



ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS ESTRUTURAIS COM PERFURAÇÕES SUBMETIDOS À FLAMBAGEM ELÁSTICA ATRAVÉS DO MÉTODO CONSTRUCTAL DESIGN

Vinícius Amaral Altê

vinicius_alte@hotmail.com

Universidade Federal do Rio Grande (FURG) - Escola de Engenharia (EE)

Av. Itália, km 8, 96203-900, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil

Renata Costa de Almeida Alonso

renatalonso@yahoo.com.br

Universidade Federal do Rio Grande (FURG) - Escola de Engenharia (EE)

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC)

Av. Itália, km 8, 96203-900, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil

João Paulo Silva Lima

Universidade Federal do Rio Grande (FURG) - Escola de Engenharia (EE)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO)

Elizaldo Domingues dos Santos

Liércio André Isoldi

Mauro de Vasconcellos Real

elisaldosantos@furg.br

liercioisoldi@furg.br

mauroreal@furg.br

Universidade Federal do Rio Grande (FURG) - Escola de Engenharia (EE)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO)

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC)

Av. Itália, km 8, 96203-900, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil.

Luiz Alberto Oliveira Rocha

luizrocha@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Sarmento Leite St. nº 425, 90050-170, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Resumo. *Tubos estruturais são componentes empregados como colunas em estruturas metálicas devido à sua boa relação peso/resistência mecânica. Porém, quando submetidos a um carregamento de compressão axial os mesmos podem sofrer um fenômeno de instabilidade elástica conhecido como flambagem. Para uma coluna sem perfurações, existem equações analíticas para a determinação da carga crítica de flambagem. Entretanto, se existirem perfurações, somente análises experimentais ou numéricas podem ser empregadas para obter o valor desta carga crítica. Sendo assim, nesse trabalho, um modelo computacional desenvolvido no software ANSYS, que é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), foi usado na determinação da carga crítica de um tubo estrutural perfurado. Além disso, o método Constructal Design foi aplicado para avaliar a influência da inserção de perfurações retangulares ao longo do tubo estrutural na carga crítica de flambagem. O objetivo consistiu em determinar a geometria ótima para essas colunas perfuradas submetidas à flambagem elástica, de forma a maximizar a carga crítica suportada. Foi considerado ϕ (razão entre o volume removido e o volume total da coluna) de 0.05; 0.10; 0.15 e 0.20, com variações da razão entre as dimensões características das perfurações (H_0/L_0). Os resultados indicaram que valores menores de H_0/L_0 conduzem à maiores valores de carga crítica.*

Palavras-Chave: *Flambagem elástica de colunas, Tubos estruturais, Método Constructal Design, Modelagem Computacional.*

1 INTRODUÇÃO

Economia, eficiência e durabilidade aliadas à segurança sempre foram princípios para o desenvolvimento de novas soluções e materiais na engenharia estrutural. Estruturas que sustentam carregamentos podem falhar de várias formas, dependendo do tipo da estrutura, das condições de apoio, dos tipos de carregamentos e dos materiais usados (Gere, 2003).

Segundo Pfeil (2012) denomina-se coluna uma peça vertical comprida e esbelta sujeita à compressão centrada. O esforço de compressão tende a acentuar o efeito de curvatura e os deslocamentos laterais produzidos compõem o processo conhecido como flambagem, que, em geral, reduz a capacidade de carga da peça. Em outras palavras, enquanto a carga sobre esse componente é relativamente pequena, a coluna fica submetida a uma tensão de compressão e, conseqüentemente, a uma deformação axial. Porém, existe um valor crítico para esse carregamento de compressão no qual a coluna repentinamente sofre uma deflexão lateral, ocorrendo a flambagem e dando origem a grandes deformações que causam o colapso da coluna.

Perfurações são frequentemente introduzidas em elementos estruturais de paredes finas para facilitar o acesso a serviços e inspeção (Shanmugam, 1997), bem como a passagem de cabos elétricos e outros serviços. Além disso, as mesmas contribuem para a diminuição do peso da estrutura e até mesmo por estética ao atender projetos arquitetônicos. A presença de furos gera uma redistribuição de tensões acompanhada por uma mudança no comportamento mecânico destes componentes (Cheng & Zhao, 2010).

Estudos realizados sobre flambagem elástica serviram para avaliar a influência causada pela remoção de material em elementos estruturais em sua carga crítica de flambagem. Shanmugam e Dhanalakshmi (2001) desenvolveram uma equação para determinar a capacidade de carga máxima de colunas curtas de aço com canal perfurado contendo aberturas únicas ou múltiplas de formatos quadrado, circular e de forma de abertura fabricadas. Esta equação é baseada em estudos paramétricos que foram realizados utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) em seções de canal simples contendo abertura. Moen e Schafer (2008) desenvolveram uma análise experimental para verificar a relação entre a flambagem elástica e a resposta a testes com colunas de aço perfuradas. Foram utilizadas vinte e quatro colunas que variaram a geometria com relação ao seu comprimento e com relação à presença ou ausência de furos para os testes de compressão. Silva (2011) realizou um estudo teórico experimental do modo de instabilidade local de placas de colunas curtas em perfis formados a frio de seção tipo rack, visando avaliar a influência no modo de flambagem local na seção com e sem a presença de perfurações. Rocha et al. (2013) e Correia et al. (2013) empregaram a Teoria Construtal em seu trabalho a fim de otimizar a geometria de placas finas retangulares perfuradas, simplesmente apoiadas, submetidas à flambagem elástica, com o objetivo de maximizar a carga crítica de flambagem. Alonso et al. (2014) avaliaram numericamente a influência da retirada de volume de uma coluna em sua carga crítica de flambagem. Para isso, perfurações circulares, distribuídas em diferentes arranjos foram consideradas e realizadas na alma do perfil tipo I.

Para avaliar como a geometria das perfurações influencia no valor da carga crítica, será empregado ao longo deste trabalho o método *Constructal Design*, baseado na Teoria Constructal desenvolvida por Adrian Bejan em 1995, que é fundamentada no princípio da ótima distribuição das imperfeições. Até o momento, a grande maioria dos estudos empregando a Teoria Constructal na área de engenharia é dedicada ao desenvolvimento de

geometrias ótimas em problemas de mecânica dos fluidos e de transferência de calor. No entanto, é possível considerar as estruturas sólidas como sistemas que são configurados de modo a facilitar o fluxo de tensões. Esse ponto de vista é bastante incomum, mas é eficaz quando o objetivo é descobrir a melhor configuração de um componente estrutural submetido a um determinado carregamento (Lorente et al., 2010).

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo computacional para a flambagem elástica através do software ANSYS, o qual utiliza o MEF para a simulação numérica do comportamento mecânico de tubos estruturais com seção retangular, contendo perfurações retangulares, e com vinculação do tipo engastada-livre.

O trabalho teve como objetivo realizar um estudo numérico para avaliar a influência das perfurações no comportamento mecânico da coluna sob flambagem, utilizando o método *Constructal Design*. Foram considerados valores de ϕ (razão entre o volume removido e o volume total da coluna) de 0.05; 0.10; 0.15 e 0.20, enquanto variações do grau de liberdade H_0/L_0 (razão entre as dimensões características das perfurações) foram realizados para cada caso.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Maliska (2004) afirma que o engenheiro ou projetista tem à sua disposição, fundamentalmente, três abordagens para desenvolver um projeto ou analisar um problema: métodos analíticos; métodos numéricos (experimentação numérica); e experimentação em laboratório. No presente trabalho as abordagens numérica e analítica foram empregadas. Primeiramente, foram realizadas análises analítica e numérica considerando tubos estruturais de aço com seções retangulares sem perfurações. Os resultados obtidos foram comparados para realizar a verificação do modelo numérico. A carga crítica de flambagem para os tubos estruturais sem perfurações foi usada como valor de referência para avaliar os resultados de carga crítica para os tubos com perfurações, uma vez que, não existem soluções analíticas para o cálculo de colunas perfuradas. Por fim, o processo de otimização geométrica através do método *Constructal Design* de colunas com perfurações retangulares foi realizado.

2.1 Flambagem de Colunas: Carga Crítica

Para determinar a solução analítica para a carga crítica e o modo de flambagem de uma coluna engastada-livre (Fig. 1), deve-se considerar que: a mesma tem comprimento L e momento de inércia I (sendo considerado seu menor valor); é feita de um material com módulo de elasticidade E e coeficiente de Poisson ν ; possui uma carga de compressão P que é aplicada em sua extremidade livre, causando um momento fletor interno M e uma deflexão v .

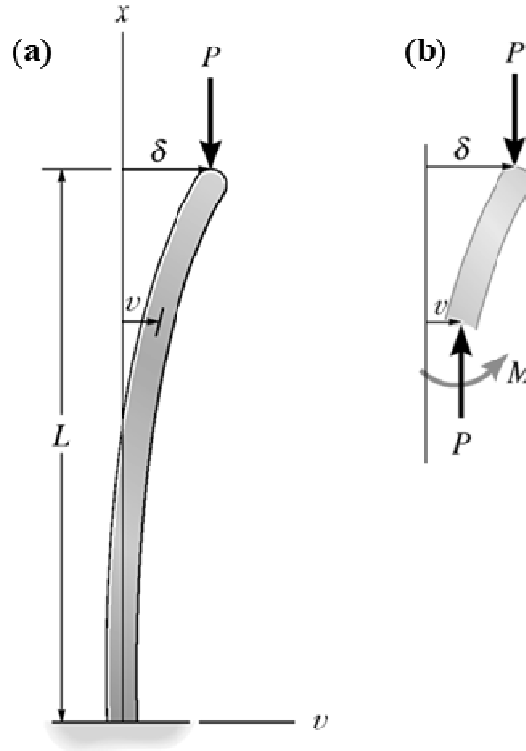


Figura 1. Coluna engastada-livre (a) e diagrama de corpo livre (b)

Segundo Hibbeler (2010), pelo diagrama de corpo livre na Fig. 1b, o momento interno na seção arbitrária é:

$$M = P(\delta - v) \quad (1)$$

Por consequência, a equação diferencial para a curva de deflexão é:

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = P(\delta - v) \quad (2)$$

A Eq. (2) pode ser reescrita como:

$$\frac{d^2v}{dx^2} + \frac{P}{EI} v = \frac{P}{EI} \delta \quad (3)$$

A Eq. (3) é uma equação diferencial não-homogênea devido ao termo não nulo no lado direito. Então, a sua solução consiste em uma solução homogênea associada a uma solução particular, ou seja:

$$v = C_1 \operatorname{sen}\left(\sqrt{\frac{P}{EI}} x\right) + C_2 \cos\left(\sqrt{\frac{P}{EI}} x\right) + \delta \quad (4)$$

As constantes de integração C_1 e C_2 da Eq. (4) são determinadas pelas condições de contorno. Em $x = 0, v = 0$, de modo que $C_2 = -\delta$.

Além disso,

$$\frac{dv}{dx} = C_1 \sqrt{\frac{P}{EI}} \cos\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}x\right) - C_2 \sqrt{\frac{P}{EI}} \sin\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}x\right) \quad (5)$$

E, como em $x = 0, dv/dx = 0$, pela Eq. (5) define-se que $C_1 = 0$. Portanto, a curva de deflexão é dada por:

$$v = \delta \left[1 - \cos\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}x\right) \right] \quad (6)$$

Considerando que a deflexão no topo da coluna é δ , isto é, em $x = L, v = \delta$, é necessário que:

$$\delta \cos\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}L\right) = 0 \quad (7)$$

A solução trivial seria $\delta = 0$, o que indicaria que não ocorre nenhuma flambagem, independentemente da carga P . Sendo assim, é necessário adotar uma solução não trivial:

$$\cos\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}L\right) = 0 \quad (8)$$

que é satisfeita se:

$$\sqrt{\frac{P}{EI}}L = \frac{n\pi}{2} \quad (9)$$

Então, a carga crítica ocorre quando, onde n representa o número de semi-ondas na forma fletida da coluna, na Eq (9), sendo definida por:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (10)$$

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Com a finalidade de simular o comportamento mecânico de tubos estruturais perfurados sujeitos à flambagem elástica, foi desenvolvido um modelo numérico através do MEF, por meio do programa ANSYS. Os tubos estruturais foram simulados empregando o elemento finito SHELL93, que é um elemento tipo casca com oito nós e integração reduzida. Possui

seis graus de liberdade por nó: três translações nas direções dos eixos x , y e z e três rotações em torno dos eixos x , ϕ e z (Ansys, 2005).

Para o estudo numérico do fenômeno da flambagem, foi adotada a análise elástica de autovalores. As equações de equilíbrio por elementos finitos para este tipo de análise envolvem a solução de equações algébricas homogêneas, onde o autovalor mais baixo corresponde à carga crítica de flambagem e o autovetor associado representa o primeiro modo de flambagem (Madenci e Guven, 2006).

De acordo com Madenci e Guven (2006), a formulação utilizada na análise numérica inclui tanto os termos lineares como os não-lineares. Assim, a matriz de rigidez total $[K]$, é obtida pela soma da matriz de rigidez convencional para pequenas deformações, $[K_E]$, com a matriz de rigidez geométrica, $[K_G]$. A matriz $[K_G]$ depende não só da geometria, mas também do esforço interno existente no início do carregamento, $\{P_0\}$. Então, a matriz de rigidez total da coluna para um nível de carga $\{P_0\}$ pode ser escrita como:

$$[K] = [K_E] + [K_G] \quad (11)$$

Quando a carga atinge o nível de $\{P_0\} = \lambda\{P_0\}$, a matriz de rigidez pode ser definida como:

$$[K] = [K_E] + \lambda[K_G] \quad (12)$$

sendo λ um escalar. As equações de equilíbrio governantes para a coluna podem ser escritas como:

$$[[K_E] + \lambda[K_G]]\{U\} = \lambda\{P_0\} \quad (13)$$

sendo $\{U\}$ o vetor de deslocamento total, que pode, portanto, ser determinado por:

$$\{U\} = [[K_E] + \lambda[K_G]]^{-1} \lambda\{P_0\} \quad (14)$$

Na flambagem, o componente estrutural apresenta um grande crescimento nos deslocamentos sem crescimento da carga. Por definição matemática, é possível determinar a matriz inversa como a matriz adjunta dividida pelo determinante dos coeficientes, então os deslocamentos $\{U\}$ tendem a infinito quando:

$$\det[[K_E] + \lambda[K_G]] = 0 \quad (15)$$

A Eq. (15) representa um problema de autovalores que, quando resolvido, gera o menor autovalor, que corresponde à carga crítica $\{P_{cr}\} = \lambda_1\{P_0\}$ em que ocorre a flambagem. Além disso, o vetor de deslocamento associado $\{U\}$ define a forma do modo de flambagem. O problema de autovalores é resolvido usando o método numérico de Lanczos (Ansys, 2005).

3.1 Domínio Computacional

No presente trabalho um estudo de caso foi realizado considerando tubos estruturais de aço, com seção transversal retangular. Este perfil de aço é comercializado possuindo cantos arredondados. A Tabela 1 mostra as propriedades do material e as dimensões do tubo estrutural estudado nesse trabalho.

Tabela 1. Características do Tubo Estrutural

Características	Perfil
E (GPa)	210
ν	0.3
H (mm)	360
L (mm)	6000
B (mm)	210
t (mm)	12.5
A (mm ²)	135000
I_{yy} (mm ⁴)	21530×10^4
I_{zz} (mm ⁴)	9381×10^4

Na Tabela 1, H e B são a largura e a altura, respectivamente, da seção transversal retangular, t é a espessura do tubo estrutural, A é a área de seção transversal do tubo estrutural e I_{yy} e I_{zz} são os momentos de inércia de área, nas direções y e z , respectivamente.

Na Fig. 2 a seção transversal do tubo estrutural é mostrada.

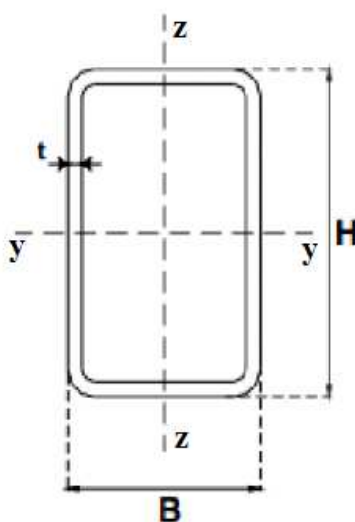


Figura 2. Seção transversal do tubo estrutural

E, na Fig. 3, são indicadas as dimensões do raio externo do perfil. Define-se $C1$ e $C2$ como sendo a distância medida entre a interseção do lado plano com o arco do raio externo e prolongamento da outra face plana. A curvatura externa é dada por $2t \leq C1 \leq 3t$.

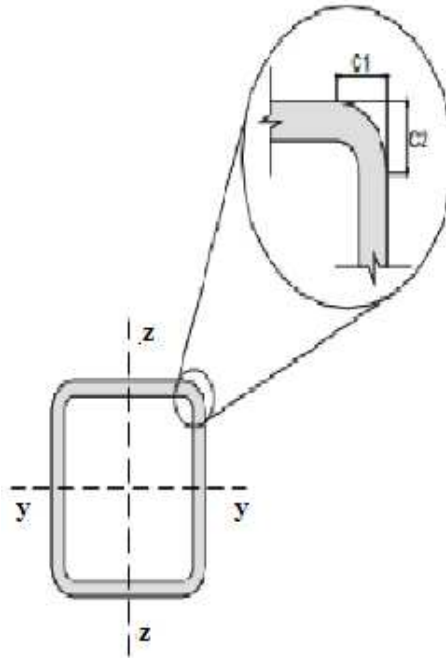


Figura 3. Curvatura externa do tubo estrutural

Como foi considerada uma coluna engastada-livre, foi aplicada na extremidade livre da coluna (em $x = L$) uma carga de compressão unitária (1 N) para a solução numérica por autovalores. Além disso, a condição de contorno aplicada para todos os nós que estão situados na extremidade fixa da coluna (em $x = 0$) impõe que suas translações e rotações são nulas, representando um engaste.

3.2 Teste de Independência de Malha

Nos erros de aproximação, inerentes aos métodos numéricos, pode-se destacar o erro devido à discretização do domínio computacional, em outras palavras, o erro devido ao refino da malha adotado (Teixeira et al., 2009). Nesse contexto, foi realizado um teste de independência de malha, que consiste em determinar quão refinada deve ser a malha utilizada para o estudo de caso, de forma que a mesma não agregue erros consideráveis nos resultados numéricos.

Foi considerado para o teste de independência de malha o tubo estrutural com seção transversal retangular, sem perfurações. Foi adotado o elemento finito SHELL93 na forma triangular, por melhor se adaptar às regiões das perfurações que serão posteriormente analisadas durante o estudo de caso. O parâmetro utilizado para gerar a malha foi o perímetro (Per) da seção transversal, ou seja, as malhas foram geradas atribuindo para o tamanho do elemento finito característico o valor do perímetro dividido por n (número de divisões do perímetro, conforme mostra a Tabela 2), desta forma, obtendo-se discretizações para o domínio computacional cada vez mais refinadas.

A Tabela 2 e a Fig. 4, apresentam os resultados do teste de independência de malha do perfil estudado.

Tabela 2. Teste de independência de malha

Per/n	Tamanho (mm)	Nº elementos	Pcr (kN)	Diferença (%)
2	523.54	288	1373.3	0.60
5	209.42	696	1365.0	0.27
10	104.71	1856	1361.3	0.11
20	52.35	5520	1359.8	0.10
30	34.90	13760	1358.4	0.01
40	26.18	20240	1358.3	0.01
50	20.94	32144	1358.1	0.01
60	17.45	43992	1358.0	0.00
70	14.96	57960	1358.0	

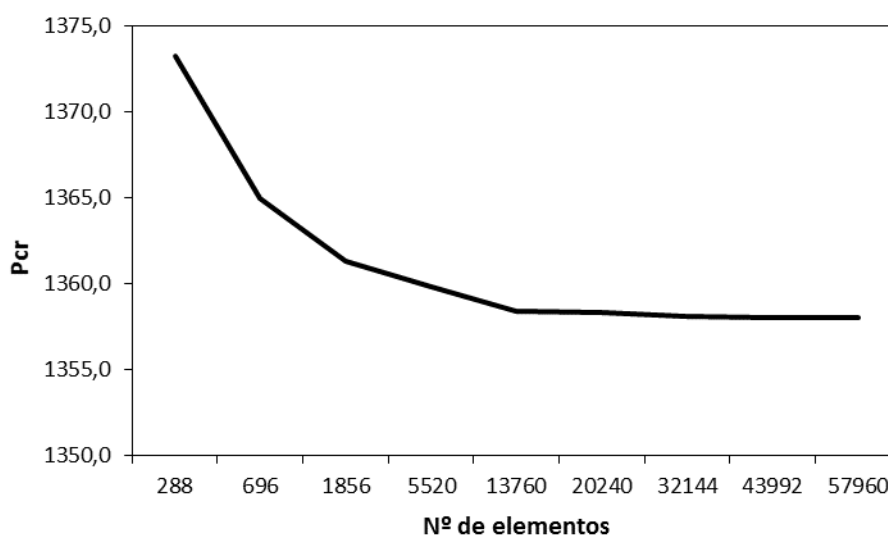


Figura 4. Gráfico teste de independência de malha

Observando-se a Fig. 4 tornou-se aceitável o valor de carga crítica obtido com o elemento de tamanho 26.18 mm para o perfil estudado, garantindo que esse resultado é independente da malha adotada.

Foi realizado também o teste de independência de malha para o refinamento na região da perfuração. Para fazer este teste foi utilizado o mesmo domínio computacional anterior, porém com um furo transpassante central, conforme Fig. 5. Foi utilizado em sua discretização o tamanho de elemento de malha de 26.18 mm obtido com o teste de independência de malha de uma coluna sem perfurações já realizado. Os resultados obtidos para a carga crítica da coluna perfurada indicam que esta malha, definida pelo teste de independência de malha para a coluna sem perfurações, já é suficientemente refinada, podendo ser usada nas simulações das colunas com perfurações.

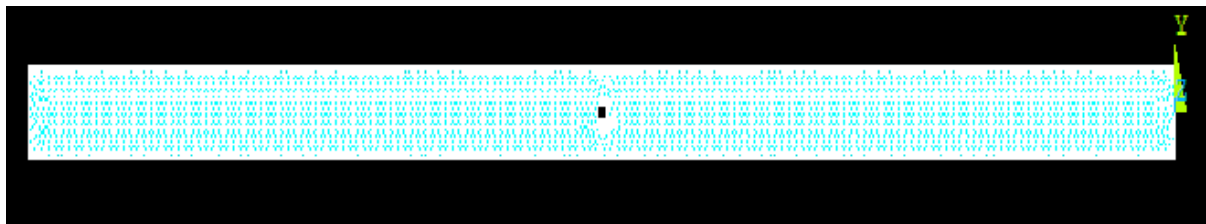


Figura 5. Refino da malha na região da perfuração

3.3 Verificação do Modelo Numérico

O resultado numérico para a carga crítica obtido com a malha independente, ou seja, a malha gerada com elementos finitos triangulares de 26.18 mm (ver Tabela 1), foi de $P_{cr} = 1358.21$ kN. Comparando o mesmo com o valor da carga crítica definido pela Eq. (10), que foi de $P_{cr} = 1350.22$ kN, foi encontrada uma diferença de 0.59%, verificando o modelo computacional proposto.

Além disso, na Fig. 6 é apresentado o modo de flambagem para a coluna engastada-livre obtido numericamente. O mesmo está de acordo com a configuração flambada para uma coluna com esse tipo de vinculação (Hibbeler, 2010), indicando que o modelo computacional pode ser usado de maneira satisfatória para a análise do comportamento das colunas com perfurações submetidas à flambagem.

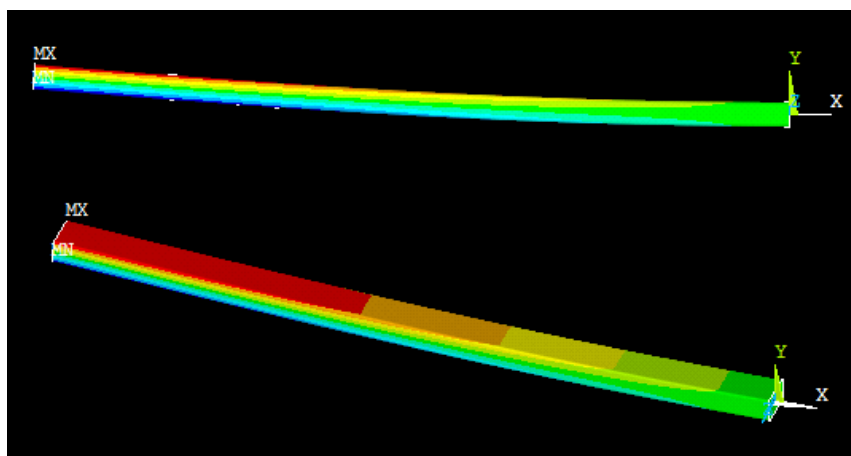


Figura 6. Tubo estrutural flambado sem perfurações

4 CONSTRUCTAL DESIGN APLICADO A COLUNAS PERFURADAS SOB FLAMBAGEM

O método *Constructal Design* é baseado na *Lei Constructal*, a qual afirma que em um sistema de volume finito onde há escoamento, esse evolui geometricamente de maneira a

facilitar o acesso das correntes de fluxo no sistema (Bejan e Lorente, 2008). Para aplicar o método *Constructal Design* como técnica de otimização geométrica em um sistema físico, são necessários uma função objetivo, ou seja, uma grandeza a ser otimizada; um ou mais graus de liberdade, que são parâmetros geométricos que podem variar durante o processo de otimização; e restrições geométricas que são parâmetros mantidos constantes ao longo do processo de otimização.

Neste trabalho, o *Constructal Design* foi empregado no estudo de tubos estruturais com seção retangular e com furos retangulares. As dimensões dos furos sofreram variações, sendo geradas por um parâmetro chamado fração volumétrica (ϕ). Esse parâmetro representa a relação entre o volume do furo (V_0) e o volume total do tubo estrutural sem perfurações (V). A análise foi realizada considerando quatro diferentes valores para a fração de volume ϕ para as perfurações retangulares, de 0.05; 0.10; 0.15 e 0.20 definidos por:

$$\phi = \frac{V_0}{V} = \frac{NH_0L_0t}{AL} \quad (16)$$

onde: H_0 e L_0 são as dimensões características do furo retangular (Fig. 7), N é o número de furos, e t , A e L são, respectivamente, a espessura, a área de seção transversal e o comprimento do tubo estrutural (ver Tabela 1).

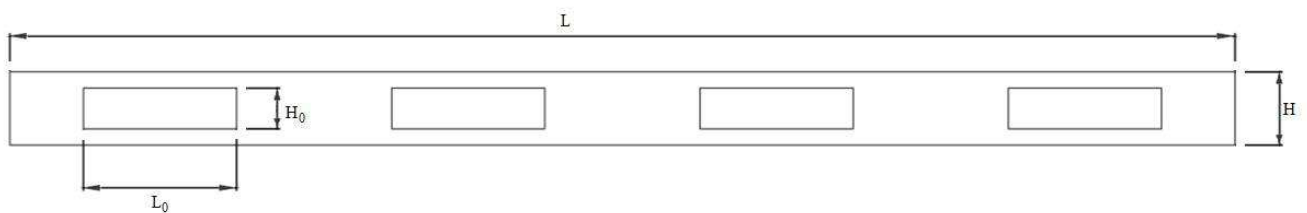


Figura 7. Dimensões da coluna e do furo retangular

O objetivo das análises é determinar a geometria ótima para as perfurações retangulares, $(H_0/L_0)_o$, a fim de maximizar a carga crítica de flambagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como já foi dito, o estudo de caso foi realizado considerando quatro diferentes valores de fração volumétrica, ϕ . Já as variações do grau de liberdade H_0/L_0 foram realizadas para cada valor de ϕ analisado. Além disso, os valores numericamente obtidos para a carga crítica de flambagem foram divididos pela carga crítica analítica da coluna sem perfuração, definindo assim uma carga crítica adimensional (Pcr_{adim}).

De acordo com a Eq. (16), para as de frações volumétricas $\phi = 0.05$ e $\phi = 0.10$ foram realizadas oito perfurações equidistantes, conforme a Fig.8, e para as de frações volumétricas

$\phi = 0.15$ e $\phi = 0.20$ foram realizadas dezesseis perfurações equidistantes ao longo do tubo estrutural, conforme Fig. 9.

É importante destacar ainda que foi respeitado um espaçamento mínimo de 30 mm entre furos e entre as arestas dos furos e as arestas dos perfis. Além disso, a primeira perfuração (próxima ao engaste) e a última perfuração (próxima à extremidade livre) foram posicionadas considerando o princípio de Saint-Venant.

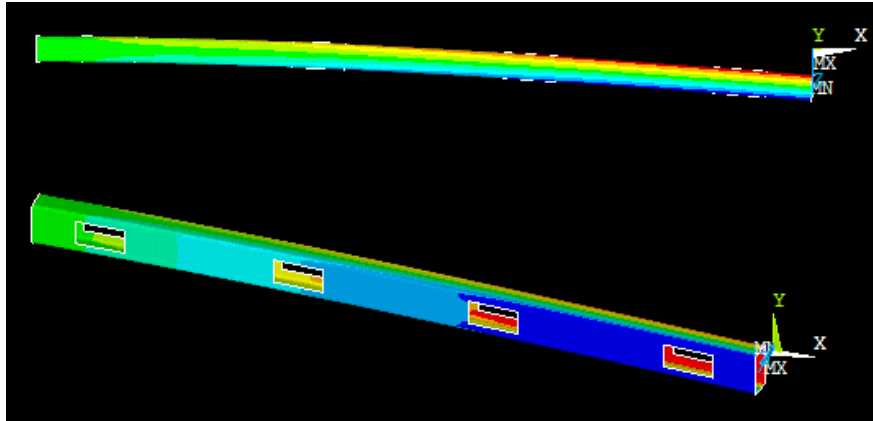


Figura 8. Tubos estruturais retangulares com oito perfurações

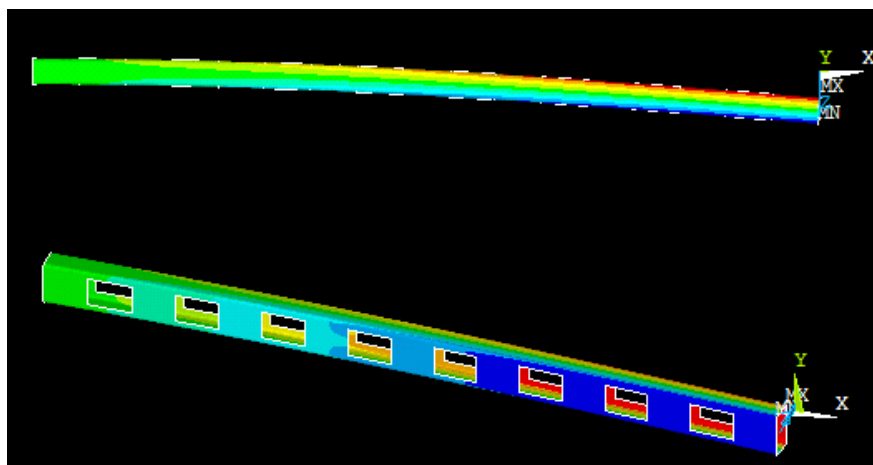


Figura 9. Tubos estruturais retangulares com dezesseis perfurações

A Fig. 10 mostra como ocorre a variação da carga crítica adimensional de flambagem em função da variação do grau de liberdade H_0/L_0 para os diferentes valores de fração volumétrica considerados nesse trabalho.

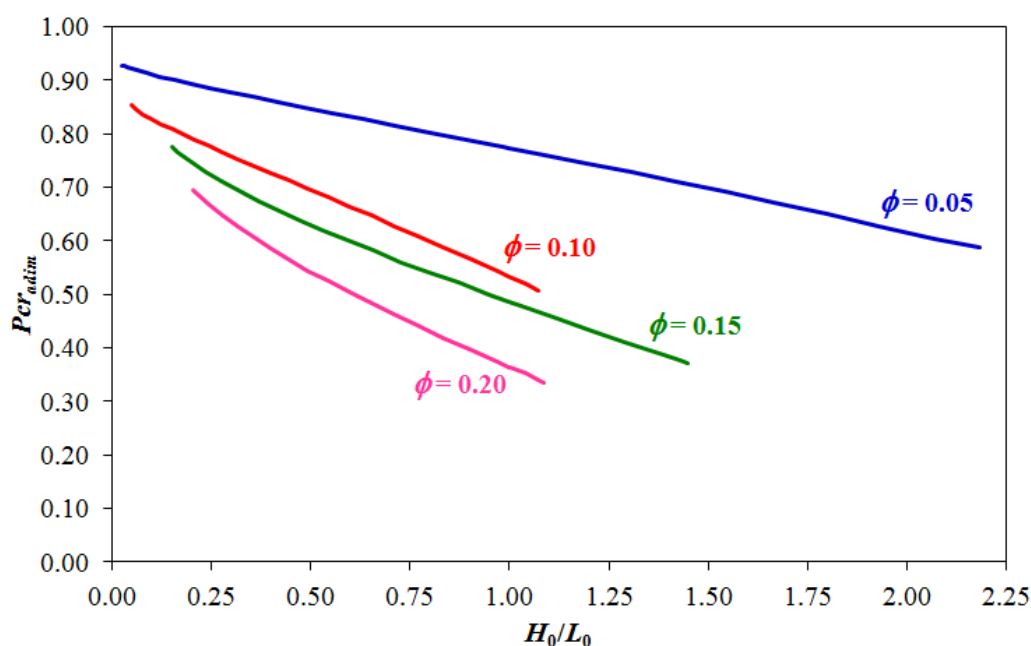


Figura 10. Variação de P_{cr_adim} em função de H_0/L_0

É possível perceber na Fig. 10 que o aumento da razão H_0/L_0 causa uma redução no valor de P_{cr_adim} para todas as frações volumétricas consideradas. Essa diminuição do valor da carga crítica possui uma tendência praticamente linear. Além disso, como já era esperado, o aumento no valor de ϕ causa uma redução nos valores de P_{cr_adim} .

Ainda referente à Fig. 10 é possível observar que para os valores $\phi = 0.05, 0.10, 0.15$ e 0.20 a aplicação do método *Constructal Design* possibilitou a definição de geometrias otimizadas onde o valor da carga crítica teve, respectivamente, uma melhoria de 58.21%, 70.56%, 109.15% e 107.48%, quando comparada com a carga crítica da pior geometria para cada valor de ϕ .

A Fig. 10 também indica as geometrias otimizadas para o tubo estrutural perfurado sob flambagem. Considerando somente essas geometrias otimizadas é possível avaliar como acontece a variação dos valores da carga crítica adimensional maximizada, $(P_{cr_adim})_m$, e da razão H_0/L_0 ótima, $(H_0/L_0)_o$, em função da variação da fração de volume, ϕ , como é mostrado na Fig. 11.

A Fig. 11 indica que o aumento do valor de ϕ causa uma diminuição de $(P_{cr_adim})_m$, comportamento já identificado na Fig. 10, enquanto ocorre um aumento dos valores de $(H_0/L_0)_o$.

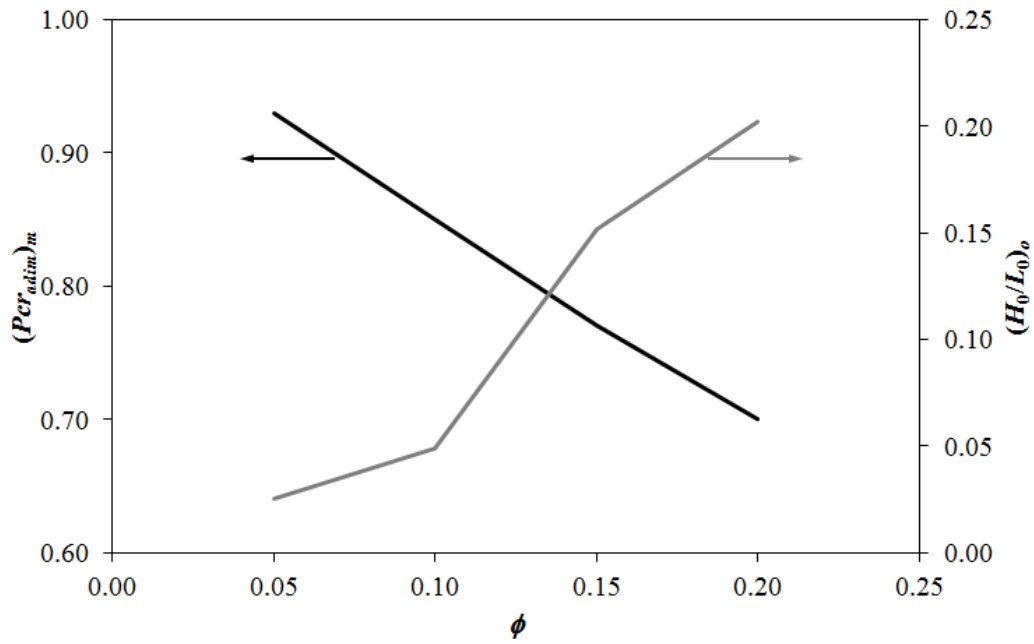


Figura 11. Variação de $(Pcr_{adim})_m$ e de $(H_0/L_0)_o$ em função de ϕ .

Por fim as Figs. 12, 13, 14 e 15 são apresentadas a configuração flambada da geometria otimizada da coluna, respectivamente, para $\phi = 0.05, 0.10, 0.15$ e 0.20 .

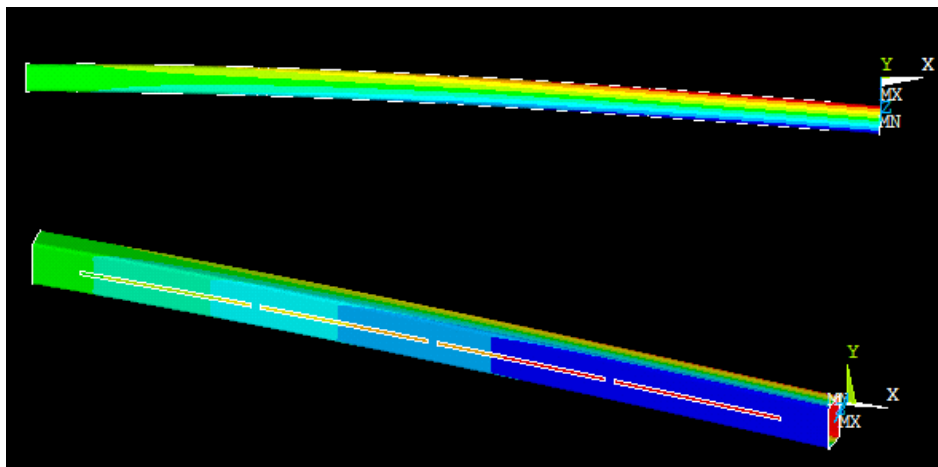


Figura 12. Configuração flambada geometria otimizada $\phi = 0.05$

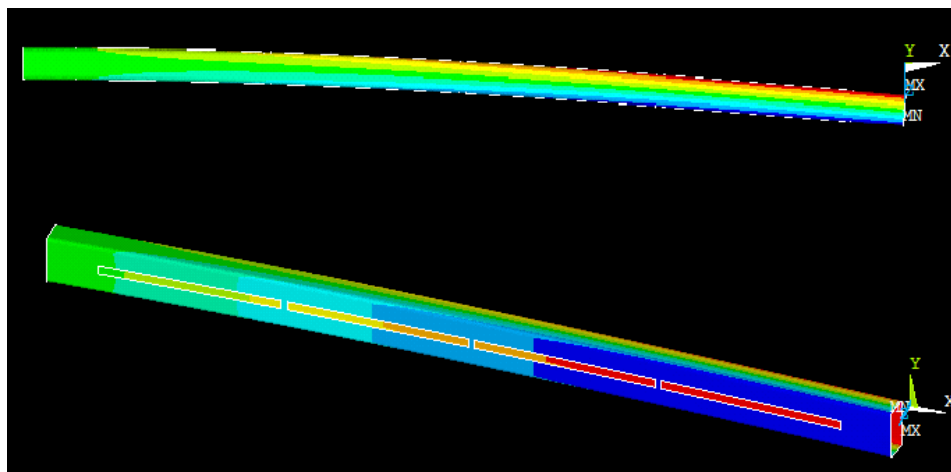


Figura 13. Configuração flambada geometria otimizada $\phi = 0.10$

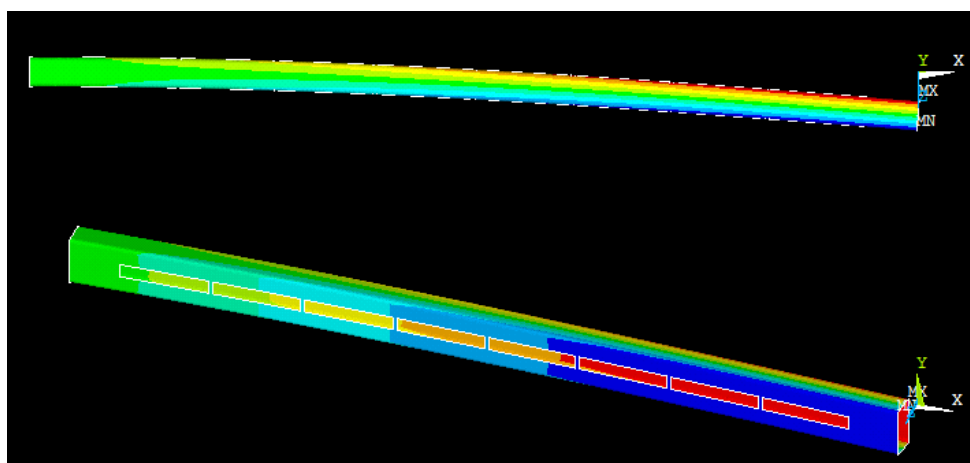


Figura 14. Configuração flambada geometria otimizada $\phi = 0.15$

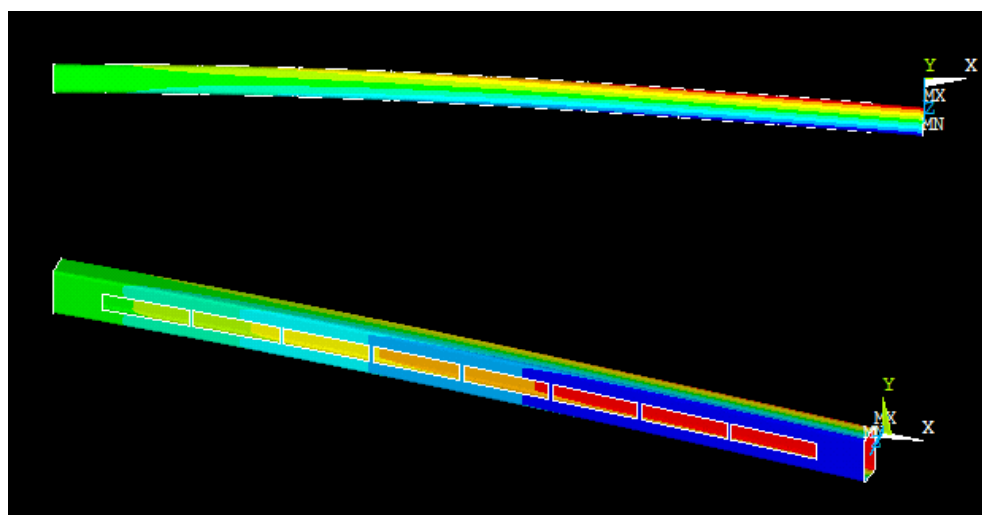


Figura 15. Configuração flambada geometria otimizada $\phi = 0.20$

É possível perceber nas Figs. 12, 13, 14 e 15 que as geometrias ótimas, para todos os valores de ϕ analisados nesse trabalho, sempre conduzem a uma configuração para a perfuração na qual sua maior dimensão, L_0 (ver Fig. 7), é paralela ao eixo longitudinal da coluna, conferindo à estrutura uma maior resistência à flambagem.

6 CONCLUSÕES

A importância de colunas perfuradas como membros estruturais é evidente em muitas aplicações de engenharia. Portanto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de obter a melhor geometria para perfurações retangulares dispostas ao longo de um perfil estrutural de seção transversal também retangular, visando a maximização da carga crítica de flambagem.

Os resultados do presente trabalho indicam que é possível empregar o método *Constructal Design* para estudos de otimização geométrica em problemas de mecânica dos sólidos, com a mesma eficácia que é obtida em estudos envolvendo problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor. Isso é comprovado pelas melhorias de 58.21%, 70.56%, 109.15% e 107.48%, respectivamente, para valores de $\phi = 0.05, 0.10, 0.15$ e 0.20 , que foram obtidas apenas variando a forma da perfuração através do grau de liberdade H_0/L_0 .

Sendo assim, justifica-se o uso do método *Constructal Design* na análise de colunas perfuradas sob flambagem e, para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de outros valores de ϕ , bem como a investigação da influência de outros tipos de perfuração (elíptica, oblonga, hexagonal, entre outras).

REFERÊNCIAS

- Alonso, R. C. A. et al., 2014. Modelagem Computacional aplicada à Flambagem Elástica de Colunas Perfuradas. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v.7, n. 2, p. 12-22.
- Ansys, User's Manual (version 10.0), 2005. Houston. Swanson Analysis System Inc.
- Bejan, A.; Lorente, S., 2008. *Design with constructal theory*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Lorente, S.; Lee, J.; Bejan, A., 2010. The “flow of stresses” concept: the analogy between mechanical strength and heat convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 53, p. 2963-2968.
- Bejan, A.; Zane, J. P., 2011. *Design in nature: how the constructal law governs evolution in biology, physics, technology, and social organization*. 1ª. ed. New York: Doubleday, v. III.
- Bellei, I. H., 1998. *Edifício estruturais em aço: Projeto e cálculo*. 2ª. ed. São Paulo: Pini.
- Beer, F. P.; Johnston, Jr. E. R., 1995. *Resistência dos Materiais*, 3.º Ed. Makron Books.
- Beer, F. P.; Johnston Jr., E. R.; DeWolf, J. T. Mazurek, D. F., 2011. *Mecânica dos materiais*. 5ª Edição. Editora Bookman.
- Cheng; Zhao, J., 2010. *Strengthening of perforated plates under uniaxial compression: Buckling analysis*. *Thin-Walled Structures*, v. 48, p. 905-914.
- Correia, A. L. G. et al., 2013. *Constructal Design aplicado a placas com furos elípticos sob flambagem*. *Vetor*, Rio Grande, v. XXIII, p. 18-31.
- Dias, L. A. D. M., 2008. *Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem*. 6ª. ed. São Paulo: Ziguarte.
- El-sawy, K. M.; Sweedan, A. M. I.; Martini, M. I., 2009. *Major-Axis Elastic Buckling of axially loaded castellated steel columns*. *Thin-Walled Structures*, 47.11, p. 1295-1304.
- Gere, J. M., 2003. *Mecânica dos materiais*. São Paulo: Thomson.
- Gomes, M.; Lima, D. S., 2014. *Análise Numérica do Comportamento Mecânico de Perfis de Aço, Submetidos à Flambagem Elástica*. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- Hibbeler, R. C., 2010. *Resistência dos materiais*. Tradução Arlete Simile Marques. Revisão técnica Sebastião Simões da Cunha Jr. 7. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- Lorente, S.; Lee, J.; Bejan, A., 2010. The “flow of stresses” concept: The analogy between mechanical strength and heat convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Maliska, C. R., 2004, *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 453 p.
- Madenci, E.; Guven, I., 2006. *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®*. Ed. Springer.
- Moen, C. D.; Yu, C., 2010. *Elastic buckling of thin-walled structural components with edge-stiffened holes*. 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Geometric optimization based on the constructal design of perforated thin plates subject to buckling Conference. Orlando.

- Moen, C. D.; Schafer, B. W., 2008. *Direct strength design of cold-formed steel member with perforations*. Research Report The Johns Hopkins University. Department of Civil Engineering. Baltimore.
- Moen, C. D.; Grey, C. N., 2011. *Elastic buckling simplified methods for cold-formed columns and beams with edge-stiffened holes*. Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council. Pittsburgh.
- Pfeil, W.; Pfeil, M., 2012. *Estruturas de aço: dimensionamento prático*. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Real, M.V.; Isoldi, L.A., 2010. *Finite element buckling analysis of uniaxially loaded plates with holes*. in: Southern Conference on Computational Modeling. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, p. 69-73.
- Rocha, L. A. O. et al., 2012. *Computational Thermal Sciences: An International Journal*, v. IV, p. 119-129.
- Rocha, L.A.O. et al., 2013. *Constructal Design Applied to the Elastic Buckling of Thin Plates with Holes*. Central European Journal of Engineering", Vol. 3, p. 475-483.
- Shanmugam, N. E., 1997. *Openings in Thin-Walled Steel Structures*. Thin-Walled Structures, v. 28, p. 355-372.
- Shanmugam, N. E.; Dhanalakshmi, M., 2001. *Design for openings in cold-formed steel channel stub columns*. Singapore, Thin-Walled Structures, 39, 167-187.
- Silva, G. G. D., 2011. *Análise teórico-experimental de colunas curtas perfuradas*, Ouro Preto.
- Teixeira, G. de M.; Kessler, M.P.; Maliska, C.R., 2009. *Fontes de erro: identificar, quantificar e reduzir a intervalos aceitáveis*. Artigo técnico. Disponível em: http://www.esss.com.br/blog/wp-content/uploads/2009/09/ESSS_Artigo_Tecnico_21.pdf
- Timoshenko, S. P.; Gere, J. E., 1984. *Mecânica dos sólidos*. Rio de Janeiro: LTC, v. II.
- Tubos de aço retangulares. (s.d.). Disponível em Tubonasa aços LTDA: <http://www.tubonasa.com.br/produtos/tubos-de-aco-retangulares/> Acesso em: 1º de abril de 2015.
- Tubos de aço: Metalon., 2012. Disponível em Indústria e tecnologia: <http://www.industriaetecnologia.com.br/industria/tubos-de-aco-metalon/>. Acesso em: 1º de abril de 2015.