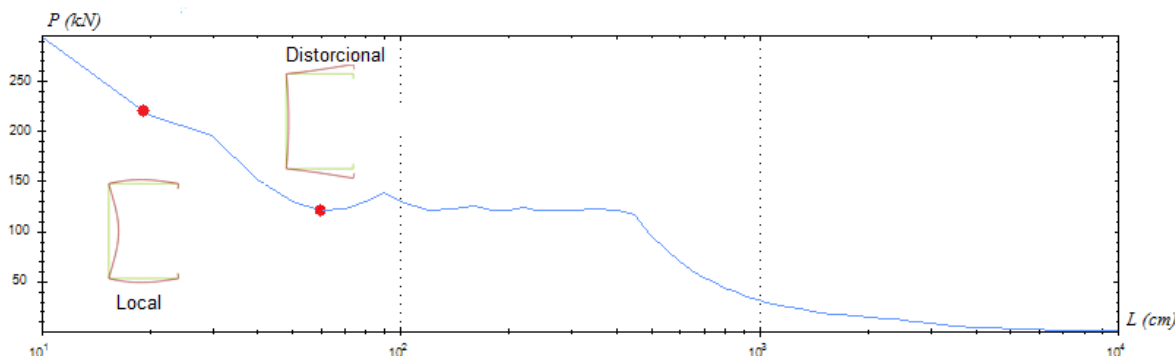
Através das características únicas de análise modal e clareza da resposta estrutural, a GBT tem motivado a atenção de vários pesquisadores, remetendo ao desenvolvimento de novas formulações e aplicações em análises de barras com seções transversais de parede fina. (DÔRES, 2014).

O programa GBTul (BEBIANO *et al.* 2008, 2010ab) é uma ferramenta muito eficaz para realizar análises de flambagem. Este programa gratuito exige as características mecânicas e as dimensões da seção transversal do membro como entrada e fornece entre outros resultados, (i) os modos de deformação no plano da

seção transversal, (ii) curva de P_{cr} vs L e (iii) a participação de cada um dos modos de flambagem (BATISTA, 2015; GARCIA, 2015).

Uma de suas vantagens é a análise dos modos de flambagem por meio do auxílio da curva de P_{cr} vs L que relaciona o comprimento do perfil e sua carga crítica, como mostra a Figura 9 (BATISTA, 2015; GARCIA, 2015).

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

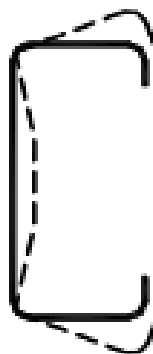


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.4. Flambagem Distorcional

Para perfis tipo U enrijecido a flambagem distorcional é verificada pela rotação de corpo rígido do conjunto formado pela mesa comprimida e seu enrijecedor, em torno do canto dobrado alma/mesa, com flexão da alma e deslocamento dos cantos dobrados das chapas (arestas) (SALLES, 2016).

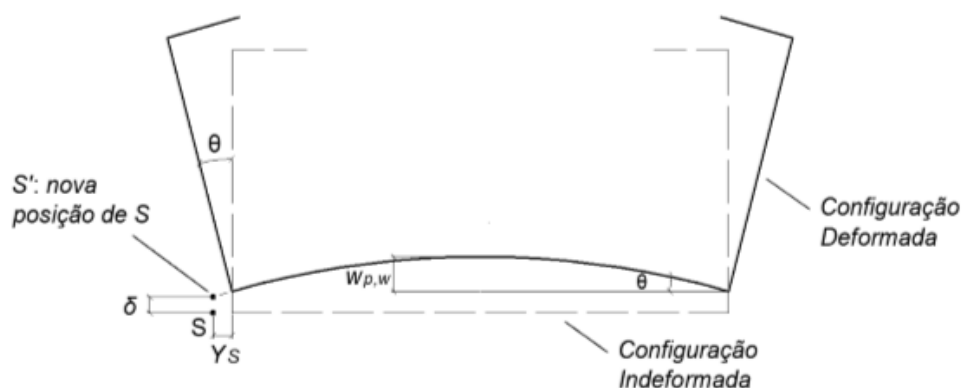
FIGURA 10 – Flambagem distorcional da seção transversal tipo U enrijecido



Fonte: Chodraui, 2003.

Atribui-se que o modo de flambagem distorcional, seja a combinação de três funções de deslocamento, como demonstra a Figura 11: (i) rotação do conjunto mesa-enrijecedor em torno do ponto S; (ii) flexão de placa da alma e (iii) flexão da coluna em torno do eixo centroidal Y (menor inércia), expressa por δ (SALLES, 2016). A Figura 12 ilustra o ensaio laboratorial de uma coluna tipo U enrijecido, com modo de flambagem distorcional com duas semi-ondas.

FIGURA 11 – Deslocamento no modo distorcional



Fonte: Salles, 2017.

FIGURA 12 – Ensaio de coluna bi-engastada sobre o efeito da flambagem distorcional



Fonte: Yang e Hancock, 2004.

3. METODOLOGIA

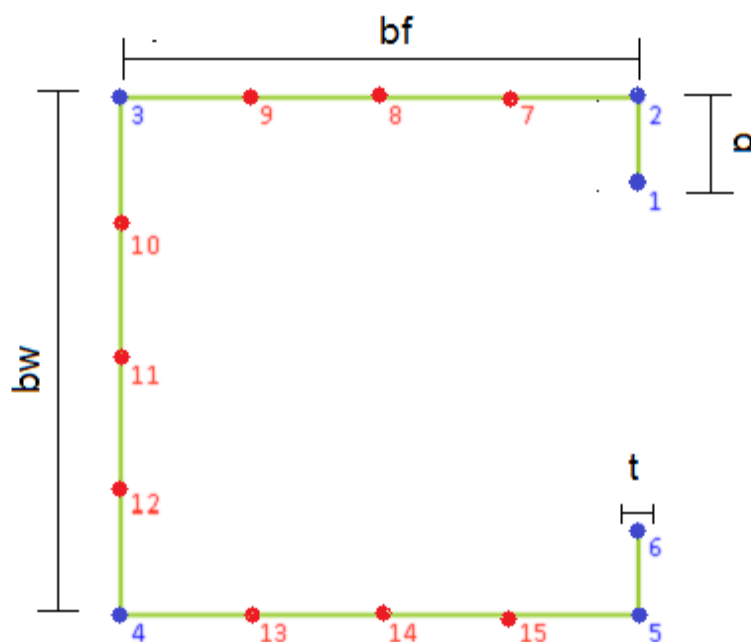
No presente trabalho será realizada uma análise de colunas metálicas bi-apoiadas com seção transversal tipo U enrijecido, sujeitas a compressão axial, dando continuidade ao trabalho de Nunes (2016), com objetivo de apresentar e discutir os resultados das análises numéricas com modo de flambagem distorcional, ao alternar as dimensões b_w em relação a b_f . Para análise numérica de flambagem emprega-se o programa GBTul 2.0. (BEBIANO et.al 2010a, b) (NUNES, 2016; BATISTA, 2016).

Para a verificação da análise de flambagem através do programa GBTul, emprega-se $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ e 20500 KN/cm^2 (módulo de Elasticidade), $\nu = 0.3$ (Coeficiente de Poisson) e condição de apoio de extremidade simplesmente apoiada (deslocamentos e rotações globais/locais e empenamento livres), onde as colunas selecionadas devem apresentar modo de flambagem “puramente” distorcional.

4. ANÁLISE DE DADOS

A primeira etapa deste trabalho compreende em selecionar cautelosamente as dimensões do perfil. Os parâmetros geométricos da seção transversal são ilustrados na Figura 13, onde (i) altura (b_w), (ii) largura (b_f), (iii) enrijecedor (d) e (iv) espessura (t), ainda indica os nós naturais (1 ao 6 em azul) e intermediários (em vermelho) que foram empregados na discretização do modelo.

FIGURA 13 – Perfil Tipo U enrijecido



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado final da seleção dos 12 perfis encontra-se descrito na Tabela 1.0, envolvendo o processo que se divide na escolha da dimensão do perfil, variando o valor de b_w em relação a dimensão inicial, conservando o valor de b_f , d e t , dividindo as colunas em quatro grupos, identificados como G1, G2, G3 e G4, o processo adotado foi proposto por Nunes, (2016).

TABELA 1 – Dados geométricos dos perfis utilizados para análise

	Coluna	b_w	b_f	d	t	A	E	b_w/b_f
		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm ²)	(KN/cm ²)	
G1	1	6	6	1	0,2	4	21000	1
	2	12	6	1	0,2	5,2	21000	2
	3	18	6	1	0,2	6,4	21000	3
G2	4	7,5	7,5	1	0,2	4,9	21000	1
	5	15	7,5	1	0,2	6,4	21000	2
	6	22,5	7,5	1	0,2	7,9	21000	3
G3	7	8,5	8,5	1,06	0,265	7,32	20500	1
	8	17	8,5	1,06	0,265	9,57	20500	2
	9	25,5	8,5	1,06	0,265	11,82	20500	3
G4	10	10	14,29	1,06	0,265	10,8	20500	0,69979
	11	20	14,29	1,06	0,265	13,43	20500	1,39958
	12	30	14,29	1,06	0,265	16,08	20500	2,1

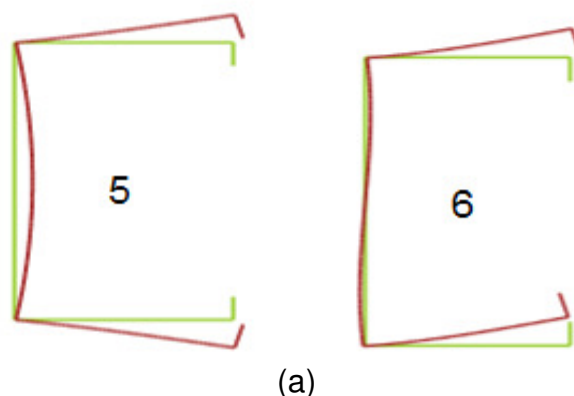
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1. ANÁLISE DE FLAMBAGEM VIA GBTUL

A análise de flambagem é realizada utilizando-se o programa GBTul (*BEBIANO et al. 2010ab*).

Para identificar o modo de deformação associado a flambagem distorcional, pode-se aplicar a seguinte definição, que o modo de instabilidade distorcional ocorre quando as arestas das placas que compõe a seção geométrica do perfil se deslocam sem ocorrer a flexão da chapa. Pode-se dizer que uma coluna está sob modo de flambagem “puramente” distorcional, quando os modos de deformação associado a flambagem distorcional exibem uma contribuição dominante em relação aos demais fenômenos de flambagem (*BEBIANO. et al. 2010a*) (*FEREGUETTI, 2016; NUNES, 2016*). A Figura 14 apresenta os modos de deformação obtidos através do GBTul para as seções tipo U enrijecido associados as flambagem distorcional para as colunas 2 e 10.

FIGURA 14 – Modos de deformação associados a flambagem distorcional via GBTul
(a) coluna 2 (b) coluna 10





(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise do modo de deformação distorcional da seção transversal, para as seções tipo U enrijecido para as colunas 2 e 10, apresentados nas Figuras 14 (a) - (b) pode-se retirar as seguintes observações:

- (i) Nas seções tipo U enrijecido existem somente dois modos de deformação distorcional, (modo 5) e (modo 6).
- (ii) A coluna 10 que tem relação $b_w < b_f$ apresenta rotação da mesa enrijecida, com pequenos deslocamentos da junção alma/mesa por flexão.
- (iii) Ao analisarmos as seções tipo U enrijecido para a coluna 2 onde $b_f < b_w$, é possível observar uma maior flexão no plano de simetria.

Para a realização da análise de flambagem no programa GBTul considera-se $E=21000 \text{ kN/cm}^2$ e 20500 kN/cm^2 (módulo de elasticidade), $\nu=0.3$ (coeficiente de Poisson) e condição de apoio de extremidade simplesmente apoiada (deslocamentos e rotações globais/locais e empenamento livres), os resultados das análises estão indicados na Tabela 2.0, que fornecem (i) o comprimento crítico associado a flambagem distorcional (L_D), (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 – Resultado de flambagem distorcional

	Coluna	L_D (cm)	$P_{cr,D}$ (kN)	$p5$ (%)	$p6$ (%)	p outros (%)
G1	1	30	165,5	97,47	0	2,53
	2	140	148,5	94,17	0	5,83
	3*	30*	83,6*	3,2*	0	$P7=96,6$
G2	4	40	128,9	97,73	0	2,26
	5	180	117,19	94,67	0	5,33
	6	350	77,69	51,76	0	48,24
G3	7	40	217,3	97,63	0	2,37
	8	40	203,05	93,13	0	6,83
	9	350	137,64	50,59	0	49,41
G4	10	60	121,04	96,97	0	3,03
	11	60	121,04	96,94	0	3,06
	12	60	111,23	90,02	0	9,98

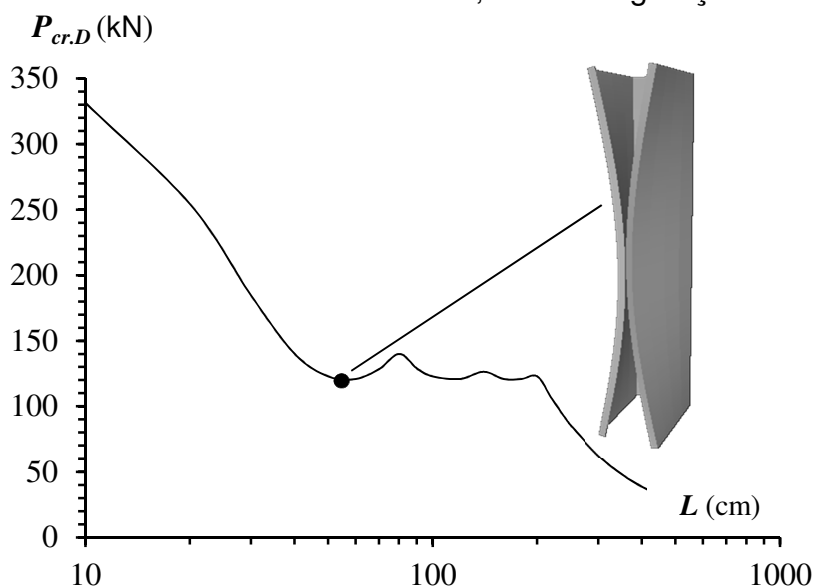
Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos resultados identificados na Tabela 2.0 as seguintes observações podem ser apontadas:

- (i) O valor da participação modal do modo de deformação 5, varia de 50,59% a 97,73%, onde a coluna 3 deve ser eliminada da análise por não apresentar flambagem crítica no modo distorcional.
- (ii) O modo de flambagem crítico da coluna 3 é dado por uma combinação entre o modo de flambagem local e distorcional.
- (iii) O maior valor de carga crítica é encontrado no grupo G3, sendo o valor correspondente à coluna 7, que apresenta relação b_w / b_f igual a 1 e maior valor de espessura e comprimento do enrijecedor quando comparada às colunas dos grupos G1 e G2.

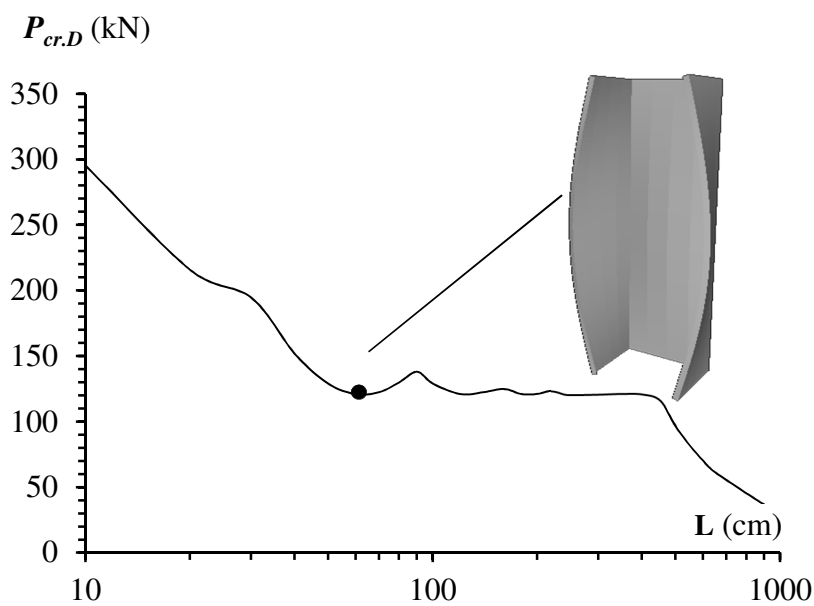
As curvas de P_{cr} vs. L (L em escala logarítmica) fornecem o modo crítico de flambagem, sendo obtidas por meio de análises via GBTul. As Figura 15, 16 e 17 ilustram o modo crítico de deformação distorcional do grupo G4 (coluna 10, 11 e 12).

FIGURA 15 – Curva P_{cr} vs. L da Coluna 10, com configuração deformada



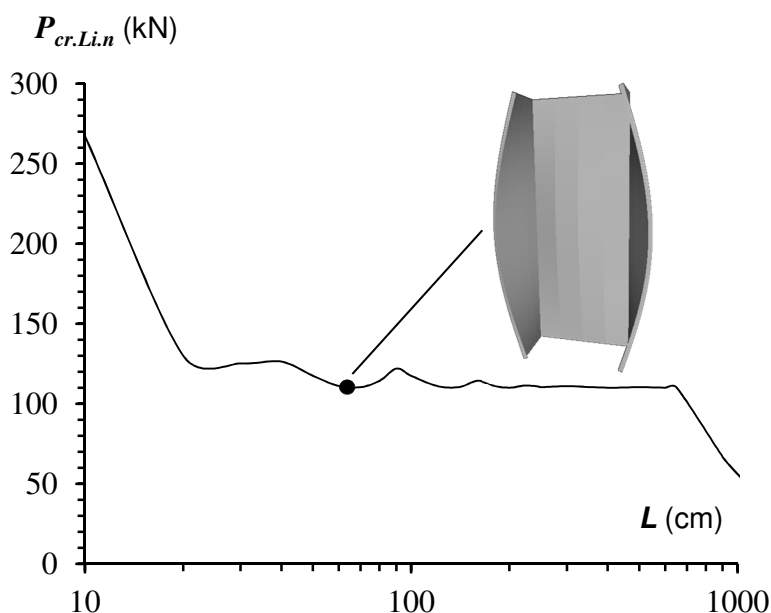
Fonte: Elaborado pelo autor.

FIGURA 16 – Curva P_{cr} vs. L da Coluna 11, com configuração deformada



Fonte: Elaborado pelo autor.

FIGURA 17 – Curva P_{cr} vs. L da Coluna 12, com configuração deformada



Fonte: Elaborado pelo autor.

A observação das Figuras 15, 16 e 17, permite extrair os seguintes comentários:

- (i) As colunas 10 e 11 apresentam comportamentos opostos, sendo assim é possível constatar que o modo de deformação $P5$ inclui o deslocamento de tais arestas, para dentro ou para fora da seção transversal. Essas colunas apresentam o mesmo valor da carga crítica, sendo o valor de b_w da coluna 11 o dobro da coluna 10.
- (ii) As curvas apresentadas na Figura 17 evidenciam a redução da carga crítica com aumento de b_w para o modo distorcional na coluna 12, quando o valor de b_w é triplicado em relação à coluna 10.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o estudo do comportamento estrutural das colunas constituídas por perfis metálicos com seção tipo U enrijecido de paredes finas, com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre a estabilidade de seções tipo U enrijecido, analisando a interferência do aumento de b_w no comportamento de flambagem no modo distorcional.

Pode-se concluir que:

- (i) Ao triplicar o valor de b_w da coluna 1, para obtenção da coluna 3, foi encontrado uma combinação do modo local e distorcional, representadas pelo modo 5 e 7.
- (ii) O maior valor de carga crítica é encontrado no grupo G3, sendo o valor 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.

- (iii) No grupo G4 as geometrias das colunas 10 e 11 são próximas de um quadrado, tendem a ter a carga crítica parecidas, no caso analisado obtiveram o mesmo valor de carga crítica. Quando o valor de b_w da coluna 10 é triplicado, gerando a coluna 12, o valor da carga crítica diminui, tornando-a uma seção retangular e aumentando sua esbeltez em relação às colunas 10 e 11.
- (iv) O valor da carga crítica no modo distorcional diminui com o aumento de b_w , nos grupos G2 e G3.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se realizar análises de flambagem em outros programas, como ANSYS e cálculo de carga última das colunas estudadas.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT 2001. **NBR 14762 Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT 2012. **NBR 6355 Perfis Estruturais de aço formando a frio – Padronização**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ALMEIDA, Saulo José de Castro. **Análise Numérica de Perfis de Aço Formados a Frio Comprimidos Considerando Imperfeições Geométricas Iniciais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

BATISTA, Tauana de Oliveira. **Estabilidade e resistência última de colunas metálicas com seção transversal poligonal regular de paredes finas via MEF**. 2016. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

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

CHODRAUI, Gustavo Monteiro de Barros. 2003. **Flambagem por distorção da seção transversal em perfis de aço formado a frio submetidos à compressão centrada e á flexão**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CRUZ, Renato Evangelista Luna. **Análise experimental e dimensionamento de colunas esbeltas pinadas em perfil cantoneira de abas iguais de aço formado a frio**. 2015. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CSSBI – Canadian Sheet Steel Building Institute. Lightweight Steel Framing, Galeria de fotos.< <http://www.ccssbi.ca/products/commercial/lightweight-steel-framing/photo-gallery>>. Acessado em 01 de setembro de 2017.

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

DIAS, Luís Andrade de Mattos. Perfis. In: Dias, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem**. São Paulo: Zigurate, 1997. p. 83-99.

DÔRES, Andréa Gonçalves Rodrigues das. **Análise de elementos estruturais com seção transversal de parede fina aberta ramificada utilizando a teoria generalizada de vigas**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

FREITAS, Inês Isabel Cunha dos Santos Gaspar. **Formulação fisicamente não – Linear da Teoria Generalizada de Vigas**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, 2011.

FEREQUETI, Pedro. **Dimensionamento via MRD de colunas de aço em PFF com enrijecedores intermediários sob falha distorcional**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

FERNANDES, Gabriela Ribeiro. **Validação numérico-experimental do colapso distorcional de colunas metálicas em perfil formado a frio**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

FRANÇOZO, Hélio Júnior. **Análise não linear de barras comprimidas de aço formadas a frio com seções enrijecidas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade estadual de Campinas, Campinas, 2016.

GARCIA, Rafaela Alves Sanches. **Behaviour and dsm design of cold-formed steel web/flange stiffened lipped channel columns experiencing distortional failure**. 2015. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) – COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

KOIKE, Pablo Enio. **Modelagem numérica da flambagem de elementos metálicos de seções abertas e paredes finas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

NUNES, Lucas Cesar. **Análise de Flambagem Distorcional e Resistência última de perfil metálico tipo U enrijecido**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – FACIG, Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, Manhuaçu, 2016.

REIS, António; CAMOTIM, Dinar. **Estabilidade e dimensionamento de estruturas**. Portugal: McGraw-Hill, 2001.

SALLES, Guilherme Cardoso. **Investigação analítica, numérica e experimental do modo de flambagem distorcional em perfis formados a frio**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SILVA, Ana Carolina Campilho da. **Dimensionamento à flambagem distorcional via MRD de colunas metálicas perfuradas em perfil rack**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

STAMPCOM – Serviços. <<http://www.stampcom.com.br/servicos.php?c=26&s=13>> acessado em 01 de setembro, 2017.

YANG D., HANCOCK G.J., 2004. "Compression tests of high strength steel channel columns with interaction between local and distortional buckling", **Journal of Structural Engineering**, v.130(12), pp.1954-1963

ZIKELI – Portfolio, Perfiladeiras estruturais. <<http://www.zikeli.com.br/portfolio/perfiladeira-estruturais/>>. Acessado em 01 de setembro, 2017.

ZIEMIAN, R.D., 2010. **Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures**, 6th Edition, John Wiley & Sons, New York.