

Influência da geometria nos modos de flambagem de perfis formados a frio com seção transversal do tipo Sigma

Laura Araujo Nogueira^{1*}, Bianca Vieira Ávila^{2*}, Carolina Silva Oliveira^{3*}, Bernardo de Matos Silva Melo^{4*}, Hermes Carvalho^{5*}

*Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos, 6627 - Escola de Engenharia - Pampulha, Belo Horizonte, 31270-901, Minas Gerais, Brasil

¹laura.nogueira2@hotmail.com

²biancavieiraavila@gmail.com

³carolinasoliveira05@gmail.com

⁴bernardodematossilva@gmail.com

⁵hermes@dees.ufmg.br

Resumo. Os Perfis de aço Formados a Frio (PFF's) têm sido cada vez mais utilizados na construção civil, visto que apresentam um ótimo aproveitamento no aspecto econômico, além de ampla variedade de formas de seções transversais. Quando submetidos à compressão, seus elementos ficam susceptíveis à instabilidade, que se manifesta por meio de diferentes modos de flambagem influenciados pelas dimensões da barra e da seção transversal. Dentre os modos de flambagem, têm-se os modos globais (flexão, torção pura e flexo-torção), modos locais (flambagem local e distorção) e modo misto, que representa a interação dos modos local e global. Nesse contexto, para o estudo do perfil Sigma, o presente trabalho utiliza a simulação numérica para avaliar a influência do comprimento e das dimensões da seção transversal no comportamento dos perfis quando comprimidos. Para tanto, utilizou-se o programa ABAQUS, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), para obtenção dos modos de flambagem de diferentes configurações do perfil Sigma. Em seguida, para a validação e comparação dos dados, o perfil principal foi modelado no programa CUFSM, baseado no Método das Faixas Finitas (MFF).

Palavras-chave: perfis formados a frio; perfil sigma; modos de instabilidade.

1 Introdução

Devido à alta razão comprimento/espessura dos Perfis Formados a Frio (PFF's), estudar o comportamento de estabilidade torna-se primordial. Quando submetidos à compressão, esses perfis podem apresentar três modos de instabilidade: local, distorcional, e global [1,2]. Inoue *et al.* [2] afirmam que o modo distorcional é associado a dois fenômenos conjuntos: o giro da seção transversal, decorrente da baixa rigidez torsional, combinada com a flexão lateral, originada da baixa rigidez à flexão das mesas e enrijecedores. Na análise de PFF's, pode-se identificar os modos e as respectivas tensões de flambagem, sendo que o modo crítico é detectado em função do comprimento da barra submetida à compressão centrada ou à flexão [1]. Segundo Santos [3], as relações geométricas do elemento estrutural, as imperfeições iniciais e as propriedades mecânicas do material influenciam os modos de instabilidade e no valor da força crítica.

Nos últimos anos, diversas pesquisas considerando os modos de flambagem foram publicadas. Ren *et al.* [4] afirmam que a maioria desses estudos focaram na ocorrência de um modo de instabilidade isolado. Porém, para os perfis de aço formados a frio, a interação entre os modos de flambagem pode influenciar o cálculo da resistência final no comportamento pós-crítico. Tendo isso em vista, esse estudo tem como objetivo avaliar a influência do comprimento e da geometria da seção transversal nos modos de flambagem e na capacidade resistente dos perfis com seção transversal do tipo Sigma, submetidos à compressão pura. Os programas ABAQUS [5] e CUFSM [6] foram utilizados nesse estudo, possibilitando a comparação de ambos resultados em termos de força crítica e modos de flambagem.

2 Fundamentação teórica

Kubiak [7] afirma que os modos de flambagem de um perfil assim como suas forças críticas são influenciados pela rigidez, tipo de carregamento, condições de apoio, imperfeições iniciais e dimensões da seção transversal. Esses modos de flambagem associados a um determinado perfil podem ocorrer, simultaneamente ou sucessivamente, definindo assim os modos de instabilidade acoplados. Análises de flambagem de autovalor são importantes na previsão desses modos, uma vez que possuem elevada precisão [8].

Dessa maneira, em estudos numéricos, informações relacionadas às condições de contorno e à aplicação do carregamento são fundamentais para prever o comportamento real dos PFFs. No estudo de Zhang e Alam [8], foram considerados deslocamentos senoidais fora do plano aplicados em linhas nodais selecionadas previamente. Esses deslocamentos são calculados a partir da eq. (1). Com isso, os autores buscaram representar o comportamento do Método das Faixas Finitas (MFF), no qual tem-se a discretização do modelo ao longo do eixo longitudinal da barra.

$$u = \sin\left(\frac{pZ}{L}\right). \quad (1)$$

Onde: u é o deslocamento fora do plano; Z é a coordenada longitudinal de cada nó das linhas nodais no modelo; L é o comprimento total do elemento.

Nos nós mestres (nós da extremidade, nos quais $Z=0$) de cada uma dessas linhas, os autores aplicaram condições de contorno de simetria do tipo SYMM. Os outros nós foram tratados como “escravos”. Com isso, foi possível simular o deslocamento máximo no nó mestre, que corresponde ao centro do vão. Quanto à aplicação de força eterna, os autores adotaram carregamento de compressão uniformemente distribuído na seção transversal.

Casafont *et al.* [9] aplicaram condições de simetria em uma das extremidades do perfil para análise de flambagem linear utilizando o programa ANSYS, conforme mostrado na Fig.1. Na outra extremidade, os autores consideraram condições de contorno para representar o estado de simples apoio do modelo. Além disso, uma equação de restrição, semelhante à utilizada por Zhang e Alam [8], foi imposta aos nós localizados ao longo do comprimento da barra.

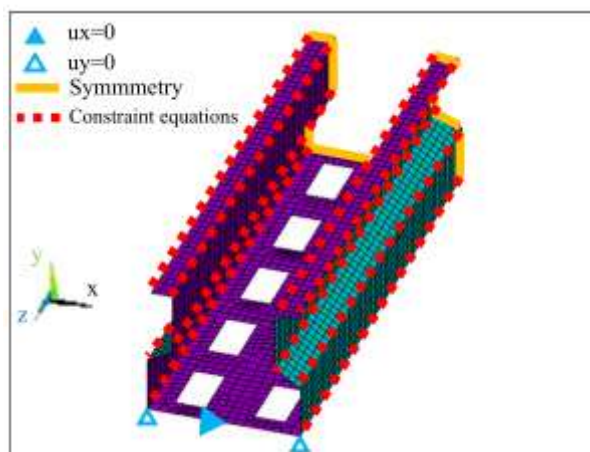


Figura 1. Condições de contorno e restrições longitudinais [9].

Em sua análise, Ren *et al.* [4] consideraram, nas direções fora do plano da seção transversal, restrições de deslocamentos em ambas extremidades, que também foram submetidas à um carregamento pontual no centróide da seção. Os demais nós constituintes da seção transversal foram acoplados ao ponto de referência localizado no centro geométrico utilizando a técnica do *Coupling Constraint*. Além disso, o nó central da alma, situado no meio do vão modelado, foi restrito na direção longitudinal com o intuito de impedir o movimento de corpo rígido nesta direção.

3 Metodologia numérica

Uma análise de flambagem linear foi realizada utilizando o programa comercial de elementos finitos ABAQUS [5], com o objetivo de reproduzir as instabilidades presentes em elementos com seção transversal Sigma. Esse tipo de análise apresenta soluções para um problema de autovetores e autovalores que correspondem à força crítica e os respectivos modos de flambagem. O Módulo de Elasticidade Longitudinal do material (E) foi considerado igual a 200 GPa e o coeficiente de Poisson igual a 0.3.

3.1 Geometria

Esse estudo foi composto por 217 modelos, sendo as dimensões da seção transversal apresentadas na Fig. 2. No estudo paramétrico realizado foram variadas a largura total da alma, a largura da mesa (b_2), a espessura e o comprimento a fim de avaliar a influência desses parâmetros. Para captar o comportamento de flambagem e seus respectivos modos, foram considerados comprimentos entre 50 mm e 3000 mm. Foram adotadas espessuras (t) iguais a 1,5 mm, 2,0 mm e 2,5 mm, alturas de 200 mm e 220 mm e b_2 de 63 mm e 72 mm. A Tabela 1 apresenta as seções transversais utilizadas na análise paramétrica.

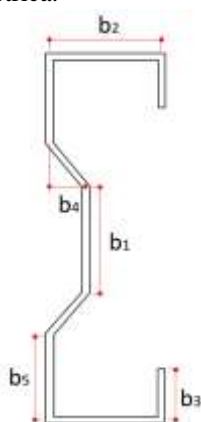


Figura 2. Seção transversal Sigma em estudo.

Tabela 1. Seções transversais usadas na análise paramétrica.

Modelos	Parâmetros adotados (mm)
Geometria de referência	$t=1,5$; $h=200$; $b_1=90$; $b_2=63$
Conjunto de modelos 2 (Var. Espessura 1)	$t=2,0$; $h=200$; $b_1=90$; $b_2=63$
Conjunto de modelos 3 (Var. Espessura 2)	$t=2,5$; $h=200$; $b_1=90$; $b_2=63$
Conjunto de modelos 4 (Var. Altura)	$t=1,5$; $h=220$; $b_1=90$; $b_2=63$
Conjunto de modelos 5 (Var. Mesa)	$t=1,5$; $h=200$; $b_1=90$; $b_2=72$
Comprimentos	50 a 3000

3.2 Malha utilizada e convergência da solução

Elementos de casca quadrilateral com integração total (S4) e integração reduzida (S4R), cujas dimensões largura e altura são maiores que a espessura, foram avaliados na discretização dos modelos. Devido ao menor custo computacional requerido pelo elemento S4R e resultados com pequenas diferenças entre ambos, optou-se por utilizar a integração reduzida nas análises. Um estudo de convergência de malhas foi realizado para avaliar a convergência dos resultados. A partir desse estudo, constatou-se que a malha de 5,0 mm apresentou bons resultados e foi, portanto, adotada como a referência dos modelos numéricos.

3.3 Condições de contorno e carregamento adotados

Segundo Li e Schafer [10], o programa CUFSM [6] reproduz modelos com condições de contorno gerais que estabelecem a *Signature Curve* (SC), decomposta a partir de soluções modais (Fig. 3). Essa curva considera os principais modos de flambagem isoladamente. Nesse sentido, para descrever esse comportamento e reproduzir esses modos, três condições de contorno foram utilizadas para cada faixa de comprimento correspondente a modos de flambagem distintos.

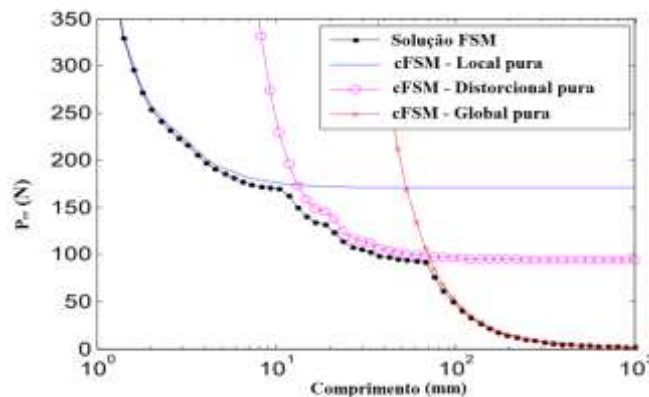


Figura 3. Decomposição modal do método computacional das faixas finitas - CUFSM (Adaptado de [10]).

Para a primeira faixa de comprimento (Fig. 4a), 50 a 130 mm, correspondente ao modo de flambagem local isolado, foi criado um ponto de referência no centro geométrico em ambas as extremidades da barra. Foi considerada a interação do tipo *coupling*, conectando o ponto de referência a toda seção transversal. O carregamento de compressão igual a unidade foi aplicado em um dos pontos de referência. Nesse mesmo ponto, os deslocamentos nas direções x e y e as rotações em torno do eixo z foram restritos. Na extremidade oposta, as mesmas condições de contorno foram consideradas com o acréscimo da restrição de deslocamento no eixo z.

Para a segunda faixa de comprimentos, caracterizadas por modos de flambagem distorcionais e mistos (Fig. 4b), 130 a 1500 mm, foram criadas três linhas de nós, sendo uma no centro da seção e dois próximos aos vértices, de modo que a deformação de todas as seções transversais possa ser efetivamente restringida (Zhang *et al.* [8]). Os respectivos deslocamentos fora do plano foram calculados de acordo com a eq. (1). Além disso, em um ponto nodal no centro do modelo, o deslocamento no eixo z foi restrito, e nas extremidades das seções transversais, os deslocamentos nos eixos x e y também foram impedidos. A força de compressão foi considerada distribuída na seção transversal.

Para descrever o modo de flambagem global (Fig. 4c), as condições de contorno, aplicadas à faixa de comprimento de 1500 a 3000 mm, foram semelhantes às usadas para o caso de flambagem local. Nesse caso, o carregamento de compressão unitário foi aplicado aos pontos de referência em ambas as extremidades, sendo os restritos os deslocamentos nos eixos x e y e as rotações em z. Ao centro do modelo, um nó teve o seu deslocamento no eixo z impedido.

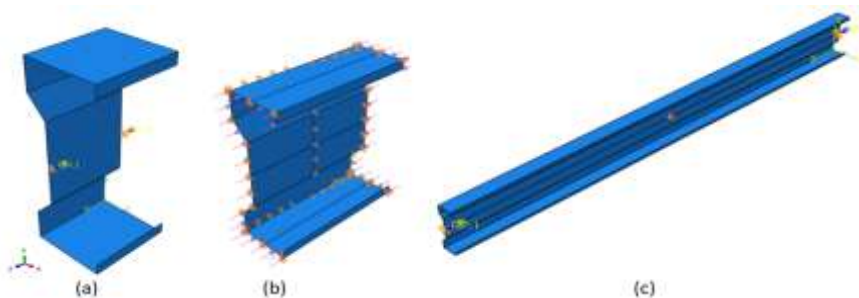


Figura 4. Condições de contorno e aplicação de força de compressão no modelo numérico para: a) flambagem local; b) flambagem distorcional e mista e c) flambagem global.

3.4 Validação do modelo numérico

O programa CUFSM [6] permite avaliar as instabilidades em PFF's sob tensões longitudinais uniformes [10]. Assim, foi realizada a validação numérica dos modelos gerados no programa ABAQUS [5] utilizando os resultados obtidos no CUFSM [6]. Para tal, a geometria de referência foi utilizada para comparação das forças críticas segundo diferentes comprimentos, com variação entre 50 mm a 3000 mm (Fig. 5).

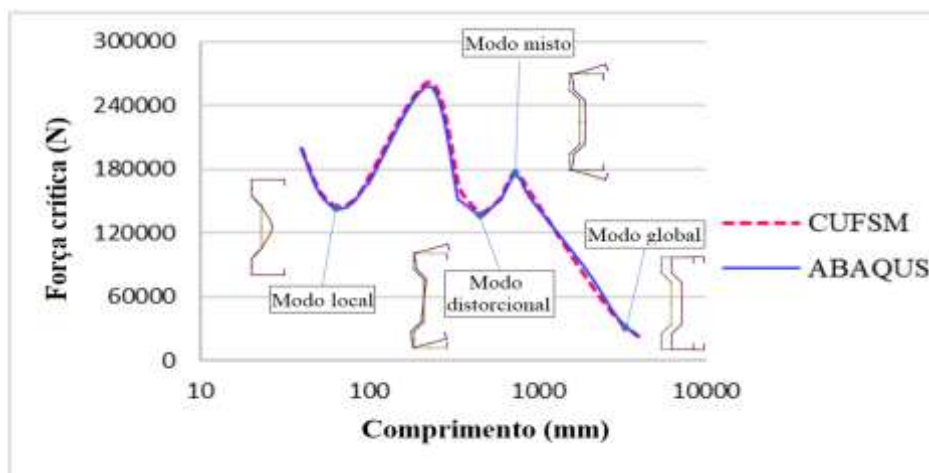


Figura 5. Comparação das forças críticas obtidas nos programas ABAQUS e CUFSM.

4 Resultados

Para analisar o comportamento do modelo numérico desenvolvido, elaboraram-se curvas de força crítica em função do comprimento do elemento, nas quais foram consideradas variações para espessura, altura da alma e largura da mesa em relação à geometria do modelo principal utilizado na validação.

Foram considerados perfis Sigmas com espessuras de 1,5, 2,0 e 2,5 mm, cujas curvas são apresentadas na Fig. 6. Como esperado, verificou-se que o aumento da espessura conduz a maiores valores de força crítica para todos os comprimentos e modos de flambagem analisados, uma vez que essa força está diretamente relacionada à esbeltez dos segmentos do perfil.

Em relação à altura, foram adotadas dimensões de 200 e 220 milímetros (Fig. 7). Observa-se que a largura da alma influencia significativamente nos comprimentos relacionados ao modo de flambagem local, que ocorre no elemento b_1 . Ressalta-se que o aumento da altura total da alma é consequência da variação desse elemento, visto que as demais partes constituintes da altura possuem dimensões fixas. Para os comprimentos em que é predominantemente a distorção e flambagem global, constata-se uma semelhança no valor da força crítica de ambos perfis. Nesse sentido, conclui-se que, para esses modos de flambagem, a altura tem uma pequena influência no comportamento do perfil Sigma.

Foram elaboradas curvas para perfis com mesas de 63 e 72 milímetros (Fig. 8). Identificou-se que no intervalo de comprimentos que apresentam a flambagem local, a alteração da largura da mesa não levou a variações significativas na força crítica. Tal fato se justifica uma vez que essa instabilidade ocorre no elemento b_1 , o qual não está conectado diretamente à mesa. Já para o trecho em que há predominância da distorção, observa-se uma redução da força crítica para a largura de 72 mm. O mesmo tende a ocorrer de maneira sutil para os comprimentos em que a flambagem global é predominante.

Analisando todos os gráficos, observa-se que independente das dimensões variadas, os valores máximos e mínimos de força crítica assim como os modos de flambagem ocorreram para valores semelhantes de comprimento

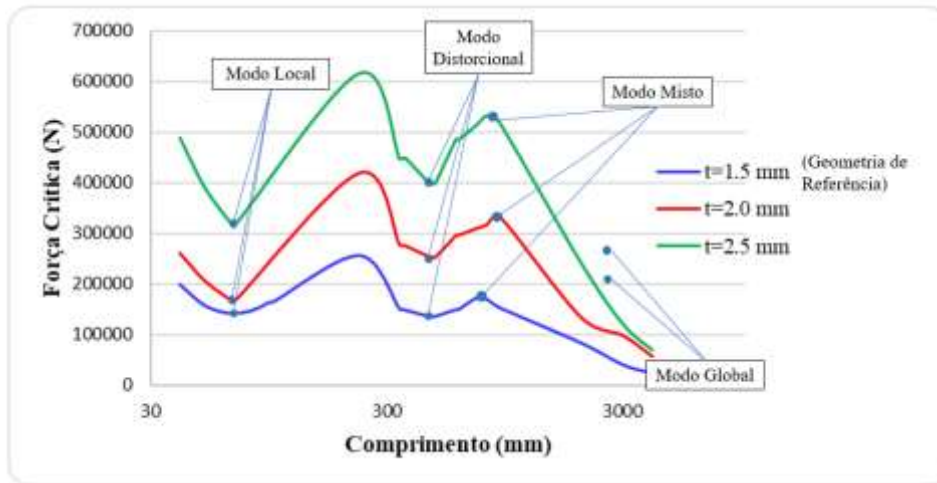


Figura 6. Força crítica x comprimento para perfis compostos por chapas com espessuras de 1,5; 2,0 e 2,5mm.

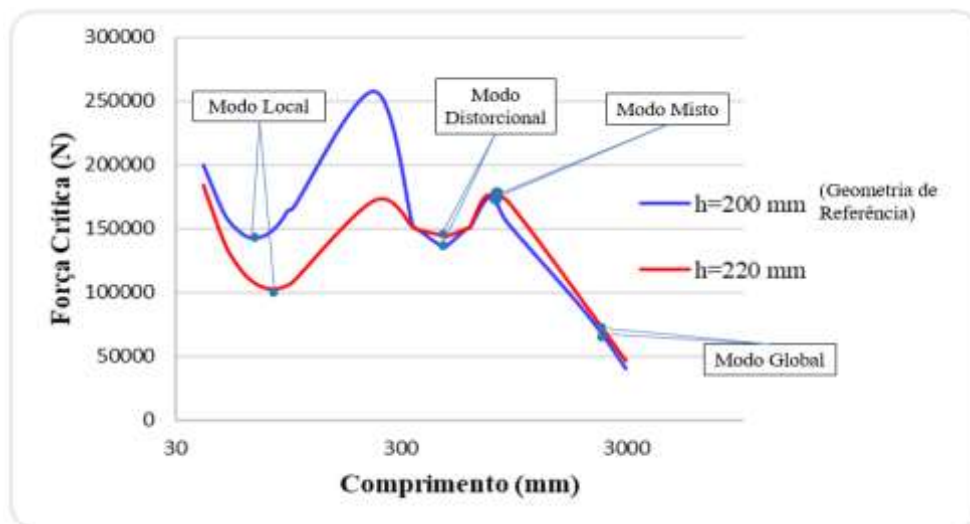


Figura 7. Curva força crítica x comprimento para almas de 200 e 220 mm.

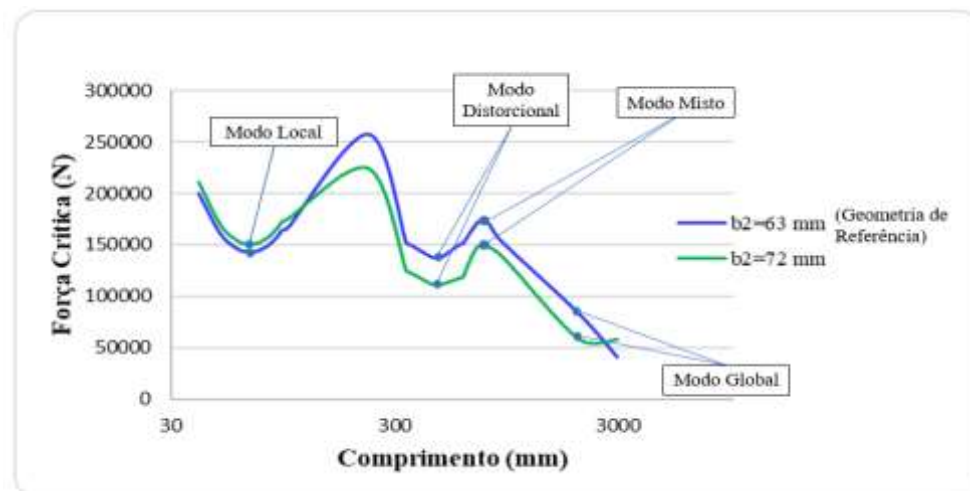


Figura 8. Força crítica em função do comprimento para larguras de mesa de 63 a 72 mm.

5 Conclusões

Neste trabalho apresentou-se a análise de estabilidade de perfis Sigma submetidos à compressão. Diante dos resultados, observou-se que a espessura tem grande influência no comportamento da seção Sigma e seu aumento resulta no acréscimo dos valores da força crítica. Foi verificado que a altura da alma influencia o comportamento do perfil em que ocorre a flambagem local. O mesmo não é observado para os comprimentos em que a distorção e a flambagem global ocorrem. Em relação à largura da mesa, não se observou alteração nos valores de força crítica para os casos de flambagem local, uma vez que as mesas não estão conectadas ao elemento susceptível a esta instabilidade (b_1). No entanto, a variação desse parâmetro influencia significativamente os valores de força crítica para os comprimentos em que os demais modos de flambagem predominam.

Ao final, observou-se que as variações do comprimento da mesa e da alma, assim como da espessura, não influenciaram os comprimentos em que os modos de flambagem ocorreram, uma vez que os picos e os vales das curvas coincidem no eixo x. É importante ressaltar que, por se tratar de uma geometria de seção transversal complexa, é essencial a continuidade deste trabalho considerando diferentes geometrias e um trabalho paramétrico mais extenso.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao apoio financeiro em forma de fomento à pesquisa concedido pela CAPES, FAPEMIG, CNPq e à UFMG.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte do presente trabalho é propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários a serem incluídos aqui.

Referências

- [1] G. M. B. Chodraui. “Flambagem por distorção da seção transversal em perfis de aço formados a frio submetidos à compressão centrada e à flexão.” Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, 2003.
- [2] H. Inoue, E.M.Batista, F.L.B.Ribeiro. “Análise da Estabilidade de Perfis de Paredes Finas: Faixas Finitas e MEF”. Universidade Federal de São João Del-Rei, 2010.
- [3] W. S. Santos “Interação Flambagem Global – Flambagem Local em Pilares Metálicos de Seção I Duplamente Simétricos Sob Compressão Uniforme. Universidade Federal do Espírito Santo, 2002.
- [4] C. Ren, B. Wang, X.Zhao. Numerical predictions of distortional-global buckling interaction of perforated rack uprights in compression”. Thin-Walled Structures, pp 292-301, 2019.
- [5] SIMULIA. Abaqus/CAE User’s Guide. 2014.
- [6] B. W. Schaefer. CUFSM 5.01 Software. User Manual and Tutorials. 2018.
- [7] T. Kubiak. “Static and Dynamic buckling of thin-walled plate structures”, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 2013.
- [8] P. Zhang, M. S. Alam. “Elastic buckling behaviour of Σ -shaped rack columns under uniaxial compression”. Thin-Walled Structures, 2020.
- [9] M. Casafont, M. Pastor, J. Bonada, F. Roure, T. Pekoz. “Linear buckling analysis of perforated steel storage rack columns with the Finite Strip Method”. Thin-Walled Structures, pp 71-85, 2012.
- [10] Z. Li, e B. W. Schafer. “Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods”. Twentieth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, 2010.