

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

Carolina Silva Oliveira<sup>1\*</sup>, Bernardo de Matos Silva Melo<sup>2\*</sup>, Jorge Reis<sup>3\*</sup>, Bianca Vieira Ávila<sup>3\*</sup>, Francisco Carlos Rodrigues<sup>4\*</sup>

\*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

<sup>1</sup>carolinasoliveira05@gmail.com

<sup>2</sup>bernardodematossilva@gmail.com

<sup>3</sup>reisjorgef@gmail.com

<sup>4</sup>biancavieiraavila@gmail.com

<sup>5</sup>francisco@dees.ufmg.br

**Resumo.** Os Perfis de aço Formados a Frio (PFFs) são fabricados em diversas seções transversais e amplamente utilizados na construção civil, proporcionando soluções eficientes e abrangentes tanto no aspecto econômico quanto em aproveitamento. Quando submetidos a tensões de compressão, se tornam suscetíveis à ocorrência de fenômenos de instabilidade apresentando diferentes modos de flambagem. Dentre eles, tem-se os modos globais (flexão, torção pura e flexo-torção), os modos locais (flambagem local e distorção) e o modo misto, que representa a interação dos modos local e global. A flambagem é um fenômeno que causa redução da rigidez das barras e conduz a um comportamento pós-crítico instável. Esses modos são influenciados pelo comprimento e dimensões da seção transversal do PFF. É comum usar métodos numéricos como alternativas viáveis para estudar o comportamento de estruturas. Portanto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência do comprimento das barras e de diferentes dimensões na seção transversal nos modos de flambagem para o perfil Rack com enrijecedor reto e inclinado, submetido à compressão pura. Para tanto, são utilizados os *softwares* ABAQUS e CUFSM, os quais são baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método das Faixas Finitas (MFF), respectivamente.

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

## 1 Introdução

Perfis formados a frio são, geralmente, compostos por chapas finas de aço laminadas, o que resulta em relações elevadas de largura/espessura [1]. Esses perfis com paredes finas e seção aberta apresentam como modos de instabilidade o Modo Local de Placa (MLP), o Modo Distorcional (MD), Modo Global (MG) e Modo Misto (MM). Segundo Inoue *et al.* [2], pode-se considerar a distorção como uma associação entre o giro de uma parte da seção transversal, decorrente da baixa rigidez torsional do perfil e a flexão lateral, resultante da insignificante rigidez à flexão do conjunto formado pelas mesas e enrijecedores de borda.

Segundo Chodraui [1], a análise de um perfil envolve a identificação dos modos e das tensões de flambagem associados, detectando-se o modo crítico em função do comprimento da barra, que pode estar sujeita à compressão centrada, flexão simples ou composta. Além disso, Santos [3] explica que esses modos de instabilidade e a força crítica são influenciados pelas relações geométricas do elemento estrutural, por suas condições de apoio, imperfeições iniciais e características mecânicas do material.

Ren *et al.* [4] citam que, nas últimas décadas, uma quantidade relevante de pesquisas envolvendo o estudo desses modos de instabilidade foram publicadas. Porém, a maioria dessas análises consideram um modo de instabilidade isolado. Para PFF's, pode existir interação entre modos diferentes, o que afeta os resultados e a segurança das estruturas. Diante desse contexto, esse trabalho objetiva avaliar a influência das dimensões da seção transversal e do comprimento de perfis com seção transversal do tipo Rack, nos modos de flambagem e na

capacidade resistente, quando submetidos à compressão pura. Visando alcançar esse objetivo, foram empregados os programas ABAQUS [5] e CUFSM [6], que tornaram possível a realização de comparações dos resultados obtidos por esses dois métodos, em termos de força crítica e modos de flambagem.

## 2 Fundamentação teórica

Zhang e Alam [7] afirmam que em um ensaio de compressão em um pilar, os modos de flambagem podem ocorrer simultaneamente ou em diferentes forças, de modo que o perfil possa ter modos interativos. Segundo esses autores, a análise de flambagem de autovalor apresenta um alto grau de precisão ao prever esses modos de flambagem de perfis submetidos à compressão.

Um dos aspectos importantes da modelagem numérica diz respeito à escolha das condições de contorno, visando representar os modos de flambagem de forma satisfatória. Portanto, uma ampla pesquisa bibliográfica foi realizada para obter as condições de contorno e aplicação de carregamento, que representam o comportamento real dos PFF.

No estudo de Zhang e Alam [7], para representar o comportamento do Método da Faixa Finita (MFF), em que o modelo é discretizado ao longo do eixo longitudinal da barra, os autores consideraram deslocamentos senoidais aplicados fora do plano em linhas nodais, mostradas na Fig. 1. Esses deslocamentos são descritos de acordo com a função trigonométrica mostrada na eq. 1. Em cada uma dessas linhas, condições de contorno de simetria do tipo SYMM foram aplicadas aos seus nós mestres. Esses nós correspondem ao nó final da seção ( $Z = 0$ ) e todos os outros foram considerados “escravos”. Essa consideração permitiu simular o deslocamento máximo no nó mestre, que corresponde ao centro do vão. Quanto à aplicação de força, os autores adotaram carregamento de compressão uniformemente distribuído ao longo da seção transversal.

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

Onde:  $u$  é um deslocamento fora do plano;  $Z$  é a coordenada dos nós escravos nos modelos;  $L$  é o comprimento total do modelo.

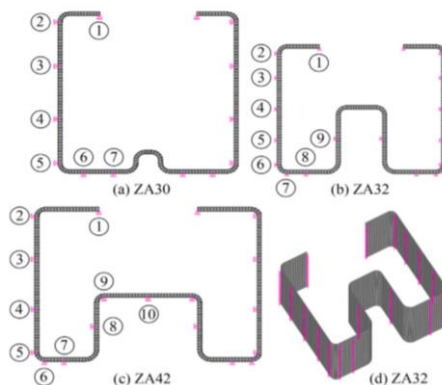


Figura 1. Linhas nodais selecionadas e respectivas condições de contorno [7].

Ren *et al.* [4] adotaram em seu estudo restrições de deslocamento em direções localizadas fora do plano da seção transversal em ambas as extremidades. Além disso, o nó central localizado no meio do vão foi restringido no eixo longitudinal para eliminar o movimento de corpo rígido. As extremidades também foram submetidas a carregamento pontual no centróide da seção e os nós que a compõem foram acoplados utilizando a técnica *Coupling Constraint*.

Casafont *et al.* [8] usaram o programa ANSYS para realizar análises de flambagem linear. Eles aplicaram condições de contorno de simetria em uma extremidade do modelo e na outra extremidade, consideraram o estado de simples apoio. O modelo foi estimulado a se deformar em forma senoidal pura por meio de uma equação de restrição, semelhante à dos autores Zhang e Alam [7]. A equação de restrição foi imposta a nós de linha selecionados.

### 3 Metodologia numérica

Com o objetivo de reproduzir as instabilidades presentes em elementos com seção transversal do tipo Rack, foi realizada uma análise via MEF utilizando o programa ABAQUS [5]. Sendo assim, desenvolveu-se uma análise linear de flambagem resultando em autovalores associados aos modos de flambagem e respectivas forças críticas. Considerou-se um aço com comportamento elástico com o Módulo de Young (E) igual a 200 GPa e 0,3 para o coeficiente de Poisson.

#### 3.1 Geometria

Esse estudo foi composto por 210 modelos, sendo as dimensões da seção transversal apresentadas nas Fig. 2. No estudo paramétrico realizado foram variadas a espessura (t), a inclinação do enrijecedor, a largura da mesa ( $b_2$ ) e o comprimento, a fim de avaliar a influência desses parâmetros. Com o intuito de captar o comportamento de flambagem e seus respectivos modos, foram considerados comprimentos entre 50 mm e 3500 mm. Foram adotadas espessuras iguais a 1,5 mm, 2,0 mm e 2,5 mm, inclinação do enrijecedor (elemento  $b_3$ ) de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$  e larguras de mesa de 45 mm e 75 mm. A Tabela 1 apresenta as seções transversais usadas na análise paramétrica.

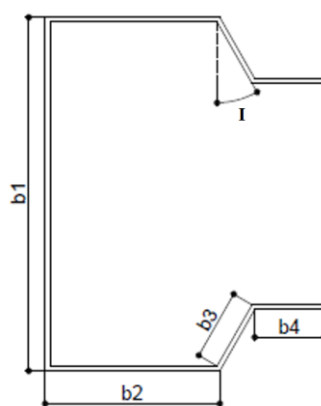


Figura 2. Seção transversal Rack em estudo.

Tabela 1. Seções transversais usadas na análise paramétrica.

Modelos	Parâmetros adotados
Geometria de referência	$t=1,5$ mm; $I=0^\circ$ ; $b_2=45$ mm
Conjunto de modelos 2 (Var. Espessura 1)	$t=2,0$ mm; $I=0^\circ$ ; $b_2=45$ mm
Conjunto de modelos 3 (Var. Espessura 2)	$t=2,5$ mm; $I=0^\circ$ ; $b_2=45$ mm
Conjunto de modelos 4 (Var. Inclinação 1)	$t=1,5$ mm; $I=30^\circ$ ; $b_2=45$ mm
Conjunto de modelos 5 (Var. Inclinação 2)	$t=1,5$ mm; $I=45^\circ$ ; $b_2=45$ mm
Conjunto de modelos 6 (Var. Mesa)	$t=1,5$ mm; $I=0^\circ$ ; $b_2=75$ mm
Comprimentos	50 to 3500 mm

#### 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 [9], o programa CUFSM [6] reproduz modelos com condições de contorno gerais, levando a uma *Signature Curve* (SC), decomposta a partir de soluções associadas a modos distintos, como pode ser visto na Fig. 3. Essa curva considera os modos de flambagem de forma pura e isolada. Portanto, para reproduzir esses comportamentos isolados para modos de flambagem distintos, foram utilizadas duas combinações de condições de contorno.

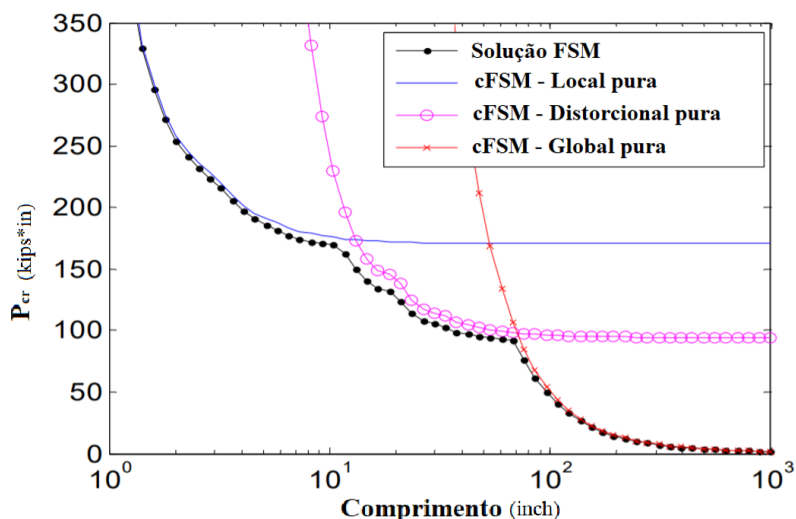


Figura 3. Decomposição modal do método computacional das faixas finitas - CUFSM (Adaptado de [9]).

Para modelos que apresentaram apenas flambagem local ou flambagem global, as condições de contorno que mais se aproximaram dos modelos do CUFSM são representadas em Fig.4 (a). Os deslocamentos foram restritos nas três direções e rotação no eixo Z na face sem aplicação de força. Na outra extremidade do perfil, os deslocamentos foram restritos nos eixos X e Y e a rotação no eixo Z. Além disso, o deslocamento na direção longitudinal foi restrito em um ponto central da barra, com o objetivo de impedir movimento de corpo rígido. Uma força unitária concentrada foi aplicada a um nó mestre coincidente com o centro geométrico da seção transversal. A conexão com os nós da seção transversal foi realizada por meio do *constraint* do tipo *coupling*, associando o nó mestre aos demais na direção de aplicação da força (eixo Z).

Para modelos que apresentaram distorção e modo misto, considerou-se um modelo com metade do comprimento, utilizando a condição de simetria ZSYMM, aplicada à base do perfil (Fig 4b). Além disso, três linhas nodais foram consideradas na alma dos perfis, com deslocamentos fora do plano limitados de acordo com a eq. 1, semelhante ao indicado pelos autores [7] e [8], com o intuito de obter um comportamento de meia onda. Para representar o comportamento de compressão pura, foi aplicada uma força distribuída ao longo dos elementos da seção transversal, em ambas as extremidades, com intensidade equivalente a uma força pontual unitária.

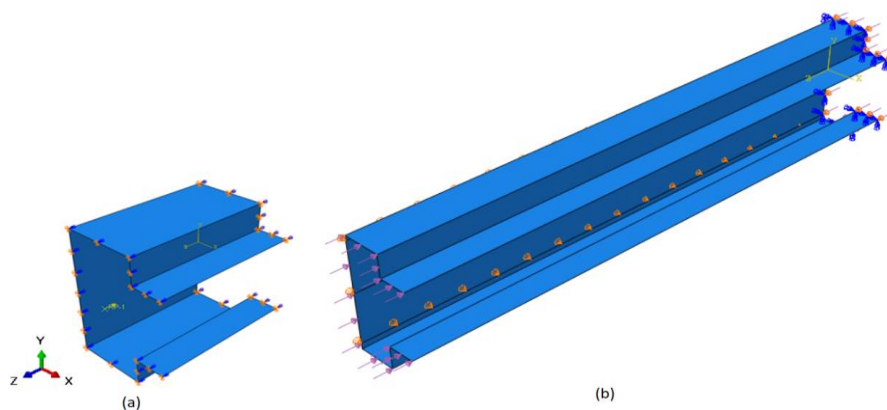


Figura 4. Condições de contorno e aplicação de força de compressão para modelos com a) flambagem local ou global e b) flambagem distorcional e mista.

### 3.4 Validação do modelo numérico

O programa CUFSM [6] permite avaliar as instabilidades em PFF's sob tensões longitudinais uniformes [9]. 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 3500 mm (Fig. 5).

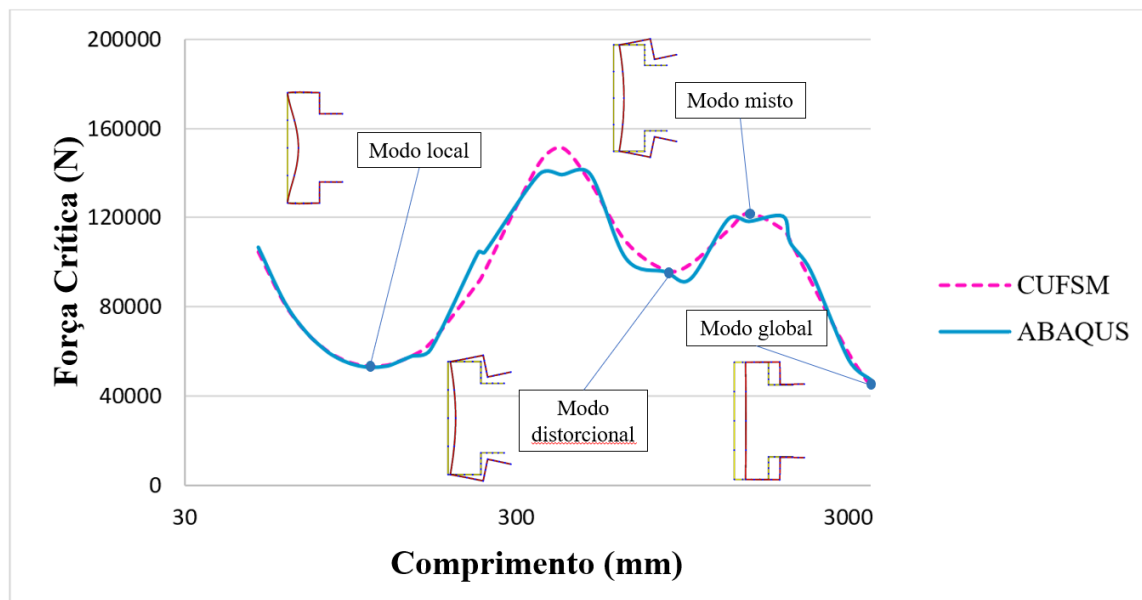


Figura 5. Comparação das forças críticas obtidas nos programas ABAQUS e CUFSM.

## 4 Resultados

Após validação numérica e estudo paramétrico, gráficos que refletem o comportamento de flambagem dos modelos analisados foram gerados. As Figuras 6, 7 e 8 mostram a comparação entre o modelo principal e as demais variações.

Na Figura 6 é possível observar a influência da espessura na determinação das forças críticas para os comprimentos adotados. Observa-se que para os modos de flambagem local, distorcional e misto, a espessura tem o mesmo padrão de curva, com espessuras maiores resultando em forças críticas mais altas. Para comprimentos acima de 3000 mm, que configuram a flambagem global, observa-se uma alteração no comportamento das curvas. Verificou-se que o modelo principal, com menor espessura, atingiu valores maiores. Esse comportamento não era esperado, portanto, mais estudos são necessários para conclusões mais precisas. Além disso, para espessuras de 2,0 mm e 2,5 mm, é possível observar que no caso da flambagem global, esse parâmetro pode não ser um fator relevante para a determinação das forças críticas.

Na Figura 7, observa-se que para o modo local, a inclinação do enrijecedor não influencia na força crítica. Para comprimentos maiores, que resultam em modos de flambagem distorcional e misto, nota-se que com o aumento da inclinação, ocorre uma diminuição da força crítica de flambagem. Além disso, as curvas tendem a convergir para comprimentos acima de 3000 mm (modo global), principalmente para  $I = 30^\circ$  e  $I = 45^\circ$ .

Na Figura 8, pode-se observar que para a faixa de largura da mesa adotada, os valores de força crítica para os modos local, distorcional, misto e global não sofrem grandes dispersões. No entanto, há um ligeiro aumento na resistência crítica com o aumento da largura da mesa.

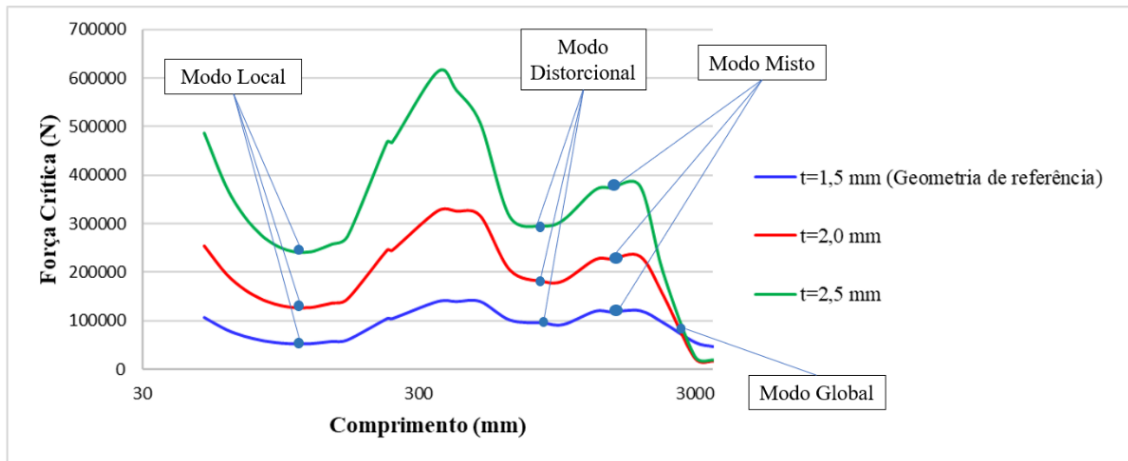


Figura 6. Influência da espessura

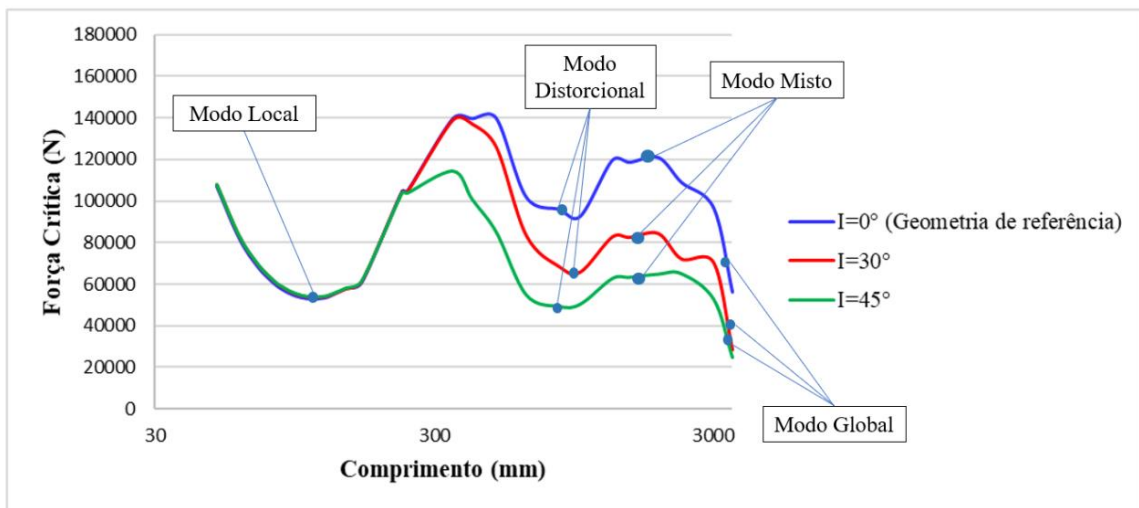


Figura 7. Influência da inclinação do enrijecedor.

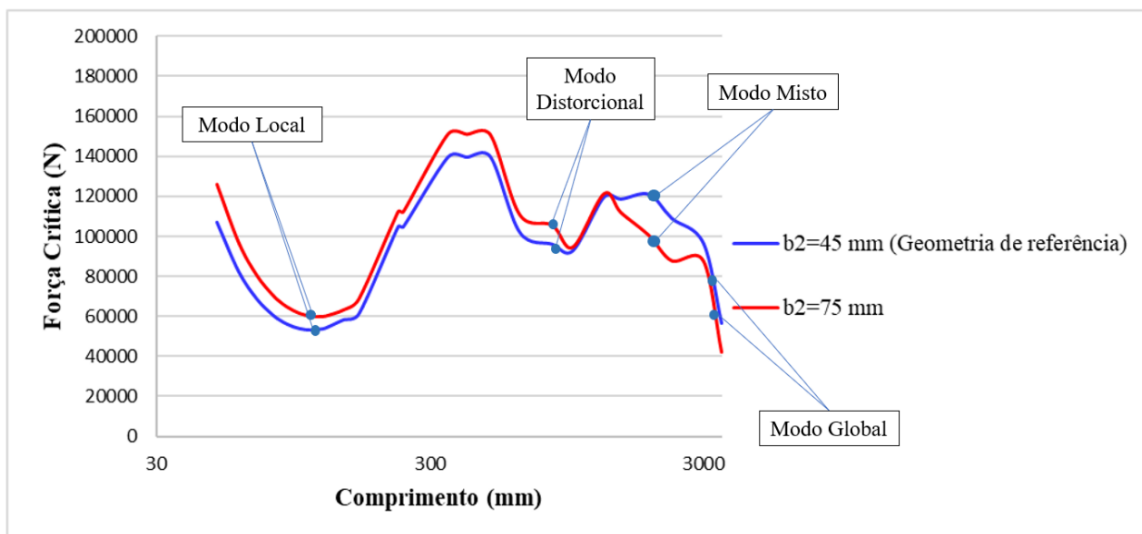


Figura 8. Influência da largura da mesa.

## 5 Conclusões

Por meio das análises numéricas realizadas, identifica-se que para os casos estudados, a espessura pode contribuir significativamente para obtenção de valores maiores de força crítica. Observa-se também que para diferentes espessuras, os modos de flambagem ocorrem para os mesmos comprimentos, ou seja, os picos e vales coincidem no eixo horizontal das Fig. 6, 7 e 8.

Para diferentes inclinações de enrijecedor, constata-se que os modos locais não apresentaram diferenças significativas no comportamento local, em termos de força crítica para os respectivos comprimentos. Por outro lado, a partir do início do flambagem distorcional (primeiro pico), houve certa discrepância entre as curvas. Além disso, o primeiro pico é acentuado por uma diferença nos comprimentos de flambagem para as três inclinações consideradas.

Quanto à variação da largura da mesa, observou-se um comportamento semelhante entre as curvas, com a maior dimensão de mesa resultando em uma força crítica ligeiramente maior. Essa tendência só foi invertida após a ocorrência do modo misto.

Um aspecto importante que pode ser observado a partir dos resultados de todos os parâmetros considerados é a tendência de as curvas coincidirem após o início do modo global. Isto é, a espessura, a inclinação do enrijecedor e largura da mesa, após um dado comprimento específico do perfil, podem não apresentar influência significativa na força crítica.

Sugere-se estudos mais abrangentes envolvendo uma maior densidade de variações dos parâmetros para conclusões mais aprofundadas, principalmente em relação a influência da largura da mesa e a espessura para comprimentos que resultam no modo global.

**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] P. Zhang, M. S. Alam. “Elastic buckling behaviour of  $\Sigma$ -shaped rack columns under uniaxial compression”. Thin-Walled Structures, 2020.
- [8] 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.
- [9] 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.