

ESTUDO NUMÉRICO SOBRE O COEFICIENTE DE FLAMBAGEM LOCAL DE SEÇÃO COMPLETA DE PERFIS S ENRIJECIDOS: PROPOSTA DE FORMULAÇÃO

Ruan Richelly Santos
Carolina Silva Oliveira
José Osvaldo Ferreira Filho
Francisco Carlos Rodrigues
Hermes Carvalho

ruanrichelly@gmail.com
carolinasoliveira05@gmail.com
jf2004@hotmail.com
francisco@dees.ufmg.br
hermes@dees.ufmg.br

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

Resumo. Os perfis de aço formados a frio têm sido amplamente empregados na construção civil em função da facilidade de fabricação e montagem, variedade de formas de seção transversal, além da leveza e eficiência estrutural. Entretanto, tais perfis apresentam elevada esbelteza, tornando-os suscetíveis a fenômenos de instabilidade, como, por exemplo, a flambagem local de seus elementos. No dimensionamento de barras com esse tipo de perfil, um dos métodos empregados consiste no Método da Seção Efetiva (MSE), definido pela ABNT NBR 14762:2010. Nesse método, a flambagem local é considerada por meio de propriedades geométricas efetivas da seção transversal completa das barras, sendo essa definida pelo coeficiente de flambagem da seção completa. A norma brasileira preconiza formulações para obtenção desse coeficiente apenas para algumas seções transversais específicas, sendo que seções S enrijecidas não constam no escopo de fórmulas da prescrição normativa. Em casos de perfis distintos dos apresentados na norma, é necessária consulta à literatura ou aplicação de métodos numéricos. Neste contexto, o trabalho em questão tem como objetivo a obtenção de uma formulação para o coeficiente de flambagem local para seção completa de uma barra de seção S enrijecida submetida à compressão uniforme, com elemento central inclinado. Para tanto, uma análise numérica consistente foi desenvolvida utilizando o software de elementos finitos ABAQUS, a fim de determinar a tensão crítica de flambagem local e, a partir de um estudo paramétrico do perfil S enrijecido, definir uma formulação válida para o coeficiente de flambagem. Uma formulação com boa correlação de valores para o coeficiente da seção em questão foi obtida, sendo apresentadas informações relevantes para o dimensionamento de barras com perfil S enrijecido com elemento central da alma inclinado.

Palavras-chave: Perfis Formados a Frio, Coeficiente de Flambagem Local, Análise Numérica

1 Introdução

Os perfis de aço formados a frio alcançaram lugar de destaque entre as estruturas metálicas, dada a grande variedade das formas de seções transversais que podem ser obtidas e da boa relação massa/força resistente. São fabricados a partir da dobra de chapas de pequena espessura e, portanto, apresentam esbelteza elevada. Com isso, a perda de resistência por instabilidade passa a ser aspecto determinante no projeto.

A pequena espessura das chapas dos perfis formados a frio resulta em elevados valores da relação largura/espessura dos elementos que compõem a seção transversal, que ficam, então, sujeitos ao fenômeno de instabilidade de flambagem local. Segundo Rodrigues e Caldas [1], quando ocorre a flambagem local de um ou mais elementos da seção transversal, há uma redução da rigidez da barra e uma redistribuição não linear de tensões. Porém, o fenômeno não representa, em geral, o esgotamento da capacidade resistente da barra, pois seus elementos apresentam um comportamento pós-crítico estável, ou seja, possuem considerável reserva de resistência pós flambagem.

De acordo com Javaroni e Gonçalves [2], outro modo de instabilidade que também caracteriza falha do perfil é denominado flambagem distorcional e, como o próprio nome sugere, a distorção da seção transversal, no próprio plano da estrutura, pode ocorrer envolvendo a rotação da mesa e enrijecedor de borda em torno da junção alma e mesa.

O fenômeno da instabilidade está presente em todos os elementos sujeitos a esforços de compressão, sejam esses oriundos de solicitações por compressão axial, momento fletor ou cisalhamento. De acordo com Javaroni *et al.* [3], a instabilidade do perfil pode ser classificada como local ou global, podendo ocorrer uma ou outra, isoladamente, ou a interação entre elas. O tipo de instabilidade está condicionado às características geométricas dos perfis e às condições de vínculos e de carregamentos. Segundo Braga [4], os modos de instabilidade globais em barras comprimidas são caracterizados por não envolverem deformação significativa das seções transversais em seu plano, provocando nas seções deslocamentos quase que exclusivamente de corpo rígido. São classificados em: (i) Modo Global por Flexão (MGF), ilustrado na Fig. 1a; Modo Global por Flexotorção (MGFT), ilustrado na Fig. 1b; e (iii) Modo Global por Torção, ilustrado na Fig. 1c. Já os modos de instabilidade local são aqueles que não envolvem deslocamentos significativos do eixo da barra, mas que induzem deformações localizadas nas seções transversais, permanecendo o seu eixo praticamente reto. Os modos locais são convencionalmente divididos em modo local de chapa (MLC) e modo distorcional (MD), como ilustra a Fig. 1d e Fig. 1e, respectivamente.

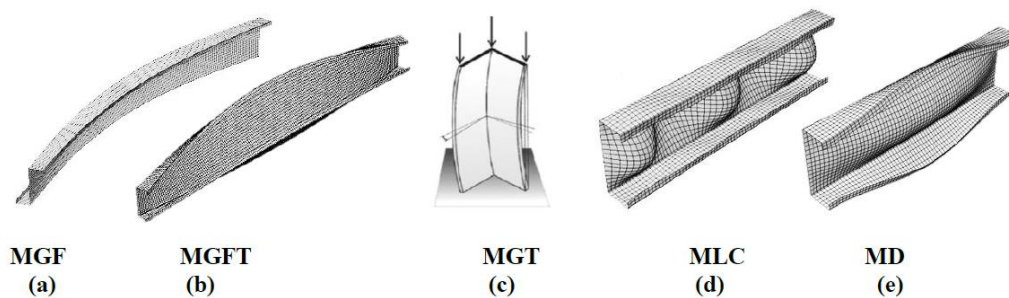


Figura 1. Modos de instabilidade: (a) modo global por flexão, (b) modo global por flexotorção, (c) modo global por torção, (d) modo local de chapa e (e) modo distorcional (Braga [4])

Conforme o que foi apresentado, para o estudo dos fenômenos de instabilidade, faz-se necessária a definição do carregamento crítico (P_{cr}) que é o carregamento correspondente a um ponto crítico, ou seja, a um ponto da trajetória de equilíbrio em que a estrutura pode se tornar instável. Um ponto crítico por sua vez pode ser de dois tipos: (i) estático, podendo ser classificado como ponto de bifurcação ou ponto limite (ambos caracterizam a perda de estabilidade através de uma mudança brusca do sistema); ou (ii) dinâmico, caracterizado por movimentos oscilatórios. [4]

A ABNT NBR 14762:2010 [5] trata das especificações que devem ser consideradas no cálculo estrutural de um perfil de aço formado a frio e três métodos de cálculo para tal: Método da Largura

Efetiva (MLE), Método da Seção Efetiva (MSE) e Método da Rigidez Direta (MRD). De acordo com Batista [6], a partir de um método direto de avaliação da força axial de compressão resistente, a flambagem local de placa é considerada, embasando-se no comportamento real da seção transversal e, portanto, na interação entre as placas. Com isso, por meio de expressões e tabelas, calcula-se o coeficiente de flambagem local da seção completa de perfis do tipo U simples, U enrijecido, Z simples, Z enrijecido, cartola, rack e seção tubular.

Dentro do contexto apresentado, este trabalho tem por objetivo definir e apresentar uma formulação para a obtenção do coeficiente de flambagem da seção completa para perfis do tipo S enrijecido, que não consta nas prescrições da norma brasileira. Sendo assim, foram analisadas diferentes dimensões da seção transversal do perfil, com elemento central inclinado, no *software* ABAQUS, para a determinação da tensão crítica de flambagem local e, posteriormente, do valor do coeficiente de flambagem local da seção completa.

2 Métodos de cálculo

O cálculo estrutural de perfis formados a frio normatizado pela ABNT NBR14762:2010 [5] considera os Estados Limites Últimos (ELU) e os Estados Limites de Serviço (ELS), relacionados com a segurança da estrutura, e seu desempenho sob condições normais de utilização, respectivamente.

No Método da Seção Efetiva (MSE), a flambagem local é considerada por meio de propriedades geométricas efetivas (reduzidas) da seção transversal completa das barras para o dimensionamento dos perfis submetidos à compressão e à flexão. Nesse método, a área efetiva (A_{ef}) é determinada por meio da Eq. (1).

$$A_{ef} = \begin{cases} A & \text{para } \lambda_p \leq 0,776 \\ \frac{A}{\lambda_p^{0,8}} \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}}\right) & \text{para } \lambda_p > 0,776 \end{cases} \quad (1)$$

onde:

A é a área bruta da seção transversal da barra;

λ_p é o índice de esbeltez reduzido expresso pela Eq. (2):

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\chi A f_y}{N_l}} \quad (2)$$

onde:

χ é o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global;

f_y é a tensão de escoamento do aço;

N_l é a força axial de flambagem local elástica, fornecida pela Eq. (3):

$$N_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{b_w}{t}\right)^2} A \quad (3)$$

onde:

k_l é o coeficiente de flambagem local para a seção completa;

E é módulo de elasticidade;

ν é o Coeficiente de Poisson;

b_w é largura nominal da alma;

t é espessura do elemento.

De acordo com a norma ABNT NBR 14762 (2010), o coeficiente de flambagem local (k_l) para diferentes seções pode ser obtido para 4 casos: seção U e Z simples; seção U e Z enrijecido e seção cartola; seção rack e seção tubular retangular. A Fig. 2 apresenta as seções prescritas pela normativa

brasileira e a Tabela 1 exibe um resumo das correspondentes formulações de k_l .

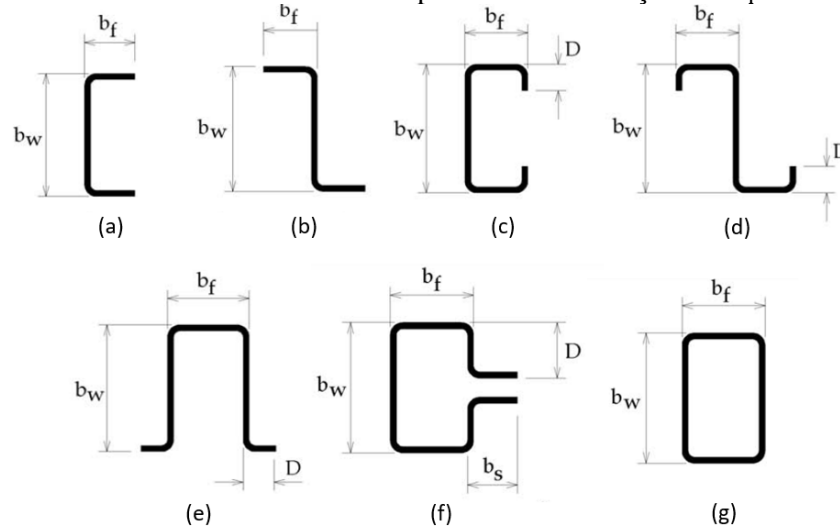


Figura 2. Seções de perfis formados a frio: (a) U simples, (b) Z simples, (c) U enrijecido, (d) Z enrijecido, (e) cartola, (f) rack e (g) tubular retangular (Adaptado de ABNT NBR 14762:2010 [5])

Tabela 1. Formulações para coeficiente de flambagem local propostas pela norma brasileira

Casos	Formulações
Seção U e Z simples	$k_l = 4 + 3,4\eta + 21,8\eta^2 - 174,3\eta^3 + 319,9\eta^4 - 237,6\eta^5 + 63,6\eta^6$
Seção U, Z enrijecido e cartola	$k_l = 6,8 - 5,8\eta + 9,2\eta^2 - 6,0\eta^3$
Seção rack	$k_l = 6,5 - 3,0\eta + 2,8\eta^2 - 1,6\eta^3$
Seção tubular retangular	$k_l = 6,6 - 5,8\eta + 8,6\eta^2 - 5,4\eta^3$

* η é relação b_f/b_w , aplicável para o intervalo entre 0,1 a 1,0

As formulações para coeficiente de flambagem local da prescrição normativa foram baseadas em estudos paramétricos disponíveis na literatura. Dentre estes, destaca-se o estudo de Batista [7], que definiu curvas que permitem a determinação do coeficiente para diversos tipos de seção, conforme descrito na Fig. 3.

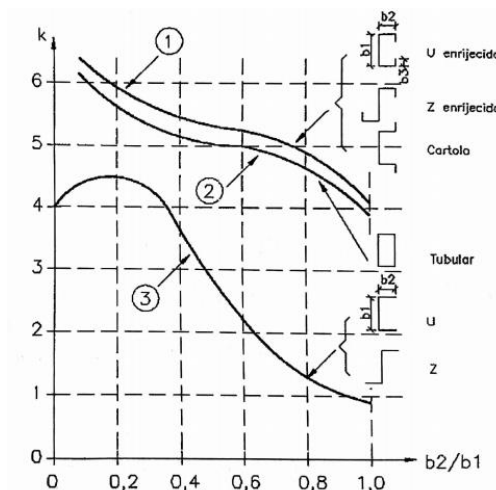


Figura 3. Coeficiente de flambagem local de diversos tipos de seções levando em conta a interação entre seus elementos (Batista [7])

Recentemente, o dimensionamento de estruturas ganhou nova abordagem. Com o avanço computacional, a aplicação do Método dos Elementos Finitos por meio de *software* tornou-se difundida. A partir de análises paramétricas de modelos numéricos, equacionamentos podem ser propostos e

elementos estruturais estudados. Neste contexto, objetivou-se a elaboração de um modelo numérico capaz de contemplar o estudo de flambagem local de barras de perfil S enrijecido com elemento central inclinado.

3 Análise numérica

Como o presente trabalho objetiva o estudo numérico do comportamento local de perfis S enrijecido, realizou-se uma análise via Método dos Elementos Finitos utilizando o programa comercial *ABAQUS* [8]. A partir dos modelos numéricos desenvolvidos, foi proposta uma formulação que representasse o coeficiente de flambagem local (k_l) para seção completa de uma barra do tipo S enrijecida, com elemento central inclinado, submetida à compressão uniforme.

Alguns aspectos relevantes devem ser definidos a fim de representar o comportamento real de elementos para a modelagem numérica. Nesta perspectiva, critérios relacionados ao material, tipo de análise, definições de malha, condições de contorno e condições de carregamento são decisivos para obtenção de respostas precisas. Sendo assim, a partir da escolha correta desses parâmetros, foi possível reproduzir o comportamento das barras enrijecidas, resultando em um estudo numérico coerente.

3.1 Geometria e descrição do estudo paramétrico

Para a definição de uma formulação para o coeficiente de flambagem local, um estudo paramétrico que envolveu a análise de 270 modelos numéricos foi elaborado. Os modelos desenvolvidos buscaram reproduzir perfis com diferentes relações entre as larguras dos elementos que compõem a seção, a fim de se obter resultados paramétricos que validassem a formulação proposta. A nomenclatura das dimensões do perfil S estudado é apresentada na Fig. 4.

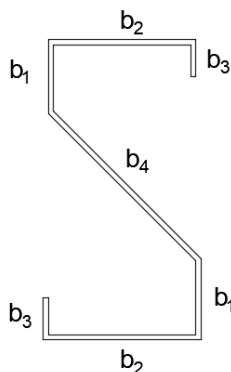


Figura 4. Seção do perfil estudado

Foram simulados modelos com duas dimensões distintas para a altura total dos perfis, sendo adotadas seções com alturas de 150 mm e de 300 mm. A fim de possibilitar uma formulação que abrangesse uma gama distinta de opções construtivas, empregou-se três inclinações diferentes, relativas ao plano horizontal, para o elemento central do perfil (b_4): 30°, 45° e 60°. Em todos os modelos, adotou-se para o elemento central uma dimensão igual à alma do perfil (b_1). Dessa forma, todas as simulações apresentaram uma razão b_4/b_1 igual a 1.

Para os demais elementos do perfil, as dimensões foram variadas a partir de proporções relacionadas à dimensão da alma do perfil. Assim, os elementos b_2 e b_3 tiveram suas medidas variadas conforme proporções definidas na Tabela 2. Além disso, foram propostas três relações distintas para a espessura da seção, a fim de enriquecer o equacionamento proposto, bem como possibilitar a análise da influência da espessura no comportamento local da barra uniformemente comprimida.

Para evitar efeitos de flambagem global e analisar apenas o comportamento local, todos os modelos analisados foram constituídos por barras curtas, com valor de comprimento da barra (a) igual a duas vezes a largura da alma, como descrito na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros empregados no estudo de caso

Parâmetros	Variação adotada
Altura total (mm)	150; 300
b_2/b_1	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0
b_3/b_1	0,1; 0,2; 0,3
b_1/t	35; 75; 100
Inclinação	30°; 45°; 60°
a/b_1	2

3.2 Definição da malha e tipo do elemento

Em função das características dos modelos, nas quais duas dimensões, largura e altura, são muito superiores à terceira, espessura, e que tensões na direção da espessura podem ser desprezadas, empregou-se na modelagem elementos de casca. Antes da realização da análise linear de flambagem, foram considerados dois elementos para discretizar os perfis submetidos à compressão uniforme: elemento de casca quadrilateral com integração completa (S4) e elemento de casca quadrilateral com integração reduzida (S4R). Estes elementos são representados na Fig. 5.

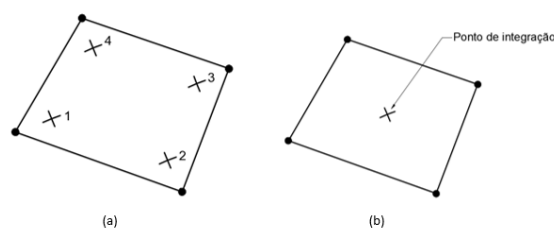


Figura 5. Representação dos elementos de casca S4 (a) e S4R (b)

Segundo Braga [4], a integração numérica de ordem reduzida é atraente por acarretar economia computacional, uma vez que emprega um menor número de pontos de Gauss que um esquema com integração completa. No entanto, essa pode induzir modos espúrios de deformação, exigindo uma forma de estabilização para evitar matrizes de rigidez artificialmente singulares. Dessa forma, optou-se pela adoção do elemento S4 nas simulações.

A discretização da malha de elementos finitos foi realizada por meio de um estudo de convergência de malha, o que garantiu maior eficiência nos resultados numéricos obtidos. A partir desse estudo, verificou-se que malhas de 2,5 mm e de 5,0 mm eram as melhores opções para os modelos com altura de 150 mm e 300 mm, respectivamente. As dimensões selecionadas para os elementos permitiram modelos com resultados similares aos obtidos em simulações com elementos menores e com um custo computacional reduzido. Na Fig. 6 é apresentado um exemplo da aplicação da malha.

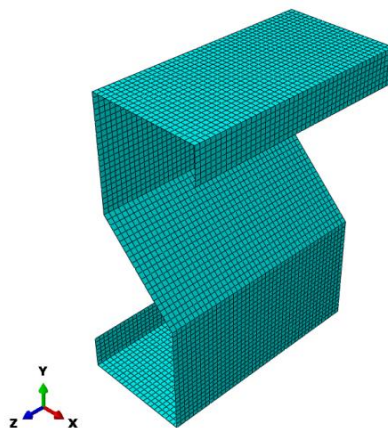


Figura 6. Discretização da malha aplicada no modelo

3.3 Condições de contorno e carregamento

Para obtenção da flambagem local, uma força concentrada unitária foi aplicada no centro geométrico da seção. Com intuito de evitar efeitos localizados nas extremidades, essas foram restringidas de modo a se comportar como um corpo rígido, simulando assim uma chapa rígida.

Como descreve Costa [9], um corpo rígido consiste em um conjunto de nós, elementos e/ou superfícies cujo movimento é definido pelo movimento de um único nó, chamado de nó de referência de corpo rígido. As posições relativas dos nós e elementos que fazem parte do corpo rígido permanecem constantes ao longo da simulação. Dessa forma, os elementos constitutivos não deformam, mas podem sofrer grandes movimentos de corpo rígido. Para simular esse comportamento, foi empregado um nó mestre do tipo *Beam*, disponibilizado pelo ABAQUS.

As condições de contorno foram aplicadas nos nós mestres dispostos nas faces do perfil. Na base, foram restringidos todos os movimentos de translação e de rotação em torno do eixo de aplicação da força. Já na face superior da barra comprimida, foram restringidas as translações perpendiculares ao eixo de aplicação da carga e a rotação em torno desse eixo. Um resumo das condições de contorno empregadas é exibido na Tabela 3, onde U é a translação e UR a rotação em torno dos eixos. A Fig. 7 apresenta um esquema da aplicação das condições de contorno e carregamento.

Tabela 3. Condições de contorno aplicadas ao modelo numérico

	U _x	U _y	U _z	UR _x	UR _y	UR _z
Topo	Fixo	Fixo	Livre	Livre	Livre	Fixo
Base	Fixo	Fixo	Fixo	Livre	Livre	Fixo

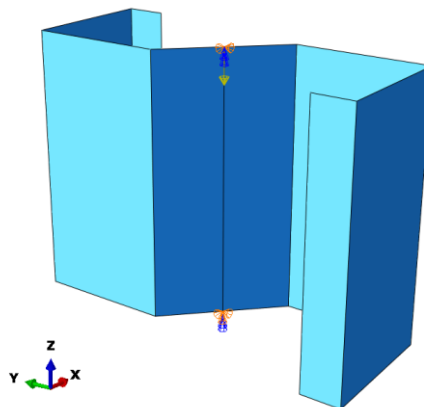


Figura 7. Modelo numérico de barra submetida à compressão uniforme

3.4 Análise de flambagem

Neste trabalho, foi feita uma análise elástica para determinação dos modos de flambagem, que consiste em solucionar um problema de autovetores e autovalores. Para tanto, adotou-se uma análise do tipo *Buckle*, na qual é aplicado o carregamento no modelo e são obtidas as forças críticas de flambagem (autovalores) associadas a modos de flambagem. Como resultado, o programa apresenta diversos modos de instabilidade e sua força crítica correspondente.

Para desenvolvimento da análise foi necessária a especificação do comportamento elástico do aço, sendo necessária a definição de dois parâmetros para o material, o módulo de elasticidade longitudinal (E) e o coeficiente de Poisson (ν). O módulo de elasticidade foi considerado igual a 200 GPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,3.

Como citado anteriormente, os modelos apresentam comprimentos reduzidos. Dessa forma, os modos de flambagem apresentados como solução correspondem aos modos de flambagem elástica local e distorcional. Para determinação da formulação, foram considerados apenas os modelos nos quais a força de flambagem local mostrou-se inferior à força de flambagem elástica distorcional. Assim, é

possível selecionar resultados que abranjam apenas os efeitos locais puros nos perfis submetidos à compressão uniforme, garantindo uma formulação eficaz para o coeficiente de flambagem local.

O modo com menor força de flambagem, predominante na maioria dos casos, foi o modo local com duas semi-ondas com o comprimento igual à largura da alma do perfil, como apresentado na Fig. 8.

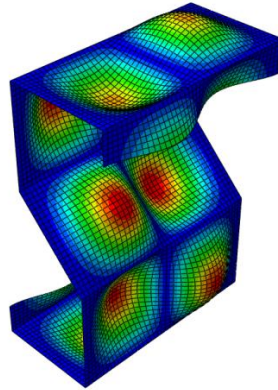


Figura 8. Modo de flambagem local com duas semi-ondas

Observa-se que os elementos dos perfis ficam sujeitos à flambagem local ocasionada pela aplicação da compressão. Dessa forma, com a força crítica disponibilizada pela análise numérica e pelo equacionamento disposto na Eq. (3), a determinação do coeficiente de flambagem local para seção completa torna-se possível. Com esses resultados, uma formulação consistente para o coeficiente de flambagem local pode ser encontrada por meio da aplicação do método dos mínimos quadrados. Essa formulação foi realizada seguindo o padrão disposto pela ABNT NBR 14762:2010 [5], no qual o coeficiente é obtido em função da razão entre a dimensão da alma e da mesa do perfil considerado (b_2/b_1).

3.5 Validação do modelo numérico

Como já mencionado, a determinação dos modos de flambagem elástica local e distorcional, bem como de suas respectivas forças, pode ser realizada a partir de recursos de análise com base na teoria da elasticidade elástica, empregando métodos numéricos. Existem programas de livre acesso que possibilitam a obtenção precisa e rápida dos modos de flambagem de barras constituídas por qualquer seção transversal.

Dentre esses programas destaca-se o CUFSM [10], que é baseado no Método das Faixas Finitas para calcular forças críticas elásticas de um perfil isolado de seção transversal definida. Para a realização de uma análise numérica consistente, com representação precisa do comportamento real das estruturas, os modelos elaborados foram validados a partir de resultados obtidos pelo *software*. Foram comparados cinco modelos, a partir da obtenção da força crítica de flambagem local elástica e, conseqüentemente, do coeficiente de flambagem local. Foram utilizados para comparação os modelos com inclinação do elemento central de 45°, relação b_1/t de 75 e b_3/b_1 igual a 0,3. Os resultados adotados na validação são descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Comparação dos resultados obtidos com ABAQUS e CUFSM

b_3/b_1	$P_{cr, ABAQUS}$ (kN)	$P_{cr, CUFSM}$ (kN)	Erro (%)
0,2	110,84	106,67	3,76
0,4	120,22	114,65	4,63
0,6	129,88	122,45	5,72
0,8	139,09	128,65	7,50
1,0	143,90	130,80	9,16

Os valores de erro obtidos foram inferiores a 10% para todos os casos. Essa diferença é inferior aos

valores usuais de erro adotados para calibração de modelos numéricos. Dessa forma, prova-se a confiabilidade nos modelos elaborados, que foram considerados viáveis para a reprodução do comportamento de perfis de aço formados a frio com seção S enrijecida. A Fig. 9 apresenta um exemplo de aplicação obtido pelo CUFSM e pelo ABAQUS.

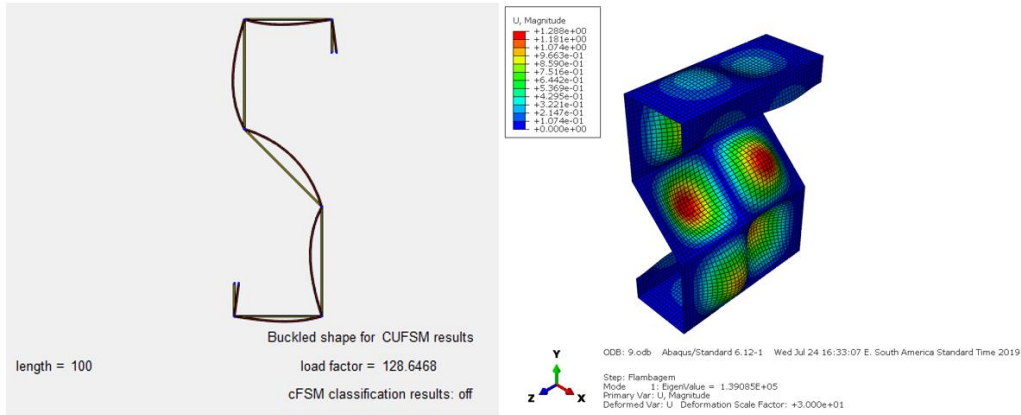


Figura 9. Modo de flambagem CUFSM e ABAQUS

4 Resultados e discussão

Os resultados do estudo paramétrico da estabilidade das barras submetidas à compressão uniforme são apresentados de forma similar à desenvolvida pela ABNT NBR 14762:2010 [5]. A Fig. 10 apresenta a variação do coeficiente de flambagem local (k_l) considerando a interação entre os elementos da seção, seguindo as relações propostas pela Tabela 2.

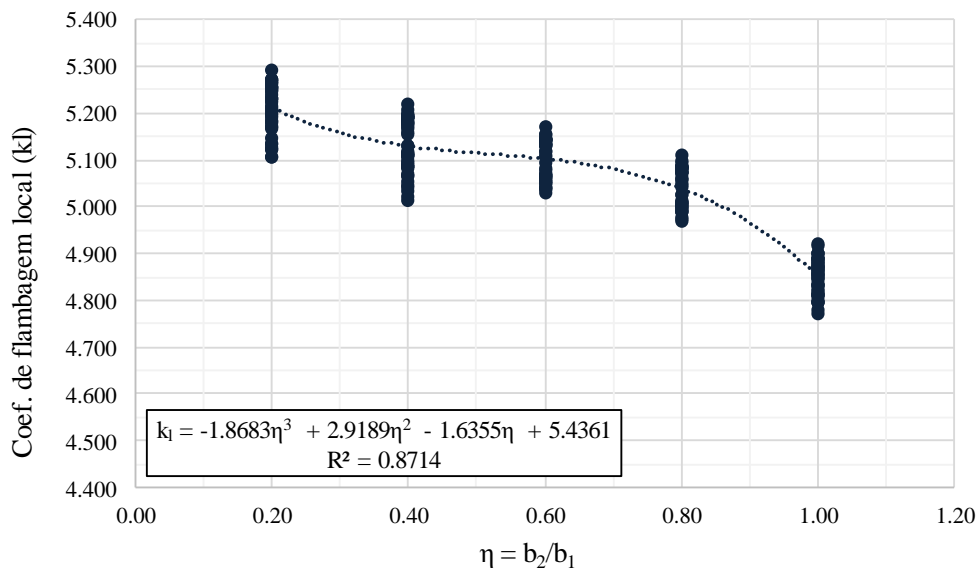


Figura 10. Curva de ajuste dos resultados para coeficiente de flambagem local elástica

Com o emprego do método dos mínimos quadrados, foi possível a obtenção de uma formulação específica para representar de modo satisfatório os resultados obtidos a partir da análise numérica. Para ajuste dos resultados foi empregado um polinômio de ordem cúbica, sendo este apresentado pela Eq. (4):

$$k_l = -1,863\eta^3 + 2,9189\eta^2 - 1,6355\eta + 5,4361 . \quad (4)$$

onde:

$$\eta = b_2/b_1 . \quad (5)$$

A equação obtida apresenta um coeficiente de correlação linear (R^2) igual a 0.87. Esse coeficiente corresponde a uma medida de ajustamento de um modelo estatístico em relação aos valores observados. Um valor elevado para esse termo indica que o modelo consegue se ajustar bem à amostra. O valor obtido foi considerado satisfatório, em função da gama de variações empregadas na análise.

Dessa forma, uma equação geral que representa o comportamento local de perfis S enrijecidos submetidos à compressão uniforme foi obtida. Essa formulação é válida para as seguintes relações:

$$0,2 \leq \eta \leq 1,0 . \quad (6)$$

$$0,1 \leq \frac{b_3}{b_1} \leq 0,3 . \quad (7)$$

$$30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ . \quad (8)$$

A forma do gráfico obtido pode ser considerada satisfatória, assemelhando-se às curvas definidas em estudos paramétricos propostos por Batista [7], que definiu curvas para a determinação dos coeficientes de flambagem para diversos tipos de seção, como apresentado na Fig. 3.

A partir dos resultados apresentados, ainda foi possível a realização de análises que auxiliam na compreensão do comportamento da seção S enrijecida com elemento central inclinado, quando submetida à compressão uniforme. Constatou-se que o valor do coeficiente de flambagem local não varia de modo significativo com a mudança da relação b_3/b_1 , quando se mantém a relação b_2/b_1 fixa. No entanto, uma melhora do comportamento estrutural da seção em relação à estabilidade local é observada quando a relação b_2/b_1 diminui. Dessa forma, a variação de b_2/b_1 influencia diretamente no valor do coeficiente de flambagem local.

Por meio da análise, também foi verificado que o valor mínimo do coeficiente de flambagem associado ao modo local não depende da relação b_1/t . Entretanto, esse depende da dimensão dos enrijecedores, ou seja, da relação b_3/b_1 . Esse resultado é coerente, uma vez que enrijecedores muito largos podem acabar por precipitar a instabilidade da seção. É válido destacar que a presença de enrijecedores pouco largos pode ser condicionante no aparecimento de modo de falha distorcional.

A Fig. 11 e a Fig. 12 apresentam a variação do valor do coeficiente de flambagem local em função das larguras da alma e do enrijecedor do perfil, para os casos com inclinação do elemento central em 45° em que a relação b_1/t é igual a 75 e 100, respectivamente.

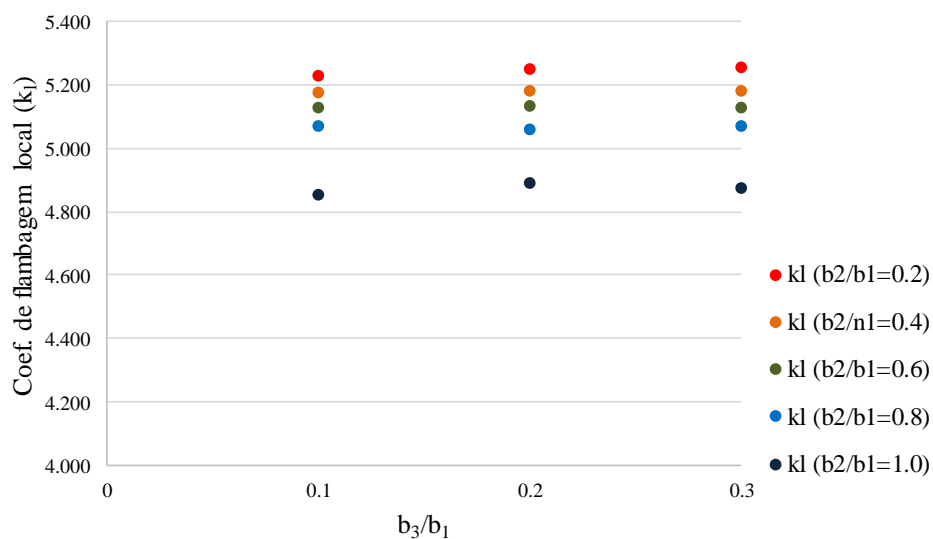


Figura 11. Variação do coeficiente de flambagem local em função das relações b_3/b_1 e b_2/b_1 para $b_1/t = 75$

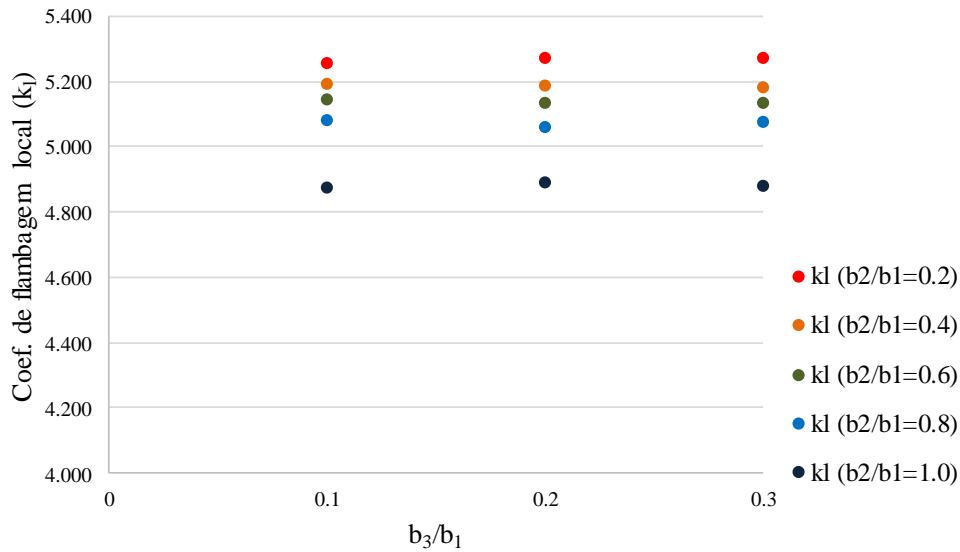


Figura 12. Variação do coeficiente de flambagem local em função das relações b_3/b_1 e b_2/b_1 para $b_1/t = 100$

5 Conclusão

Normatizações podem constituir critérios práticos e, comumente, auxiliam no dimensionamento de estruturas em aço. Entretanto, são pouco gerais e não abrangem especificidades, que fogem do escopo definido. Com isso, a análise via Método dos Elementos Finitos tornou-se difundida e aceita no meio técnico, já que consegue abarcar uma gama considerável de estruturas, fornecendo resultados precisos e coerentes com a realidade do comportamento dos componentes analisados. Sendo assim, no presente trabalho, um modelo numérico consistente e confiável foi elaborado, a fim de que o fenômeno de flambagem local do perfil S enrijecido com elemento central inclinado fosse considerado.

Então, a partir de uma análise paramétrica considerando diferentes dimensões e inclinações dos elementos do perfil, uma nova formulação foi proposta para a obtenção do coeficiente de flambagem local para a seção completa. Concluiu-se também que a variação das dimensões das mesas (elemento b_2) alterou o comportamento estrutural da seção e, conseqüentemente, o resultado do coeficiente de flambagem local para a seção completa. Enquanto isso, mudanças menos expressivas foram constatadas ao modificar as medidas dos outros elementos, inclusive dos enrijecedores, quando a relação entre as dimensões da mesa e da alma é mantida constante.

Além disso, observou-se que a relação referente à espessura tem um impacto pouco significativo no comportamento da seção e, como esperado, a dimensão adotada para o elemento de enrijecimento pode precipitar a instabilidade do perfil ou ser fator condicionante para surgimento de um modo de falha distorcional.

Ao fim, o trabalho resultou em um conjunto de informações relevantes sobre o estudo de flambagem local de barras de perfil S enrijecido com elemento central inclinado. Espera-se a continuidade dessas análises, por meio de parametrizações considerando diferentes inclinações do elemento central e variação na esbeltez dos enrijecedores.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro em forma de fomento à pesquisa concedido pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Referências

- [1] F. C. Rodrigues e R. B. Caldas. Steel Framing: Engenharia. Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2016.
- [2] C. E. Javaroni e R. M. Gonçalves. Perfis de aço formados a frio submetidos à flexão: Análise teórico-experimental. Cadernos de Engenharia de Estruturas, n. 20, pp. 148-178, 2002.
- [3] C. E. Javaroni, R. M. Gonçalves e O. L. Manzoli. Perfis de aço formados a frio: Instabilidade por distorção. Construção Metálica, ed. 78, pp. 26-31, 2007.
- [4] D. C. Braga. Avaliação de métodos numéricos de análise linear de estabilidade para perfis de aço conformados de aço formados a frio. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.
- [5] ABNT NBR 14762. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.
- [6] E. M. Batista. Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local-global buckling interaction. Thin-Walled Structures, vol. 48, pp. 345-356, 2009.
- [7] E. M. Batista. Étude de la stabilité des profils à parois minces et section ouverte de types U et C. Tese de Doutorado, Université de Liège, 1989.
- [8] SIMULIA. Abaqus/CAE User's Guide. 2017.
- [9] A. A. R. Costa. Estudo de flambagem local de perfis U enrijecidos em situação de incêndio. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- [10] B. W. Schaefer. CUFSM 5.01 Software. User Manual and Tutorials. 2018.