



FACULDADE DE CIÊNCIAS GERENCIAIS DE MANHUAÇU

**UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA GBTUL PARA OBTENÇÃO DE CARGA
CRÍTICA DE FLAMBAGEM**

Débora do Carmo Maciel

Manhuaçu

2017



DÉBORA DO CARMO MACIEL

**UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA GBTUL PARA OBTENÇÃO DE CARGA
CRÍTICA DE FLAMBAGEM**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Superior de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas Metálicas

Orientador (a): Tauana de Oliveira Batista

Manhuaçu

2017



DÉBORA DO CARMO MACIEL

**UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA GBTUL PARA OBTENÇÃO DE CARGA
CRÍTICA DE FLAMBAGEM**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Superior de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas Metálicas

Orientador (a): Tauana de Oliveira Batista

Banca Examinadora

Mestre Tauana de Oliveira Batista; FACIG

Especialista Carlos Henrique de Carvalho Júnior; FACIG

Especialista Leandro José de Lima; FACIG

Data de Aprovação:

Manhuaçu

2017



AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu agradeço a Deus, que me deu força para passar por todos os obstáculos, cansaço, desânimo e desespero. Aos meus pais, José Maciel e Neuza Helena que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando, me incentivando.

Em especial a minha orientadora, Mestre Tauana de Oliveira Batista pela paciência, dedicação, amizade, atenção e suporte durante a elaboração de cada etapa deste trabalho. Aos professores que passaram durante esses cinco anos, transmitindo seus conhecimentos ao longo da convivência.

Aos colegas de classe pelas palavras de incentivo, conhecimento dividido e momentos de descontração, especialmente meu grupo de trabalho, Eduardo Willian, Jeferson de Oliveira e Yuri Henrique, que sempre se mostraram prestativos nos momentos mais complicados ao longo da caminhada.

A todos que amo, família e amigos, pela compreensão.



RESUMO

Os perfis metálicos, quando comparados com estruturas de outros materiais, apresentam diversas vantagens, como exemplo pode-se citar: elevada resistência, facilidade do transporte e manuseio, transmitem menores cargas às fundações, manutenção simples e econômica e variedade de geometria da seção transversal. Atualmente os perfis metálicos de seção quadrada de paredes finas têm sido usados para diversas finalidades, como torres de telecomunicação, pontes, fabricação de equipamentos, poste de iluminação, colunas de perfil quadrado, entre outras finalidades. Realizou-se uma análise de colunas de aço com seção transversal quadrada, apresentando passo a passo do programa GBTul para obtenção da carga crítica de flambagem, demonstrando todas as etapas necessárias para assim apresentar os resultados das análises numéricas de flambagem local. Verificou-se que os comportamentos das colunas de seção quadrada selecionadas apresentam deformações já esperadas, deformam-se em direções opostas (para dentro/para fora da seção).

Palavras-chave: Flambagem, Flambagem Local, GBTul, Perfil de Seção Quadrada.



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Estabilidade e Equilíbrio: (a) esfera no fundo do vale,.....	9
FIGURA 2- <i>Coluna de Euler</i> : (a) geometria e carga e (b) caminho de equilíbrio.....	9
Figura 3- Configurações de equilíbrio da <i>Coluna de Euler</i> : (a) equilíbrio estável (b) equilíbrio instável e (c) equilíbrio estável	10
FIGURA 4 - Algumas das aplicações dos perfis de seção quadrada:	11
FIGURA 5- Esquema do processo de produção contínua com soldagem por resistência elétrica.....	12
FIGURA 6- Produção de uma seção de quatro lados	13
FIGURA 7- Esquema do processo de produção helicoidal com soldagem por arco submerso	13
FIGURA 8- Esquema de Conformação dos tubos extrudados sem costura	14
FIGURA 9- Fabricação de perfis, (a) a partir de duas seções de canal e (b) pela.....	14
FIGURA 10- Configuração do modo de instabilidade local em seção de quatro lados	15
FIGURA 11- Ilustração de parâmetros geométricos para tubo de seção quadrada ..	16
FIGURA 12- Relação de β_2 vs. n para tubo de seção quadrada.....	17
FIGURA 13- Definição das propriedades dos materiais.....	18
Figura 14- Variedade de perfis	18
FIGURA 15- Dimensões das seções transversais.....	19
FIGURA 16- Seleção de dados para análise	19
FIGURA 17- Propriedades geométricas da seção transversal	20
FIGURA 18- Identificação do modo de deformação via GBTul para tubo de seção quadrada, (a) tensão axial, flexão do eixo principal, flexão do eixo secundário, torção, distorcional; (b) local	21
FIGURA 19- Análise dos Membros	22
FIGURA 20- Resultado Final do Programa GBTul	23
FIGURA 21- Curvas P_{cr} vs L com indicação do comprimento crítico de flambagem e corresponde modo de deformação para tubo de $R=80$ cm com.....	24



LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Valores dos parâmetros geométricos e adimensionais dos tubos de seção quadrada analisados na flambagem local	17
TABELA 2- Comprimento, carga crítica de flambagem local, Valores dos parâmetros geométricos e adimensionais dos tubos de seção quadrada analisados na flambagem local	24



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. DESENVOLVIMENTO	8
2.1. Referencial Teórico	8
2.1.1. Estabilidade e Equilíbrio	8
2.1.2. Tubos de Seção Quadrada	10
2.1.3. Flambagem	14
2.1.4. Flambagem Local	15
4. ANÁLISE DE DADOS	16
4.1. Análise de Flambagem via GBTul	18
5. CONSIDERAÇÃO FINAL	25
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	25



1. INTRODUÇÃO

A utilização de perfis metálicos permite uma grande variação de geometrias, tais geometrias são amplamente empregadas no mercado da construção civil, devido as suas vantagens em relação a outros materiais, como exemplo pode-se citar: elevada resistência, facilidade do transporte e manuseio, transmitem menores cargas às fundações, manutenção simples e econômica. Atualmente os perfis metálicos tubulares de paredes finas têm sido usados para diversas finalidades, como por exemplo, poste de iluminação, estruturas de linhas de transmissão, torres de telecomunicações e torres eólicas, quando comparados aos perfis de seção aberta apresentam menor área superficial, reduzindo os custos, com pintura e proteção contra o fogo, sendo mais vantajoso para o uso em situações onde a estrutura encontra-se exposta. (WARDENIER, 2010 *apud* BATISTA, 2016, p.2).

Da revisão bibliográfica, compreende-se que devido ao constante uso dos perfis metálicos na construção civil, estudos de estabilidade estrutural tem despertado o interesse de pesquisadores, e contribuem para definição e confirmação de métodos de dimensionamento, atendendo assim as exigências de projeto.

O presente artigo, sob o tema “Utilização do programa GBTul para obtenção da carga crítica de flambagem”, tem por objetivo demonstrar um dos modelos de análise do programa GBTul, apresentando o comportamento estrutural de colunas de aço com seção transversal quadrada, ao qual serão apresentados e discutidos resultados de uma investigação para colunas com modos de flambagem local, demonstrando assim passo a passo da utilização do programa.

2. DESENVOLVIMENTO

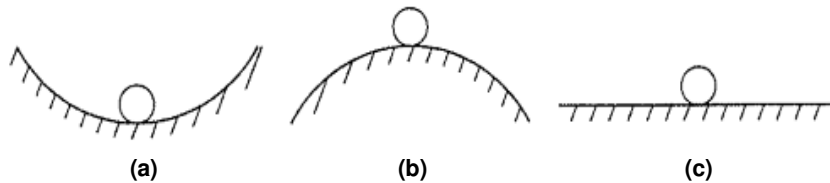
2.1. Referencial Teórico

2.1.1. Estabilidade e Equilíbrio

O projeto de uma estrutura não pode fundamentar-se somente em conceitos de segurança relacionados com a resistência e deformabilidade dos seus elementos, especialmente no caso de estruturas “esbeltas”, para Camotim (2001), é necessário considerar também fenômenos que envolvem conceitos de estabilidade estrutural. Segundo Batista (2016), a noção de “estabilidade” aparece sempre associada ao conceito de equilíbrio. Ferreira (2016), discursa que a estabilidade está relacionada com a capacidade que a estrutura tem de retornar à sua configuração após a inclusão de uma “perturbação” externa. Após a interrupção da perturbação, se a estrutura retornar à sua forma original, considera-se equilíbrio estável, caso contrário, é instável, se a configuração se afastar do original, ou neutro, se a configuração perturbada for de equilíbrio. Os conceitos mencionados são ilustrados na Figura 1.



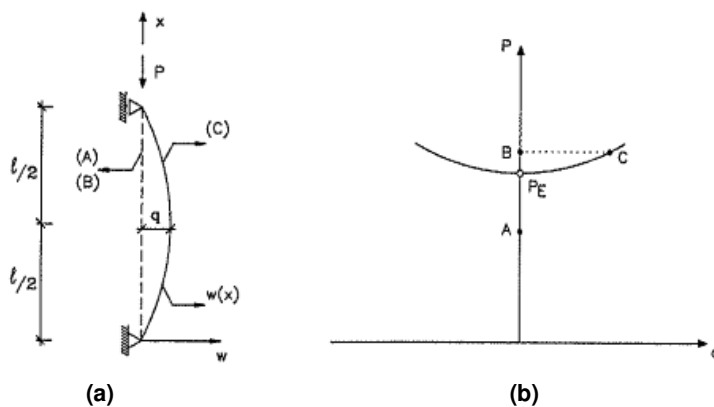
FIGURA 1- Estabilidade e Equilíbrio: (a) esfera no fundo do vale, (b) esfera no topo da colina e (c) neutro



Fonte: Camotim, 2001.

A *coluna de Euler* é utilizada para esclarecer o conceito de estabilidade para colunas, ao qual Dias (1997) afirma que depende de fatores como as dimensões da seção, tipo de vinculação e comprimento livre. A Figura 2 mostra a essência da teoria da *Coluna de Euler* consiste em (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). 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 & Camotim, 2001.

As regiões em que $q = 0$ e $q \neq 0$, denomina-se “trajetória fundamental” e “trajetória de pós flambagem”, respectivamente. A interseção destes dois caminhos é designada como carga crítica (PE), ou carga de flambagem, resultante da equação 1.0, onde EI representa a rigidez a flexão da seção transversal da coluna. (BATISTA, 2016).

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{Eq. 1.0})$$

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

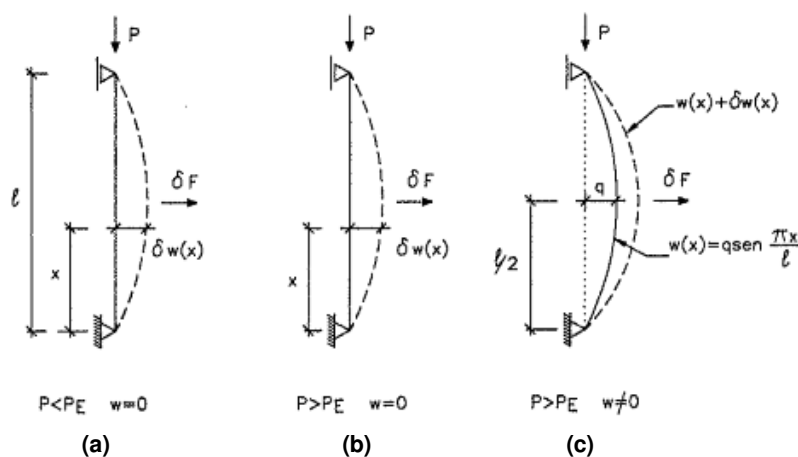
Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)



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 ligeira perturbação, devido a aplicação de uma pequena carga δF , no ponto A ($P < P_E$ e $q = 0$, Figura 3 (a)) a coluna regride a sua posição original, apresentando assim 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 ligeira perturbação na estrutura, em C ($P > P_E$ e $q \neq 0$, Figura 3 (c)), verifica-se que o equilíbrio é estável, 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).

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



Fonte: Reis & Camotim, 2001.

2.1.2. Tubos de Seção Quadrada

Atualmente os perfis metálicos de seção quadrada têm sido usados para diversas finalidades, como por exemplo, estruturas de linhas de transmissão, torres de telecomunicações, equipamentos, colunas em perfil caixão (Figura 4), devido às suas vantagens em relação a outros materiais, como elevada resistência, facilidade de transporte, manutenção simples e econômica.

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)



FIGURA 4 - Algumas das aplicações dos perfis de seção quadrada:
 (a) transportador de correia; (b) equipamento chamado paletizadora;
 (c) colunas em perfil caixão quadrado e
 (d) torre de telecomunicação de seção quadrada



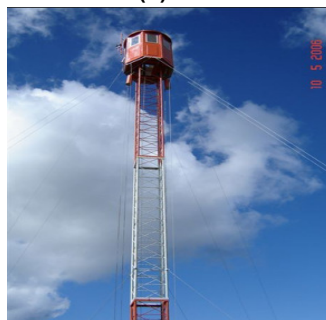
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: (a) Vallourec, 2017; (b) Vallourec, 2017; (c) metálica, 2017 e (d) Towercom, 2017.

Em decorrência de diversos estudos, os avanços tecnológicos vêm desenvolvendo nós pré-fabricados que facilitam a montagem de estruturas tubulares em obra. (ZHAO, *et.al*, 2010). A geometria do perfil pode alterar sua capacidade resistente, fazendo com o que o mesmo suporte mais carga que uma simples chapa, no entanto a uma relação muito alta entre largura e espessura (perfil esbelto) pode comprometer sua estabilidade. (BATISTA, 2016).

O processo de obtenção de perfis tubulares é realizado por meio de processos de conformação e laminação que apresentam como resultado tubos com e sem costura.

Os perfis com costura são obtidos pela calandragem, ou pela prensagem das chapas, com soldagem por arco submerso, e pela conformação contínua, com soldagem por eletrofusão. (DIAS, 1997).

O processo por calandragem, que consiste na conformação de materiais através de cilindros aquecidos de uma calandra, permite a obtenção de virolas das mais variadas espessuras, ao qual é feita a apara das bordas da chapa por máquinas fresadoras, com chanfros necessários para a realização das soldagens internas e externas, assim o processo se dá pela conformação do tubo em calandra, uma vez conformada, a virola é fixada sobre um berço e dependendo da espessura a soldagem se inicia pelo seu lado interno empregando máquina de soldagem a arco submerso. A

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

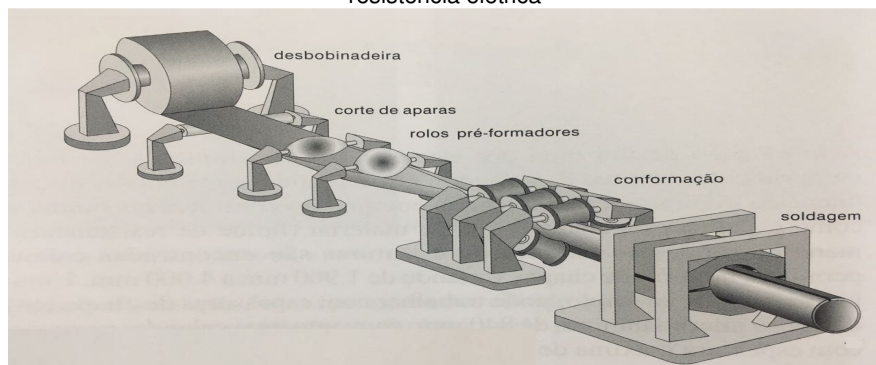
Formatado: Português (Brasil)



fabricação por esse processo está limitada na largura, pelo comprimento nominal da calandra, que é praticamente igual à do rolo, e pelo diâmetro de calandragem, em que são consideradas espessura da chapa e tipo de material. (DIAS, 1997).

Outro processo, é a produção contínua, ilustrada na Figura 5, ao qual o aço é processado a partir de bobina, tem início pela etapa do desbobinamento, em seguida, ocorre o corte das aparas laterais da tira, posteriormente a tira passa pelos pré-formadores, na qual a tira inicia seu processo de transformação em tubo. (DIAS, 1997).

FIGURA 5- Esquema do processo de produção contínua com soldagem por resistência elétrica



Fonte: Dias, 1997.

Ao final, o tubo pode alterar sua seção transversal para quadrada, mediante pressão lateral nas suas paredes superior e inferior. As próximas fases consistem na galvanização dos tubos, garantindo uma alta resistência a corrosão, e por fim os tubos são acondicionados, prontos para serem transportados. A Figura 6 apresenta a produção de uma seção de quatro lados, ao qual é feita a passagem de tubos cilíndricos, com ou sem costura, por uma série de roletes para obtenção do formato desejado, podendo ser feito a quente ou a frio. (WARDENIER *et al.*, 2010).

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)



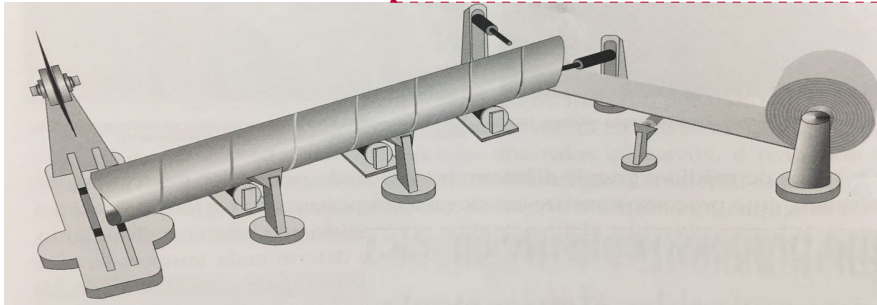
FIGURA 6- Produção de perfil metálico com seção transversal de quatro lados.



Fonte: Wardenier, 2010.

No processo de produção contínua com soldagem helicoidal por arco submerso, as bobinas usadas na fabricação dos tubos são cortadas na largura e têm as bordas preparadas, a bobina é colocada em um carro que a posiciona entre os cones centralizadores por meio de um cilindro hidráulico, após fixada entre as pontas, a bobina é desenrolada sendo o endireitamento da tira por um sistema de calandra, o corte das aparas é realizado, por cisalhamento, assim a tira é enrolada, de forma que a emenda forma um helicóide ou espiral ao redor do tubo delineado, assim apresentado na Figura 7, a consolidação se dá pela soldagem. (DIAS, 1997).

FIGURA 7- Esquema do processo de produção helicoidal com soldagem por arco submerso



Fonte: Dias, 1997.

Os tubos sem costura são produzidos por laminação a quente de aço maciço se seção circular, esses tarugos são transformados em tubos sem costura com o emprego de um mandril de expansão. Por um orifício o mandril realiza a passagem forçada que expulsa a massa de material aquecida contra os laminadores, convertendo o maciço de aço em uma nova forma alongada, dando configuração final ao tubo, assim apresentado nas Figuras 8 e 9. (DIAS, 1997).

Formatado: Fonte: Não Itálico, Cor da fonte: Automática, Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

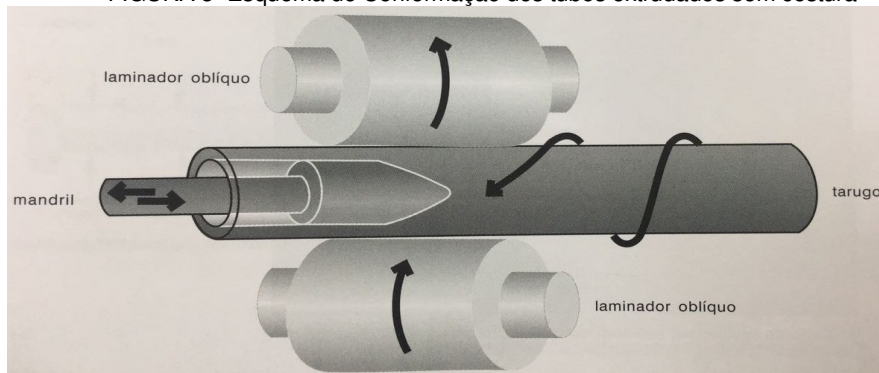
Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)



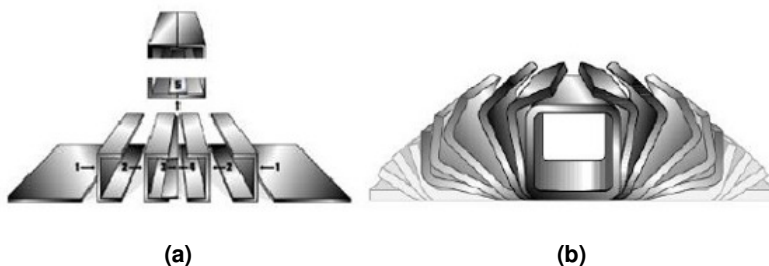
Os perfis podem ser obtidos por meio de ligações parafusadas ou soldadas entre placas, por meio de soldagem de duas metades de perfis conformados ou por conformações de seções circulares. (BATISTA, 2016).

FIGURA 8- Esquema de Conformação dos tubos extrudados sem costura



Fonte: Dias, 1997.

FIGURA 9- Fabricação de perfis, (a) a partir de duas seções de canal e (b) pela formação a frio



Fonte: Pilar, 2015.

2.1.3. Flambagem

Perfis metálicos de elementos esbeltos, apresentam relação largura/espessura elevada e comprimento relativamente grande, o que pode originar o fenômeno de flambagem, que é o deslocamento de um elemento estrutural quando submetido a um carregamento, podendo ser global, distorcional e local, que devem ser estudados e analisados por pesquisadores.

A Flambagem Global ocorre por deslocamento de translação e/ou rotação da seção transversal, sem que haja alteração da forma da seção transversal da coluna, a flambagem distorcional envolve a mudança na forma transversal excluindo flambagem local, e a flambagem local envolve somente a flexão de placa, não apresentando deformações transversais nas arestas. (BATISTA, 2016).

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)



Segundo Koike (2011), existem três métodos reconhecidos para realizar o cálculo da carga crítica de flambagem, a serem: método das faixas finitas (MFF), método dos elementos finitos (MEF) e “*Generalised Beam Theory*” (GBT).

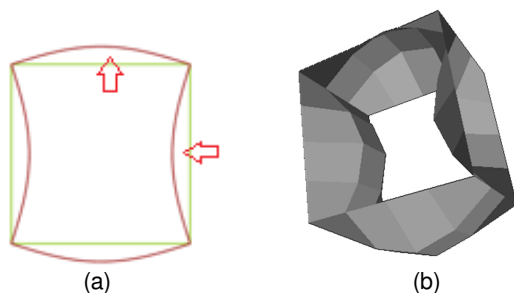
O presente artigo tratará do programa GBTul, que utiliza o método GBT. O programa foi desenvolvido no departamento de Engenharia Civil (DECivil) da Universidade Técnica de Lisboa (UL) – Lisboa, Portugal, GBTul é um programa gratuito que realiza análises de flambagem elástica e vibração de perfis metálicos, fornece informações e visualizações dos modos de flambagem para análise, com interface gráfica de alta qualidade 2D e 3D. (BEBIANO *et al.* 2010ab).

O método programa GBTul foi utilizado por Gonçalves e Camotim (2013b) e Batista (2016) para apresentarem uma investigação sobre o comportamento de flambagem para tubos poligonais regulares de parede fina uniformemente comprimido e teve seus resultados confirmados pela comparação das cargas críticas de flambagem obtidas pelo MEF.

2.1.4. Flambagem Local

Para perfis de seção quadrada, a flambagem local é caracterizada pela deformação da seção através da flexão das paredes, sem que as junções entre as paredes sofram qualquer deslocamento no plano da seção. (FERREIRA, 2016). A Figura 10 apresenta a configuração de instabilidade local em seção de quatro lados, ao qual as paredes adjacentes das seções fletem em direções opostas.

FIGURA 10-Configuração do modo de instabilidade local em seção de quatro lados (a) seção transversal, (b) configuração deformada tridimensional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Batista (2016), demonstra que para uma dada proporção entre raio e espessura, as tensões de flambagem diminuem, com o aumento do número de lados, e tendem para as soluções clássicas de tubos circulares.

3. METODOLOGIA

Realiza-se uma análise computacional de colunas de aço com seção transversal quadrada, com objetivo de apresentar o programa GBTul e ilustrar os resultados das análises numéricas de flambagem local.

Para realização da análise de flambagem no programa GBTul, considera-se $E=21000 \text{ KN/cm}^2$ (Módulo de Young), e $\nu=0.3$ (Coeficiente de Poisson), as colunas selecionadas devem apresentar modo de flambagem “puramente” local. Segundo Batista (2016), pode-se dizer que as colunas apresentam modo de deformação

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

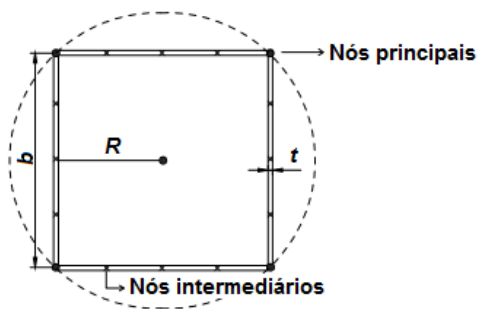


“puro” quando o modo local apresenta uma contribuição dominante em relação aos demais modos de deformação. Os comprimentos críticos de flambagem local estão associados ao comprimento de uma semi-onda.

4. ANÁLISE DE DADOS

A primeira etapa do presente trabalho consiste em selecionar cuidadosamente as dimensões da seção transversal e comprimentos dos tubos de seção quadrada. A Figura 11 ilustra os parâmetros geométricos da seção transversal de um tubo de seção quadrada, a serem (i) raio (R), (ii) espessura (t), (iii) largura da parede (b) e (iv) número de lados (n), ainda traz os nós principais e os nós intermediários que foram empregados na discretização do modelo.

FIGURA11- Ilustração de parâmetros geométricos para tubo de seção quadrada



Fonte: Elaborado pelo autor.

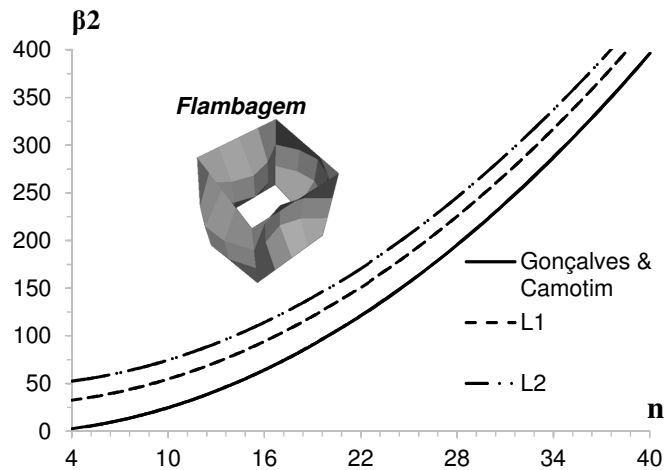
Para obtenção dos parâmetros geométricos, utiliza-se a curva apresentada na Figura 12, obtida por GONÇALVES & CAMOTIM (2013b), que correlaciona o parâmetro adimensional $\beta_2 = R/t$ com n , a curva propõe uma separação de regiões com modo de flambagem puramente local (FL) e com modo de flambagem puramente distorcional (FD) e serve para tubos poligonais regulares com diferentes números de lados.

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

FIGURA12- Relação de β_2 vs. n para tubos poligonais regulares



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado da escolha das 12 geometrias encontra-se na Tabela 4.1 e envolve o mesmo processo apresentado por Batista (2016), que se divide em (i) escolha do número de lados, (ii) busca de seus correspondentes valores de β_2 sobre as curvas $L1$, $L2$ (apresentado na Figura 4.2) e (iii) obtenção das espessuras, arbitrando-se os valores de R em 40, 50, 60, 70, 80 e 90 cm. Baseando-se no gráfico da Figura 12, pode-se dizer que os resultados de geometrias apresentados na Tabela 1 deve apresentar modo de flambagem “puramente” local, $0,7 \text{ cm} \leq t \leq 2,8 \text{ cm}$, para seção com $n=4$, considera-se $R= 40, 50, 60, 70, 80$ e 90 .

TABELA 1- Valores dos parâmetros geométricos e adimensionais dos tubos de seção quadrada analisados na flambagem local

R (cm)		b (cm)	$L1$		$L2$	
			β_2	t (cm)	β_2	t (cm)
$n = 4$	40	56,6	32,6	1,23	52,6	0,76
	50	70,7	32,6	1,53	52,6	0,95
	60	84,9	32,6	1,84	52,6	1,14
	70	99,0	32,6	2,15	52,6	1,33
	80	113,1	32,6	2,45	52,6	1,52
	90	127,3	32,6	2,76	52,6	1,71

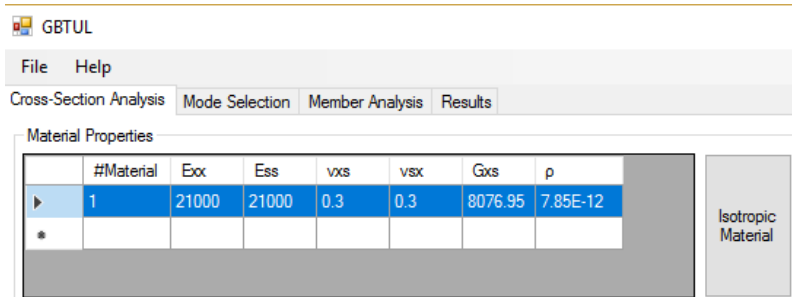
Fonte: Elaborado pelo autor.



4.1. Análise de Flambagem via GBTul

A análise de flambagem é realizada utilizando-se o código GBTul (BEBIANO *et al.* 2010ab), a primeira aba do programa trata da *Cross-Section Analysis*, esta etapa inclui a definição do material, sendo de extrema importância, pois é através de tais dados que se obtém o resultado na unidade de medida que se deseja, como apresentado na Figura 13, utiliza-se como base o trabalho de Batista (2016) que considera $E = 21000 \text{ KN/cm}^2$ (módulo de Young), $\nu = 0.3$ (coeficiente de Poisson).

FIGURA13- Definição das propriedades dos materiais



Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Prossegue-se então para a escolha da geometria perfil, seguida pelas dimensões das seções transversais com número de nós intermediários. O programa GBTul (BEBIANO *et al.* 2010ab) nos fornece uma grande variedade de geometrias, como apresentado na Figura 14, para o presente artigo será utilizado o perfil poligonal e através dos resultados encontrados na Tabela 1 são selecionados os valores de b , t e n , a serem analisados e deve-se adotar um valor para número de nós intermediários, as escolhas estão ilustradas na Figura 15.

FIGURA14-Variedade de perfis



Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Fonte: Elaborado pelo autor.



FIGURA15- Dimensões das seções transversais

Template: Polygonal

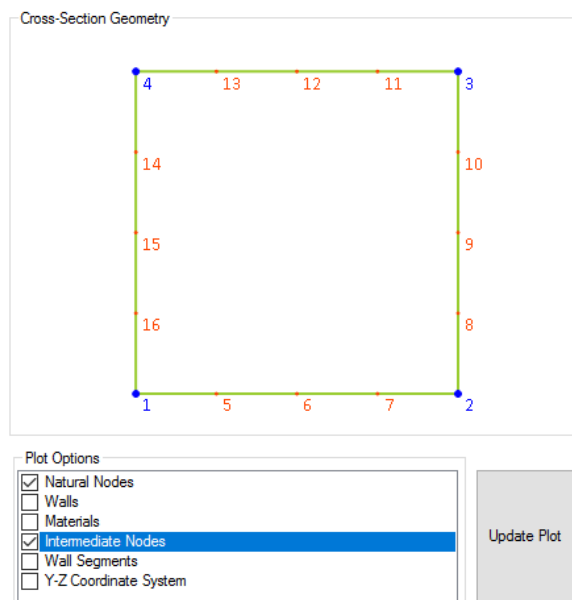
	Dimensions	INodes
b =	113,1	3
t =	1,52	
Number of sides (n):	4	

OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor.

O programa nos permite visualizar todos os parâmetros empregados para a análise do perfil, de maneira gráfica, ele ilustra os nós principais, os nós intermediários, os materiais, as paredes, os segmentos de paredes e o sistema de coordenadas em Y- Z, a Figura 16 apresenta os dados utilizados para o presente artigo.

FIGURA16- Seleção de dados para análise



Fonte: Elaborado pelo autor.

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)



Após todos os dados serem selecionados, é necessário colocar o programa para rodar para a etapa seguinte; *Mode Selection*, nesta etapa, são apresentados de maneira gráfica, os resultados de todos os modos de deformação possíveis para a estrutura modelada (*Mode Number*, Figuras 17 e 18), além das propriedades geométricas da seção transversal, como a área, a inércia, a posição do centroide, nos apresenta também a possibilidade de prosseguir para a próxima análise utilizando; *Conventional Modes*, *Conventional + Shear Modes*, *Conventional+Extension Modes* e *All Modes* assim indicado na Figura 17, para o presente artigo, utiliza-se apenas os *Conventional Modes* ou modos convencionais, os demais modos não serão pertinentes para a análise realizada.

FIGURA17- Propriedades geométricas da seção transversal

GBTUL

File Help

Cross-Section Analysis Mode Selection Member Analysis Results

Deformation Mode Characteristics

Mode Number:

Total number of modes: 48

Displacements	Plate Forces	Plate Strains	Strain Energies
☒ In-Plane	☐ N-x	☐ e-x	☐ C-M
☐ Warping	☐ N-s	☐ e-s	☐ C-F
	☐ N-xs	☐ e-xs	☐ B-M
	☐ M-x	☐ X-x	☐ B-F
	☐ M-s	☐ X-s	☐ D-M
	☐ M-xs	☐ X-xs	☐ D-F

Mode Selection

☒ Conventional Modes ☐ User Selection:

☐ Conventional+Shear Modes

☐ Conventional+Extension Modes

☐ All Modes

Cross-Section Geometrical Properties

A = 687,648	I2 = 1466087,03646079
I1 = 1466087,0364608	J = 2199560,8389664
Γ = 141128,939422848	Y.cg = 56,55
X.cg = 56,55	Y.sc = 56,55
X.sc = 56,55	β 1 = 0
β 1 = 0	β 2 = 0

Formatado: Português (Brasil)

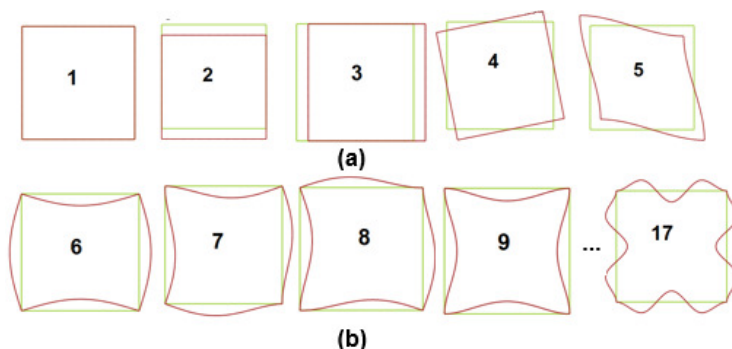
Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Fonte: Elaborado pelo autor.



FIGURA 18-Identificação do modo de deformação via GBTul para tubo de seção quadrada, (a) tensão axial, flexão do eixo principal, flexão do eixo secundário, torção, distorcional; (b) local



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise realizada pelo programa GBTul (BEBIANO *et al.* 2010ab) teve por objetivo satisfazer os seguintes requisitos:

- (i) As colunas que apresentarem os modos de deformação do 6 ao 17 devem apresentar modo de flambagem “puramente” local. Este objetivo deve ser claramente alcançado, uma vez que as curvas $L1-L2$ situam-se em regiões de flambagem local, respectivamente.
- (ii) As dimensões da seção transversal envolvem diferentes valores de raios, e mesmo número de lados, $n=4$. Este requisito visa permitir a análise da influência do valor do raio sobre a carga crítica e modo de deformação, para um mesmo número de lados n .
- (iii) Obtenção do comprimento de meia-onda associados ao modo de flambagem crítico local.
- (iv) Os tubos de seção quadrada apresentam respectivamente 12 modos de deformação local;
- (v) Para os tubos em estudo considera-se como modo de deformação crítico, ao qual apresenta comportamento conhecido, estudado por WITTRICK & CURZON (1968) e AVENT & ROBINSON (1976), onde as paredes adjacentes deformam-se em direções opostas (para dentro/para fora da seção);

A próxima etapa para utilização do programa consiste em uma análise de membros (*Member Analysis*), o presente artigo trata de perfil metálico bi-apoiado com fator de carga compressiva igual a 1, nesta etapa deve-se fornecer o número de semi-ondas necessárias para a realização da análise, seja local, global ou distorcional e o tipo de análise que se deseja realizar, como *Buckling*, *Vibration* e *Vibration of Load Members*. Após as definições, o programa apresenta um detalhamento da coluna em 2D e 3D, Figura 19.

Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)



FIGURA19- Análise dos Membros

Solution: Analytical, Numerical (BFE)
☒ Analytical Solution ☐ Numerical Solution

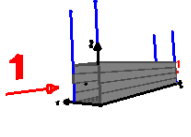
Analytical Solution
 Simply supported members under longitudinally uniform normal stresses

Load Factors
 N = M1 = M2 = B =

Number of Half-Waves
 From 1 to:

Graphical Display: Number of Length Segments

Member Display
 2D Plot

 3D Plot


Plot Options
☒ Loading
☒ Support Conditions
☒ Elastic Supports
☒ Additional Masses
☒ Coordinate System
☒ Labels

Navigation
 W = move forward
 S = move backward
 A = strafe left
 D = strafe right
 Mouse click + drag = rotate object

Update Plot

Number of Eigenmodes Required:

Type of Analysis
☒ Buckling
☐ Vibration
☐ Vibration of Loaded Members
 $\alpha =$

Next

Lengths
 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 120 140 160 180 200 220 240 250 300 350 400
 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950 1000 1050 1100 1200 1300
 1400 1500 1600 1700 1800 1900 2000 2100 2200 2300 2400 2500 3000 3500
 4000 4500 5000 5500 6000 6500 7000 7500 8000 8500 9000 9500 10000

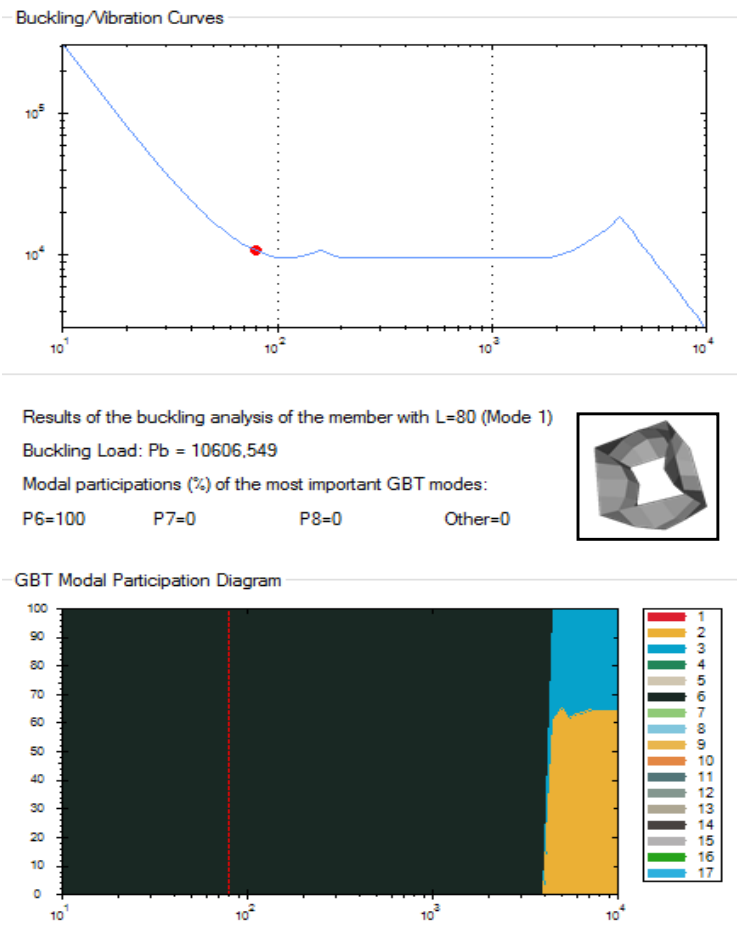
Log-Uniform

Fonte: Elaborado pelo autor.

A etapa final consiste na análise dos resultados (*Results*), que apresenta o comprimento onde de flambagem, relacionando o comprimento do perfil à sua carga crítica com base na identificação dos pontos de mínimo da curva, entretanto alguns pontos podem apresentar participação de vários modos de flambagem, é necessário considerar a porcentagem de participação modal de cada modo de flambagem para a deformada final da estrutura, como demonstra a Figura 20.



FIGURA 20- Resultado Final do Programa GBTul



Formatado: Português (Brasil)

Código de campo alterado

Formatado: Português (Brasil)

Formatado: Português (Brasil)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado das análises de flambagem, estão apresentados na Tabela 2 que fornece (i) os valores de raio e número de lados, (ii) o comprimento crítico associado a flambagem local (L_L) carga crítica correspondente a flambagem local ($P_{cr,Ln,4}$) e (iii) a participação modal para cada modo de deformação ($P.M.$).



TABELA 2- Comprimento, carga crítica de flambagem local, valores dos parâmetros geométricos e adimensionais dos tubos de seção quadrada analisados na flambagem local

R (cm)		$L1$			$L2$		
		$P.M.$ (%)	L_L (cm)	$P_{cr.L1.4}$ (kN)	$P.M.$ (%)	L_L (cm)	$P_{cr.L2.4}$ (kN)
$n = 4$	40	P6-100	40	10302	P6-100	40	2651
	50	P6-100	50	17307	P6-100	50	4143
	60	P6-100	60	25079	P6-100	60	5964
	70	P6-100	70	34300	P6-100	70	8120
	80	P6-100	80	99901	P6-100	80	10607
	90	P6-100	90	56435	P6-100	90	13422

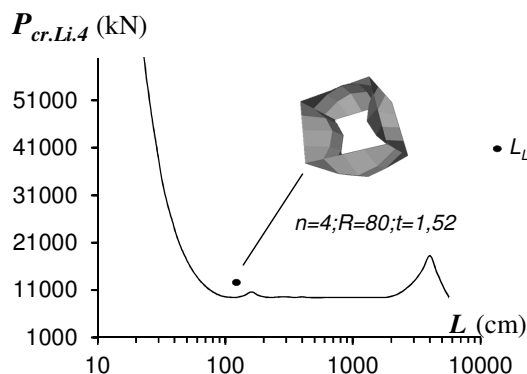
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação aos resultados apresentados na Tabela 4.2, como já previsto por Batista (2016), as seguintes observações devem ser apontadas:

- A flambagem local para os tubos de seção quadrada, ou seja, com $n=4$ apresentam modo crítico de deformação local único do modo 6 (*i.e.*; com percentual de 100% na participação modal).
- Assim pretendido, as colunas selecionadas apresentam flambagem no modo local;
- Para um mesmo raio os valores de carga crítica estão sistematicamente ordenados em $P_{cr.L2.4} \leq P_{cr.L1.4}$.

A Figura 21 ilustra um produto final obtido após a realização da análise de flambagem. O valor dos comprimentos críticos de flambagem L_L estão indicados na figura, ao qual também inclui o modo de deformação crítico local.

FIGURA 21- Curvas P_{cr} vs L com indicação do comprimento crítico de flambagem e correspondente modo de deformação para tubo de $R=80$ cm, $n=4$ e $t=1,52$ cm



Fonte: Elaborado pelo autor.



A curva apresentada na Figura 21 evidencia mais uma vez a modo crítico de deformação local único (i.e.; com percentual de 100% na participação modal). As curvas P_{cr} vs L permitem a visualização da proximidade dos valores de comprimento de flambagem e carga crítica para os tubos com mesmo número de lados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho estudou-se o comportamento estrutural de colunas de aço com seção transversal quadrada. O estudo realizado focou-se em apresentar o programa GBTul e ilustrar os resultados das análises numéricas de flambagem local.

Para atingir o objetivo do estudo, 12 colunas foram numericamente analisadas, para isso foi utilizado a curva proposta por GONÇALVES & CAMOTIM (2013b) para selecionar colunas com modos de deformação “puramente” local. Os resultados da análise de flambagem, após a seleção das dimensões das seções transversais, os comprimentos e caracterização mecânica dos modos de flambagem críticos foram fornecidos utilizando o programa GBTul, que é um programa gratuito e realiza análise de flambagem e vibração de perfis metálicos, fornecendo assim informações e visualizações dos modos de flambagem, permite a análise dos perfis feito de um ou vários materiais, apresenta também várias condições comuns de suporte, como apoios livres, suportes fixos ou extremidades livres, em 2D e 3D, permitindo analisar a flambagem por meio de uma curva, que relaciona o comprimento do perfil e sua carga crítica. Destacando assim passo a passo de como utilizar o programa, e visualizar os resultados proposto por ele.

Os resultados deste trabalho mostram que o programa GBTul apresenta uma interface simples, permite diversos tipos de análises e quando comparado com o resultado esperado pela curva de Gonçalves e Camotim (2013b), fornece resultados seguros sobre o comportamento do perfil de seção quadrada para o modo de flambagem local.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AVENT R, ROBINSON J., 1976. “Elastic stability of polygon folded plate columns”. *ASCE Journal of the Structural Division*, v.102(5), pp.1015–29.

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

BATISTA, Tauana de Oliveira. **Estabilidade e resistência última de colunas metálicas com seção 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, 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>).

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

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>).

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

DIAS, Luís Andrade de Mattos. Perfis. In: DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estrutura de Aço: conceitos, técnicas e linguagem**. São Paulo: Zingurate Editora, 1997. p. 83-99.



FERREIRA, Pedro Felipe Dias. **Avaliação da resistência de colunas tubulares de aço com secção poligonal regular de parede fina**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – FCT/UNL, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.

GONÇALVES R, CAMOTIM D., 2013b “**Elastic buckling of uniformly compressed thin-walled regular polygonal tubes**”. *Thin-Walled Structures*; v.71, pp.35-45.

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

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

KOIKE, Pablo Enio. **Modelagem numérica da Flambagem de elementos metálicos de seções abertas e paredes finas**. 2011. Tese – COPPE, Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

METÁLICA - <http://wwwo.metalica.com.br/terminal-intermodal-em-pinheiros>. Acesso em 26 de Agosto de 2017.

NUNES, Lucas Cesar. **Análise de flambagem distorcional e Resistência última de perfil tipo U enrijecido**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso- FACIG, Faculdade de Ciências Gerenciais, Manhuaçu, 2016.

PILLAR, Rafaela Veiga. **Influência das tensões residuais sobre a resistência do aço – Perfis ocas colunas retangulares**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

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

TOWERCOM - <http://towercom.com.br>. Acesso em 26 de Agosto de 2017.

VALLOUREC - <http://www.vallourec.com/COUNTRIES/BRAZIL/PT/Products-and-services/automotive-secindustrial-tubes/Documents/Catalogo%20Estruturais.pdf>. Acesso em 26 de Agosto de 2017.

Formatado: Sem sublinhado, Cor da fonte: Automática, Inglês (Estados Unidos)

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

Código de campo alterado

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

Formatado: Fonte: Não Negrito, Inglês (Estados Unidos)

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

WARDENIER *et al.*, 2010. “**Hollow sections in structural applications**”. *CIDECT*, Geneva, Switzerland.

WITTRICK W, CURZON P., 1968. “Local buckling of long polygonal tubes in combined compression and torsion”. **International Journal of Mechanical Sciences**; v.10, pp.849– 57.

ZHAO X. L., HAN L., LU H., 2010. “Concrete-filled tubular members and connections”. **Spon Press, New York**.

