



VII SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 23 à 25 de Novembro de 2016

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COLUNAS EM TUBOS PERFURADOS SUBMETIDOS À FLAMBAGEM ELÁSTICA ATRAVÉS DO MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL

João Paulo Silva Lima¹, André Pereira Ramos², Bolívar Zanella Ribeiro³, Elizaldo Domingues dos Santos⁴, Luiz Alberto Oliveira Rocha⁵, Mauro de Vasconcellos Real⁶, Liércio André Isoldi⁷.

^{1,2,3,4} Universidade Federal do Rio Grande

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Av. Itália, km 8, Bairro Carreiros, CEP 96.201-900, Rio Grande, RS, Brasil

¹ joao_p_1005@hotmail.com

² andreramos2209@gmail.com

³ b.zanella108@gmail.com

⁴ elisaldosantos@furg.br

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

R. Sarmento Leite, 425 - 2º Andar, CEP 90.050-170, Porto Alegre, Brasil

luizrocha@mecanica.ufrgs.br

^{6,7} Universidade Federal do Rio Grande

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Av. Itália, km 8, Bairro Carreiros, CEP 96.201-900, Rio Grande, RS, Brasil

⁶ mauroreal@furg.br

⁷ liercioisoldi@furg.br

RESUMO

Os tubos metálicos estruturais são componentes empregados nas obras de engenharia devido à sua eficiente vida útil e facilidade de utilização. Quando são esbeltos, os tubos podem sofrer o fenômeno de flambagem. Submetidos à presença de perfurações, apenas análises experimentais ou numéricas podem ser empregadas para obter o valor da carga crítica de flambagem elástica. Assim, desenvolveu-se um modelo computacional no software ANSYS, baseando no Método dos Elementos Finitos (MEF) para a análise da influência de perfurações no comportamento mecânico da peça. Além disso, empregou-se o Método Design Construtal para determinar geometrias que possam avaliar a presença de perfurações no tubo, além da influência da variação geométrica dos furos, retangulares, circulares e hexagonais, na carga crítica de flambagem. Sendo assim, o trabalho objetiva determinar a geometria ótima para as perfurações inseridas nos tubos, considerando o parâmetro ϕ dado como o volume removido e o volume total da coluna igual a 0,05; 0,10; 0,15 e 0,20, com um grau de liberdade variando a forma geométrica do furo. Por fim, o estudo mostrou que a relação de volume retirado e a carga crítica de flambagem são inversamente proporcionais, onde se teve uma geometria ótima para todos os valores de ϕ , prevalecendo a geometria retangular em todas as variações volumétricas.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas de aço cada vez mais estão ganhando espaço nas construções, uma vez que sua aplicação se adequa facilmente aos moldes arquitetônicos e ao ambiente. Além do mais, as estruturas metálicas possuem uma fácil aplicação e uma eficiente vida útil, pois não se deformam ou diminuem ao longo do tempo, quando comparada ao concreto armado, tornando-se mais desejável para ser utilizado na construção (Abed et al, 2015).

Segundo Dhanalakshri e Shanmugam (2000), a aplicabilidade de colunas de paredes finas em aço pode ser muito melhorada, efetuando perfurações simples e múltiplas no corpo de vigas e colunas. Essas perfurações são utilizadas na redução de peso e material, facilitar o acesso a serviços e inspeções, passagem de cabos elétricos e tubulações, além de atender a requisitos estéticos. Para a realização da análise estrutural dos tubos perfurados é preciso levar em conta o efeito de enfraquecimento da estabilidade local sobre a força da seção de aço, a qual se torna altamente complexa, devido à sua dependência da forma da seção transversal, material e da geometria do mesmo, fazendo com que os efeitos de perfurações influenciem no seu comportamento mecânico.

Quando uma peça vertical é sujeita à compressão centrada, a mesma é denominada coluna. Sendo submetida ao esforço de compressão, a peça apresenta susceptibilidade a encurvar-se ao atingir a força crítica. A esse fenômeno denomina-se flambagem, que se caracteriza como um modo de falha que se observa em membros de compressão devido principalmente a instabilidade estrutural. A carga crítica sofrida, depende principalmente da esbelteza do membro a ser analisado. Para os membros sob ação da compressão, uma carga maior flambagem acarreta a um maior modo de instabilidade deformado, podendo ocorrer falha do material, no momento em que a carga de compressão ultrapassa a tensão de escoamento do aço a ser utilizado (Pfeil, 2012; Abed et al, 2015).

De acordo com Bejan e Lorente (2006) a melhoria da configuração de sistemas para alcançar um melhor desempenho é o ponto ideal da engenharia. Fazendo com que o conhecimento técnico e científico, quando combinado com a prática e a experiência sejam referência à projetos de sistemas artificiais para determinado fim. Atualmente, com o advento das ferramentas computacionais, é possível simular e avaliar diferentes arquiteturas de fluxos em diferentes graus de liberdade.

A aplicação da Teoria Construtal ainda não é muito explorada na área de mecânica dos sólidos, visto que a mesma já se encontra disseminada em análises de problemas de mecânica dos fluidos e de transferência de calor. Porém, de acordo com Lorente et al (2010), existe uma analogia completa entre a configuração de calor e de fluxo de um fluido com a configuração do fluxo de tensões. Dessa forma é possível considerar as estruturas sólidas sob esforços mecânicos como sistemas configurados de modo a facilitar o fluxo de tensões. Tornando esta aplicação uma ferramenta útil ao se determinar geometrias ótimas em uma determinada situação.

Existem estudos já realizados sobre elementos perfurados sob compressão axial, os quais serviram para avaliar a influência da presença de perfurações na carga crítica de flambagem em tubos estruturais. Dentre eles podemos citar. Shanmugam e Dhanalakshmi (2001), Moen e Schafer (2008), Silva (2011), Rocha et al. (2013) e Correia et al. (2013) e Alonso et al. (2014). Esses últimos 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.

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo realizar a otimização geométrica de tubos estruturais perfurados submetidos à flambagem elástica. O método Design Construtal será empregado para propor as configurações geométricas possíveis, que serão simuladas numericamente através do MEF no software ANSYS. Assim a técnica de otimização geométrica usada será o método de busca exaustiva, realizando uma comparação do comportamento mecânico entre todas as configurações geométricas propostas. A função objetivo consiste em maximizar a carga crítica de flambagem.

2. FLAMBAGEM DE COLUNAS

Segundo Gere (2003) a flambagem pode ser analisada observando o comportamento de estabilidade de uma coluna esbelta com extremidades apoiadas em pinos conforme a Fig. 1. A coluna é carregada por uma força vertical P que é aplicada através do centroide da seção transversal da extremidade. A coluna é perfeitamente reta de comprimento L e momento de inércia I (referente ao menor em valor) e feita de uma material elástico com modulo de elasticidade E e coeficiente de Poisson ν . A carga aplicada gera um momento fletor interno M e uma deflexão na seção transversal v .

De acordo com Gere (2003), o carregamento crítico correspondente à forma defletida para uma coluna (Fig. 1a) é determinado utilizando uma das equações diferenciais da curva de deflexão de uma viga, pois a coluna flambada flete como se fosse uma viga (Fig. 1b). Sendo assim, o momento fletor para uma coluna flambada é dada por:

$$EIv'' = M \quad (1)$$

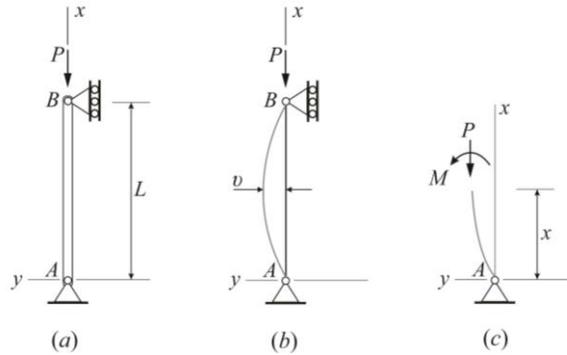


Figura 1. Coluna com extremidades apoiadas em pinos: (a) Coluna ideal, (b) forma em flambagem, (c) Força axial P e momento fletor M agindo na seção transversal. (Fonte: Gere, 2003).

O momento fletor M a uma distância x a partir da extremidade A da coluna flambada é ilustrado na Fig.1c. Como não existem forças horizontais presentes nos apoios, não há forças de cisalhamento na coluna. Por isso, do equilíbrio de momentos em relação a A se tem:

$$M + Pv = 0 \quad (2)$$

onde v é a deflexão na seção transversal.

A equação diferencial para a curva de deflexão da Eq. (1) agora se torna:

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = -Pv \quad (3)$$

Resolvendo essa equação diferencial linear homogênea de segunda ordem, pode-se determinar o carregamento crítico e o perfil defletido da coluna flambada.

Por conveniência, escrevendo a solução geral da equação diferencial (Eq. (3)), introduz-se a notação:

$$k = \sqrt{\frac{P}{EI}} \quad (4)$$

em que k é sempre tomado como uma quantidade positiva. Dessa forma a Eq. 3 pode ser reescrita como

$$\frac{d^2v}{dx^2} + k^2v = 0 \quad (5)$$

A solução analítica de uma equação diferencial linear, de segunda ordem, homogênea e com coeficientes constantes é bem conhecida e pode ser escrita na forma:

$$v = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx \quad (6)$$

em que C_1 e C_2 são constantes de integração determinadas pelas condições de contorno nas extremidades da coluna, isto é, a deflexão é zero quando $x = 0$ e $x = L$.

$$v(0) = 0 \text{ ou } v(L) = 0 \quad (7)$$

A primeira condição fornece $C_2 = 0$, e por isso:

$$v = C_1 \sin kx \quad (8)$$

A segunda condição fornece:

$$C_1 \sin kL = 0 \quad (9)$$

Sendo assim, conclui-se que $C_1 = 0$ ou $\sin(kL) = 0$.

Por ser constante $C_I = 0$, a deflexão v também será nula, mantendo a coluna reta. Além do mais, nota-se que a Eq. (9) será satisfeita para qualquer valor de kL , conseqüentemente, o carregamento axial P poderá ser qualquer valor.

A segunda possibilidade para satisfazer a Eq. (9) é dada pela seguinte equação, conhecida como equação de flambagem:

$$\sin kL = 0 \quad (10)$$

Ela é satisfeita quando $kL = 0, \pi, 2\pi, \dots$. Porém, quando $kL = 0$, tem-se $P = 0$, logo essa solução não interessa. Sendo assim, considera-se:

$$kL = n\pi \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

Essa equação apresenta valores de P os quais satisfazem a equação de flambagem e fornece soluções para a equação diferencial. O menor carregamento crítico para uma coluna com extremidades apoiadas por pinos é obtido quando $n = 1$:

$$P = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (12)$$

3. MODELAGEM COMPUTACIONAL

De acordo Manrique (1989), métodos numéricos são altamente empregados em análises estruturais. Especificamente se tratando de soluções da grande maioria dos problemas de painéis sob esforços mecânicos, as mesmas são praticamente impossíveis de se resolver quando se tenta por meio da aplicação das equações diferenciais da teoria da elasticidade. Para a análise desses problemas, segundo Maki (1968) se procura outros métodos de solução. Um destes métodos tem sido designado no Método dos Elementos Finitos (MEF), o qual resulta soluções aproximadas para esses problemas.

O Método dos Elementos Finitos baseia-se na decomposição do domínio de integração em um número finito de subdomínios (elementos finitos) transformando o meio contínuo em discreto. A divisão de domínio é nomeada de rede de elementos finitos, onde os pontos de intersecção das linhas dos elementos são denominados nós. Apesar de cada elemento ter o comportamento arbitrado de forma aproximada, a malha dos elementos se comporta de forma semelhante ao contínuo original. Além disso, no modelo de deslocamentos presente no MEF, um campo de deslocamentos nodais é arbitrado, fazendo com que a interação de componentes de tensão entre elementos adjacentes seja substituída pela interação de forças nodais entre os elementos. Sendo assim, o equilíbrio infinitesimal considerado no modelo matemático do meio contínuo é substituído pelo equilíbrio presente em cada elemento finito, trocando-se as equações diferenciais de equilíbrio por equações algébricas do elemento como um todo (Assan, 2003; Soriano, 2003). A teoria básica envolvendo o método dos elementos finitos é bastante difundida, podendo ser encontrada facilmente na literatura como Zienkiewicz (1971), Gallagher (1975) e Przemieniecki (2009).

O software ANSYS, que é baseado no MEF, foi empregado no desenvolvimento dessa pesquisa. Como o estudo é relacionado a tubos estruturais de paredes finas, optou-se pelo uso do elemento SHELL93 (Fig. 2), que é um elemento do tipo casca estrutural 2D.

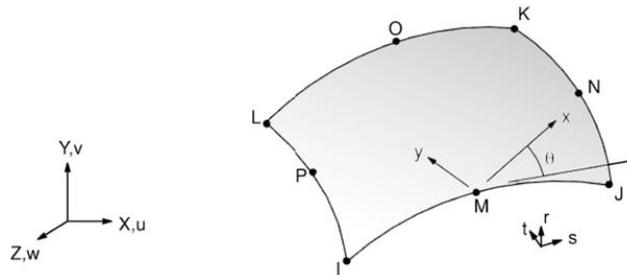


Figura 2. Elemento finito SHELL93 (Fonte: Kohnke, 1999).

De acordo com Kohnke (1999), o elemento SHELL93 é um elemento finito do tipo casca de caráter isoparamétrico. Cada um de seus oito nós possui seis graus de liberdade, sendo três translações nas direções x , y e z , além de três rotações também em torno desses eixos.

Caracterizado como um elemento finito 2D, é considerado de caráter tridimensional devido à sua não restrição ao plano x - y , podendo ser empregado em qualquer posição do espaço tridimensional, além de ser deformável na direção

fora de seu plano. Os elementos finitos tipo casca são usados para modelar componentes estruturais que possuem espessura pequena. Podem ser carregados em seu plano (carregamentos de membrana) bem como fora de seu plano por momentos fletores e/ou torsões. Além disso, o elemento finito SHELL93 pode considerar grandes deslocamentos e plasticidade (Dufour, 2003; Ross, 2011).

A necessidade de uma grande acuracidade no resultado e a qualidade da malha a ser trabalhada são fatores preponderantes que possibilitam a diferenciação dos valores aceitáveis para os desprezíveis. Para a verificação da malha a ser adotada considerou-se um tubo perfurado, onde se adotou elementos regulares do tamanho de 11,45 mm, definido a partir de um teste de convergência de malha.

De acordo com Madenci e Guven (2006), para a análise numérica de flambagem elástica foi adotada a análise elástica de autovalores. A solução de equações algébricas homogêneas foram utilizadas para analisar as equações de equilíbrio por elementos finitos para esse tipo de análise. O autovalor mais baixo corresponde à carga crítica de flambagem e o autovetor a ele associado representa o primeiro modo de flambagem.

3.1 Análise linear de flambagem

De acordo com Madenci e Guven (2006), para a análise numérica de flambagem foi adotado o método elástico de autovalores. A solução de equações algébricas homogêneas foi utilizada para analisar as equações de equilíbrio por elementos finitos para esse tipo de análise. O autovalor mais baixo corresponde à carga crítica de flambagem e o autovetor a ele associado representa o primeiro modo de flambagem.

Para essa formulação, segundo Przemieniecki (2009), são considerados tanto os termos lineares como os não-lineares. Assim, tem-se a matriz de rigidez total $[K]$, que é obtida pela soma da matriz de rigidez convencional para pequenas deformações, $[K_E]$, com a matriz de rigidez geométrica $[K_G]$. A matriz $[K_G]$ além da geometria, depende também do esforço normal de compressão existente no início do carregamento, $\{P_0\}$. Sendo assim, o tubo irá possuir um deslocamento total $\{U\}$ associado a um nível de carga $\{P_0\}$ que é dado por:

$$\{U\} = \left[[K_E] + \lambda [K_G] \right]^{-1} \lambda \{P_0\} \quad (13)$$

onde λ é um escalar.

Na análise de flambagem, o tubo tem um grande crescimento nos deslocamentos sem crescimento da carga. Matematicamente é possível determinar a matriz inversa de forma que, os deslocamentos $\{U\}$ tendem a infinito quando:

$$\det \left[[K_E] + \lambda [K_G] \right] = 0 \quad (14)$$

A Eq. (14) representa um problema de autovalores, que ao ser resolvido gera o menor autovalor, λ_1 , que corresponde à carga crítica $\{P_{cr}\} = \lambda_1 \{P_0\}$ ocorrendo flambagem. Além disso, o vetor de deslocamento associado $\{U\}$ define o modo de flambagem. O problema de autovalores é resolvido usando o método numérico de Lanczos.

3.2 Domínio Computacional

Para o referente estudo foi escolhido um tubo estrutural de caráter comercial. Optou-se por um perfil de aço comercializado pela empresa Vallourec, de caráter retangular cujas características do modelo e do material do mesmo são mostradas na Fig. 3 e Tab. 1.

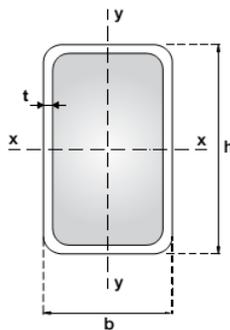


Figura 3. Perfil transversal do tubo estrutural adotado.

Tabela 1. Características da geometria e do material do tubo estrutural adotado.

Características	Perfil
E (GPa)	210
ν	0.3
h (mm)	280
b (mm)	240
L (mm)	6000
t (mm)	12.5
A (mm ²)	12200
I_{xx} (mm ⁴)	12900x10 ⁴
I_{yy} (mm ⁴)	10190x10 ⁴

onde h é a largura, b a altura da seção transversal retangular, L o comprimento, t sua espessura, A é a área de seção transversal do tubo estrutural e I_{xx} e I_{yy} são os momentos de inércia de área, nas direções x e y , respectivamente.

Foi considerada uma viga engastada em uma extremidade e livre na outra. Portanto, segundo Hibbeler (2010), uma coluna engastada na base e livre no topo suportará apenas um quarto da carga crítica que pode ser aplicada a uma coluna apoiada por pinos em ambas às extremidades. Dessa forma, a curva de deflexão é metade da curva para uma coluna acoplada com pinos. Sendo assim, o comprimento efetivo entre os pontos de momento nulo é $L_e = 2L$.

Por fim, será aplicada na extremidade livre da coluna (em $z = L$) 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 $z = 0$) impõe que suas translações e rotações são nulas, representando um engaste.

3.3 Verificação do modelo computacional

A partir do teste de independência da malha tem-se a análise numérica para a coluna inicialmente sem furos para qual obteve-se uma carga crítica no valor de $P_{cr} = 1494,38$ kN. Utilizando a Eq. 13 obteve-se uma carga crítica analítica $P_{cr} = 1466,66$ kN. Analisando os dois resultados, pode-se perceber uma diferença percentual de 1,88% entre o modelo numérico e a solução analítica. Esse valor satisfaz a verificação do modelo computacional. O estado flambado para o tubo inicialmente sem furos é apresentado na Fig. 4.

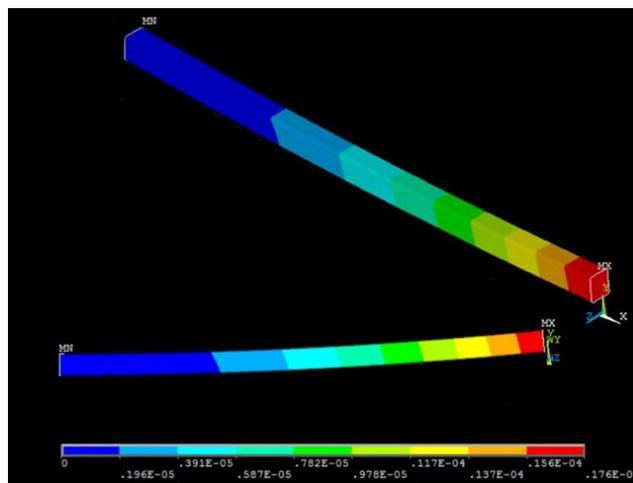


Figura 4. Estado flambado do tubo inicialmente sem furo.

4. O MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL

A melhoria da configuração nos sistemas para que se tenha um melhor desempenho é o principal objetivo na engenharia. Antigamente, o conhecimento técnico- científico combinado com a prática e intuição orientou os engenheiros na concepção dos sistemas de engenharia para fins específicos. Porém, a crescente presença das ferramentas computacionais nas pesquisas tem permitido a simulação e avaliação de geometrias com diversos graus de liberdade, ou seja, geometrias com configurações geométricas mais complexas (Bejan e Lorente, 2006).

Existe um princípio, que de acordo com Bejan e Lorente (2006) resume observações comuns que se um sistema de fluxo possui liberdade suficiente para alterar a sua configuração, em seguida, o sistema exibe configurações que permitem, progressivamente, melhores vias de acesso para as correntes que nele fluem. Este princípio foi formulado em 1996 como a Lei Construtal da geração de configuração de fluxo e evolução, de forma que para um sistema de fluxo persistir no tempo, o mesmo deve evoluir de tal modo que proporcione o acesso mais fácil para as correntes que fluem através dele. Estes estudos têm uma importância significativa, sendo o ponto de partida para a ampliação e aplicação da Teoria Construtal a problemas de engenharia e outros ramos da ciência (Bejan e Lorente, 2008). Além disso, a Teoria Construtal tem sido também utilizada para explicar a geração determinística de formas na natureza (Bejan, 2000).

De acordo com Bejan (2000), as questões relacionadas à geometria são o foco das lições que envolvem a Teoria Construtal. Além de que, o princípio é o mesmo em engenharia e na natureza: a otimização dos sistemas de fluxo sujeitos a restrições geram a forma e a estrutura (Bejan, 2000).

Reis (2006) afirma que a Teoria Construtal conseguiu atrair muitos educadores e pesquisadores de diversas áreas (engenharia, física, biologia, sociologia, dentre outras), que juntos possuem uma nova direção, que consiste em aplicar a Lei Construtal para uma melhor engenharia, além de uma melhor organização de movimentação e conexão de pessoas, produtos e informações. Essa finalidade é denominada Método Design Construtal, que através dele, se obtém não só as melhores condições de geometria, mas também melhores estratégias, como rapidez, custo, direção, confiabilidade, para gerar a geometria que está se necessitando.

Sendo assim, o Método Design Construtal é aplicado na análise proposta de colunas perfuradas sob compressão axial, com a finalidade de se obter um arranjo geométrico, permitindo encontrar uma geometria que apresente o melhor comportamento. Definiu-se então, o parâmetro fração de volume (ϕ), correspondente à porcentagem de volume de material retirado (V_0) do volume total (V) de material tubo estrutural o qual será transformado em perfurações. Os furos presentes no tubo sofrem variações, que são acarretadas devido à mudança de formas geométricas dos mesmos. O parâmetro ϕ varia à medida em que se altera a forma das perfurações, as quais serão dos tipos circular, retangular e hexagonal. A fração de volume para os furos circular, retangular e hexagonal é dada respectivamente por:

$$\phi_{cir} = \frac{V_0}{V} = \frac{Nt\pi d^2}{4AL} \quad (15)$$

$$\phi_{ret} = \frac{V_0}{V} = \frac{NtH_0B_0}{AL} \quad (16)$$

$$\phi_{hex} = \frac{V_0}{V} = \frac{Nt3l^2\sqrt{3}}{2AL} \quad (17)$$

onde d é o diâmetro dos furos circulares, H_0 e B_0 são as dimensões características do furo retangular, l o lado do hexágono, 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, cujos valores são encontrados na Tab. 1.

Neste estudo foram feitas quatro diferentes análises para a fração de volume de forma que se tenham frações de volume $\phi = 0,05$; $0,10$; $0,15$ e $0,20$, conforme Fig. 5.

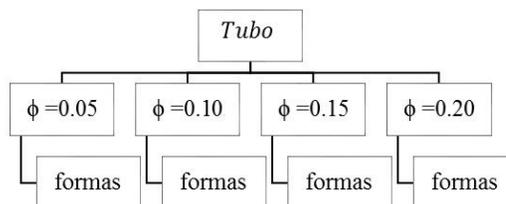


Figura 5. Fluxograma ilustrativo do processo de otimização.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através das Eq. 15, 16 e 17, para cada valor de ϕ , foram realizadas 38 perfurações equidistantes, conforme é esquematizado na Fig. 7. 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.

Como o objetivo da análise é verificar o quanto varia a carga crítica perante as perfurações, os valores obtidos numericamente para carga crítica de flambagem foram divididos pela carga crítica numérica da coluna sem perfurações, definindo dessa forma uma carga crítica adimensional (P_{crN}).

A Fig. 6 mostra como ocorreu a variação da carga crítica adimensional de flambagem, variando o grau de liberdade referente à cada forma geométrica dos furos (o diâmetro d para furos circulares, H_0 e B_0 para furos retangulares e l para os furos hexagonais), juntamente à variação da fração de volume proposta.

Através da Fig. 6 é possível perceber que, à medida que se aumenta o valor da fração volumétrica ϕ , como esperado, os valores para a carga crítica de flambagem P_{crN} diminuem. Essa redução, para todas as formas geométricas possuem caráter linear.

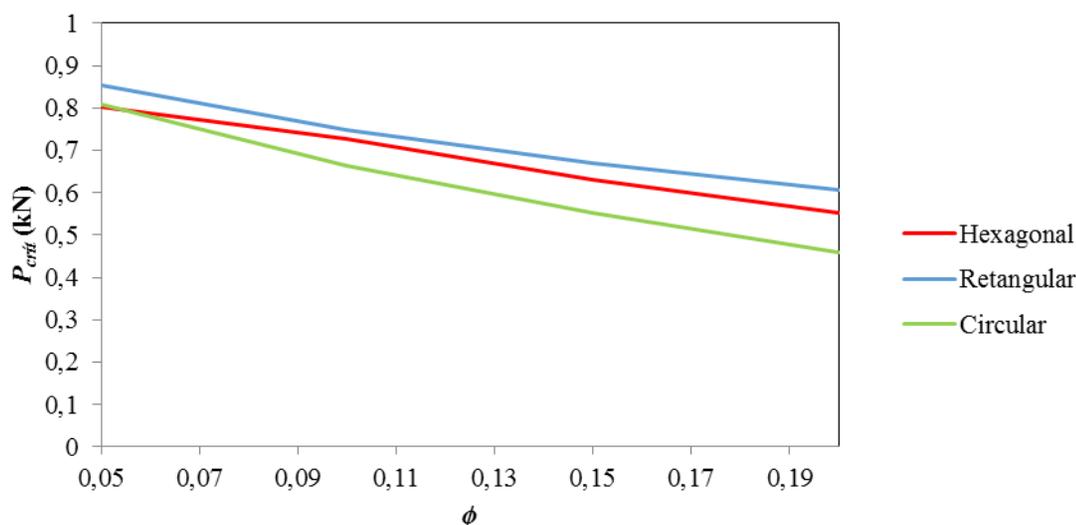


Figura 6. Efeito da variação da geometria sobre a variação volumétrica do tubo.

Ainda avaliando a Fig. 6 percebe-se que a aplicação método Design Construtal foi satisfatória, uma vez que, a determinação da geometria ótima foi possível de ser realizada. Dentre todos os casos analisados, as perfurações retangulares, para todas as frações volumétricas retiradas, foram as que apresentaram o melhor desempenho, sendo que o destaque vai para a situação em perfurações retangulares para a fração volumétrica $\phi = 0,05$, cuja $P_{crN} = 0,853$.

Ainda analisando as curvas presentes no gráfico da Fig. 6, percebe-se uma grande semelhança entre os valores de carga crítica entre os valores dos furos retangulares e hexagonais, analisando o mesmo valor de ϕ . Além disso, apesar de tratar de um furo próximo e semelhante ao furo circular geometricamente, o furo hexagonal, percebe-se que para todos os casos, exceto para $\phi = 0,05$, os furos circulares apresentaram um pior desempenho, quando comparados aos demais furos de diferentes formas. À medida em que se aumenta a fração de volume a ser transformado em furos, mais esse fenômeno é perceptível.

O melhor desempenho dos furos hexagonais e retangulares pode ser explicado pela própria geometria desses furos, a qual contém a presença de cantos vivos e arestas, tanto perpendiculares nos casos de furos retangulares, quanto arestas formando ângulos agudos entre si nos furos hexagonais. Segundo Agostinho (2009), as tensões se concentram com maior intensidade em cantos vivos, quando comparadas a furos circulares. Este fato evidencia a aplicação dos princípios da Teoria Construtal, evidenciando a importância do Design Constructal para a determinação de uma geometria que maximize a carga crítica das colunas perfuradas.

Através da Fig. 6, é possível observar que para os valores $\phi = 0,05$, $0,10$, $0,15$ e $0,20$, a carga crítica teve, respectivamente, uma melhoria para as geometrias circular, retangular e hexagonal de respectivamente 76,20%, 40,76%, 45,68%, quando comparada com a geometria de pior desempenho. Comparando para cada valor de ϕ , teve uma melhoria de 6,27%, 12,30%, 20,92% e 32,17% respectivamente para $\phi = 0,05$, $0,10$, $0,15$ e $0,20$. A seguir, na Fig. 7 é apresentada graficamente a situação flambada para o melhor caso de cada geometria analisada, ambos para

$\phi = 0,05$. Posteriormente, na Fig. 8 é apresentado o caso flambado para a situação com pior desempenho, que se refere à flambagem do tubo com perfurações circulares analisado com fração volumétrica de $\phi = 0,20$.



Figura 7. Melhor situação flambada para (a) tubo circular, (b) hexagonal, (c) retangular.

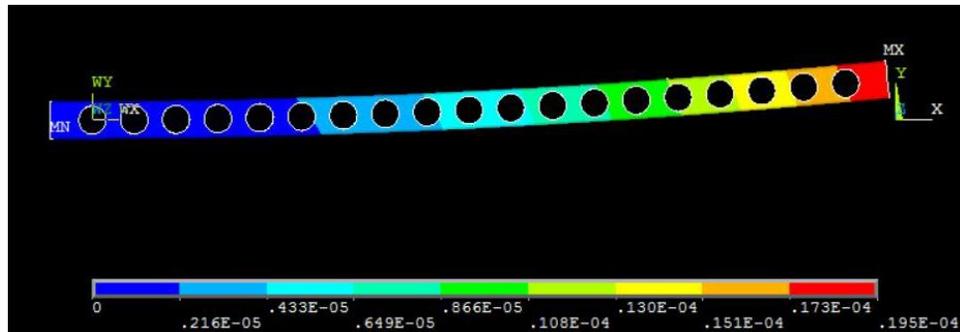


Figura 8. Situação mais crítica dos casos estudados.

6. CONCLUSÕES

Com o objetivo de determinar a geometria ótima para uma coluna perfurada, em diferentes situações de fração de volume e geometria de perfurações, tal estudo conseguiu atender as expectativas esperadas.

As análises numéricas feitas através do modelo computacional utilizando o software Ansys, permitiram verificar que como já era esperado, tais perfurações aplicadas no tubo estrutural reduziram a carga crítica dos mesmos. Porém, a novidade apresentada se encontra no método escolhido, mostrando que, é possível empregar o Design Construtal para estudos de otimização geométrica de peças estruturais atuando sobre esforços mecânicos, uma vez que, para tal estudo foi possível determinar que a geometria retangular seria a escolha ideal para a situação proposta.

Sendo assim, a melhoria evidente de 76,20%, 40,76%, 45,68% entre as geometrias circular, retangular e hexagonal, respectivamente justifica o uso do Método Design Construtal na análise de tubos estruturais perfurados sob esforços de flambagem.

Além disso, a análise do furo hexagonal permite verificar que o mesmo é muito próximo e semelhante ao furo circular, porém apresenta um melhor desempenho ao se analisar o tubo perfurado sob compressão axial. Sendo assim, se enfatiza sua vasta aplicação em componentes estruturais como vigas e colunas. Logo, tem-se como proposta a utilização de furos com a presença de cantos vivos para este determinado fim.

Por fim, esse estudo serve como ponto de partida a trabalhos futuros, podendo estes ser análises de diferentes valores de frações volumétricas, diferentes números e posições de perfurações, além de analisar outras geometrias que sirvam de comparação às geometrias abordadas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agustinho, S. R., 2009. “Análise da influência de furos horizontais em vigas de concreto armado”. Trabalho de conclusão de graduação em Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense.
- ANSYS, 2005. User’s manual (version 10.0). Swanson Analysis System Inc, Houston.
- Abed, Farid H.; Megahed, Mai; Al-Rahmani, Abdulla., 2015. On the improvement of buckling of pretwisted universal steel columns. Sharjah, UAE.
- Assan, A.E., 2003. Método dos Elementos Finitos: Primeiros Passos, Ed. Unicamp, Campinas, 298 p.
- Bejan, A., 2000. Shape and structure, from engineering to nature. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bejan, A., Lorente, S., 2006. The Constructal Law (La Loi Constructale). International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, pp. 445-445.
- Bejan, A., Lorente, S., 2008. Design with Constructal Theory. Wiley, Hoboken.
- Dhanalakshmi, M.; Shanmugam, N. E., 2000. Stub column tests on cold-formed steel angle sections. International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Paper 4. Missouri.
- Dufour, P., 2003. “Picking an Element Type for Structural Analysis”. Belcan Engineering Group, Inc., p. 5.
- Gallagher, R.H., 1975. Finite Element Analysis: Fundamentals. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Gere, J. M., 2003. Mecânica dos materiais. São Paulo: Thomson.
- Helbig, D.; Rocha, L. A. O.; Da Silva, C. C. C.; Dos Santos, E. D.; Real, M. V.; Isoldi, L. A., 2014. “Numerical Simulation and Constructal Design Method Applied to the Study of the Cutouts Shape Influence in the Mechanical Behavior of Perforated Plates Subjected to Buckling”. XXXV CILAMCE. Fortaleza.
- 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.
- Kohnke, P., 1999. ANSYS Theory Reference - Release 5.6. ANSYS, Inc., 11th Ed., pp. 1286.
- 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.
- Maki, A. C., 1968. Finite Element Techniques for Orthotropic Plane Stress and Orthotropic Plate Analysis. U.S. Forest Service, Research Paper, p. 87, Madson.
- Manrique, L. J. C., 1989. “Colapso de painéis planos enrijecidos”. Dissertação de conclusão de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Madenci, E.; Guven, I., 2006. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS. Ed. Springer.
- Pfeil, W.; Pfeil, M., 2012. Estruturas de aço: dimensionamento prático. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Przemieniecki, J. S., 1985. Theory of Matrix Structural Analysis. Ed. Dover Publications.
- Reis, A. H., 2006. “Constructal theory: from engineering to physics, and how systems flow develop shape and structure”. Applied Mechanics Reviews, v. 59, p. 269-281.
- Ross, C. T. F., 2011. Pressure Vessels: External Pressure Technology. 2ª Ed., Woodhead Publishing, Padstow, Cornwall, UK.
- Soriano, H.L., 2003. Método dos Elementos Finitos em Análise de estruturas, Edusp, São Paulo, 298 p.
- Tubos de aço: Vallourec., 2015. Disponível em: <http://www.vallourec.com/countries/brazil/pt/media/catalogues/paginas/default.aspx/>. acesso em: 10 de dezembro de 2015.
- Zienkiewicz, O.C., 1971. The finite Element Method in Engineering Science. 2ª ed. McGraw- Hill, London.