



Tema: Proteção das Estruturas – Corrosão e Fogo

Estudo Teórico da Flambagem Distorcional de Perfis U Enrijecido em Temperatura Elevada *

Armando Aguiar de Souza Cruz Neto¹

Possidonio Dantas de Almeida Neto²

Rodrigo Barreto Caldas³

Francisco Carlos Rodrigues⁴

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre a flambagem distorcional de perfis formados a frio, com seção transversal do tipo U enrijecido, em temperatura elevada. A pesquisa tem por base as prescrições relativas ao método simplificado de dimensionamento para estruturas de aço em temperatura elevada da norma europeia EN 1993-1-2:2005 e da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013, além das formulações constantes da ABNT NBR 14762:2010 para o dimensionamento de perfis formados a frio em temperatura ambiente. Foi implementado um modelo numérico com base no método dos elementos finitos e no método das faixas finitas. Esse modelo numérico foi calibrado com resultados experimentais disponíveis na literatura. Com esse modelo calibrado, será analisada analítica e numericamente a variação do fator de redução da resistência ao escoamento do aço de seções sujeitas à flambagem local em temperatura elevada relativo à temperatura ambiente, $k_{\sigma,\theta}$, em função da temperatura para os casos de flambagem distorcional.

Palavras-chave: Flambagem Distorcional; Temperatura Elevada; Flambagem Local; Método dos Elementos Finitos.

Lipped Channels Profiles Theoretical Study of Distortional Buckling in Elevated Temperature

Abstract

This paper presents a study on distortional buckling of cold-formed profiles, on C lipped channel cross section in high temperature. The research is based on the simplified design method for steel structures at elevated temperature of european standard EN 1993-1-2:2005 and Brazilian standard ABNT NBR 14323:2013, besides the formulations proposed by ABNT NBR 14762:2010 for the design of cold-formed profiles at room temperature. A numerical model has been implemented based on the finite element method and the finite strip method. This numerical model has been calibrated with experimental results available in the literature. With this calibrated model, will be analyzed analytically and numerically the variation of the reduction factor for the yield strength of class 4 sections, $k_{\sigma,\theta}$, as a temperature function for cases of distortional buckling.

* Contribuição técnica ao **Construmetal 2014** – Congresso Latino-Americano da Construção Metálica – 02 a 04 de setembro de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



Keywords: Distortional Buckling; Elevated Temperature; Local Buckling; Finite Element Method.

¹ Engenheiro Mecânico/UFMG, Mestrando do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Graduando do curso de Engenharia Civil da UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Civil/UFMG, Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, Professor Associado, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Engenheiro Civil/UFMG, Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, Professor Titular, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Uma característica importante dos perfis formados a frio é a grande variabilidade de seções transversais que podem ser fabricadas, possibilitando sua aplicação em diferentes áreas, atendendo aos mais diversos sistemas estruturais e construtivos. Além disso, a fabricação dos perfis formados a frio requer equipamentos mais simples, quando comparados com os de perfis laminados e soldados, podendo ser feita em pequenos galpões, facilitando assim sua disponibilidade no mercado.

Os perfis formados a frio, quando constituídos por chapas muito finas de aço, podem estar sujeitos a fenômenos de instabilidades locais, além das instabilidades globais. Esses fenômenos são os responsáveis pela falha do perfil antes de alcançar o escoamento da seção.

Em temperatura elevada, o aço dos perfis formados a frio sofre degenerescência de suas propriedades. Neste caso, para calcular a degenerescência do aço, são utilizados fatores de redução que nada mais são do que a razão entre o valor da propriedade à temperatura elevada pela propriedade à temperatura ambiente.

Atualmente, a norma europeia EN 1993-1-2:2005 e a norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 propõem o uso de três fatores: o fator de redução do módulo de elasticidade do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente, $k_{E,\theta}$; o fator de redução da resistência ao escoamento do aço de seções sujeitas à flambagem local em temperatura elevada relativo à temperatura ambiente, $k_{\sigma,\theta}$; e o fator de redução da resistência ao escoamento do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente, $k_{y,\theta}$. O fator $k_{\sigma,\theta}$ é definido para uma deformação residual de 0,2% enquanto que $k_{y,\theta}$ é definido para uma deformação total de 2%. A Figura 1 apresenta a variação desses fatores em função da temperatura do aço.

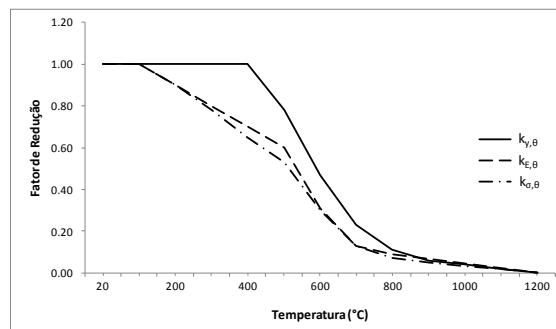


Figura 1: Variação dos fatores $k_{y,\theta}$, $k_{\sigma,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ em função da temperatura do aço (EN 1993-1-2:2005)



Dessa forma, para seções sujeitas à flambagem local, utiliza-se o fator de redução $k_{\sigma,\theta}$ para o cálculo da força resistente do perfil sob compressão centrada tanto para flambagem local quanto para flambagem distorcional; caso contrário, utiliza-se $k_{y,\theta}$. A relação entre os valores de $k_{\sigma,\theta}$ e $k_{y,\theta}$ pode chegar a 0,65 e, conforme a EN 1993-1-2:2005 e a ABNT NBR 14323:2013, o fator de redução $k_{\sigma,\theta}$ deve ser utilizado mesmo quando o perfil está no limiar da ocorrência de flambagem local. Observa-se que, segundo essa abordagem, ocorre uma descontinuidade no cálculo dos perfis formados a frio em altas temperaturas, uma vez que se utiliza o fator de redução $k_{y,\theta}$ em perfis onde não ocorre a flambagem local e o fator $k_{\sigma,\theta}$ em caso contrário.

Costa (2012) estudou o comportamento de perfis U enrijecidos em que houvesse o modo predominante de flambagem local sob temperatura elevada, revelando que os resultados analíticos apresentam valores discrepantes em relação aos resultados numéricos, ocasionando perfis tanto a favor (penalizando o perfil) quanto contra a segurança (perfis com força resistente menor do que a calculada). Portanto, de maneira semelhante, deve ser estudado como essa descontinuidade pode afetar o tratamento de perfis em que haja falha predominante devido à flambagem distorcional sob temperatura elevada.

1.2 Objetivos

Investigar o comportamento de perfis U enrijecidos para a situação de flambagem distorcional em temperatura elevada.

1.2.1 Objetivos Específicos

Desenvolver um modelo numérico capaz de simular o comportamento da flambagem distorcional de perfis U enrijecidos formados a frio em temperatura elevada.

Calibrar o modelo numérico desenvolvido com os resultados experimentais e numéricos disponibilizados na literatura e com os resultados analíticos das normas EN-1993-1-3:2006, EN 1993-1-2:2005, ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 14323:2013.

Verificar a validade e, caso necessário, ajustar o fator de redução da resistência ao escoamento do aço de seções sujeitas à flambagem local em temperatura elevada relativo à temperatura ambiente a partir dos resultados numéricos encontrados. Estabelecer um modelo matemático desse ajuste, tal como Costa(2012) realizou para a flambagem local, em função da esbeltez do perfil ou outro parâmetro geométrico que apresente melhor relação.

Os resultados do modelo poderão ser utilizados para sugestões de futuras revisões da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013.

2 Revisão Bibliográfica

Os modelos numéricos de perfis formados a frio são basicamente problemas de geometria (imperfeições geométricas e análise de segunda ordem) e de material (curva tensão-



deformação do aço em temperatura ambiente e em temperatura elevada), ambos de comportamento não-linear (Schafer, 2010). E para se obter um modelo que se aproxime de forma representativa da realidade, é preciso não apenas calcular de forma satisfatória as não linearidades, mas entender como as imperfeições geométricas afetam o modelo e utiliza-las da melhor forma.

2.1 Análise de Flambagem Elástica

A análise de flambagem elástica é utilizada para obter os valores das cargas críticas de flambagem local, distorcional e global, assim como as formas dos modos de flambagem. Esses resultados são importantes indicadores do comportamento do perfil (Schafer, 2010). É pelo valor da análise de flambagem elástica que o método da resistência direta calcula a força resistente do perfil, tanto para a flambagem local quanto para a flambagem distorcional. E utilizando a forma do modo de flambagem é possível inserir imperfeições geométricas iniciais no modelo numérico.

São disponibilizadas várias ferramentas para o cálculo da análise de flambagem, tais como os softwares: CUTWP, CUFSM e o Abaqus (Schafer, 2010). Os dois primeiros são programas livres disponibilizados na internet e o terceiro é um conhecido programa comercial. O CUTWP é um programa que resolve problemas de estabilidade global da barra baseadas na teoria clássica de viga e na teoria de torção e empenamento de Vlasov. O CUFSM é baseado no método das Faixas Finitas (MFF) e muito utilizado para perfis formados a frio. Este método possibilita uma primeira análise do comportamento do perfil, ao obter as cargas de flambagem local, global e distorcional para vários comprimentos de meia-ondas. O Abaqus é um programa comercial de uso geral baseado no método dos elementos finitos (MEF).

2.2 Análise Não-Linear

Análises não-lineares de geometria e de material, considerando as imperfeições iniciais e utilizando elementos de casca, são o modelo padrão para a análise numérica dos perfis formados a frio (Schafer, 2010). Esses modelos são altamente sensíveis a fatores como imperfeição geométrica, tensão residual, critério de escoamento, condições de contorno, tipo de elemento e tamanho de malha utilizados.

As imperfeições iniciais possuem grande importância para os perfis formados a frio, pois as forças resistentes e os mecanismos de pós-flambagem são muito sensíveis à forma e ao valor da imperfeição escolhida (Schafer, 2010).

As imperfeições iniciais podem ser pensadas como um desvio de uma geometria “perfeita” (Schafer, 1998). Para os perfis formados a frio, as imperfeições locais têm grande influência na força resistente do perfil e podem ser separadas em dois tipos: referente às imperfeições de flambagem local (tipo d1) e referente às imperfeições de flambagem distorcional (tipo d2), ambas mostradas na figura 2. Em seu estudo, Schafer (1998) considera as imperfeições como

variáveis aleatórias, utilizando uma abordagem probabilística. Ele também sugere a utilização de um modelo simplificado, considerando as maiores imperfeições encontradas, sendo este o método mais utilizado por vários autores (Heva, 2009; Ranawaka, 2010; Schafer, 2010).

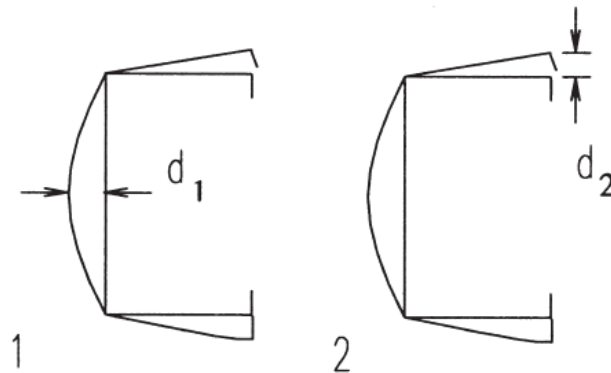


Figura 2: Tipos de imperfeições: Schafer, 1998

Para imperfeições do tipo d_1 , as magnitudes podem ser postas pelas seguintes fórmulas: $0,006b_w$ ou $6te^{-2t}$, o que for maior; sendo b_w o comprimento nominal da alma e t a espessura nominal da chapa do perfil. Para imperfeições do tipo d_2 , as imperfeições são iguais à própria espessura, limitadas a um valor máximo de 3 mm. Além das imperfeições locais, a literatura indica a utilização de imperfeições globais, mas estas somente são significativas em barras de esbelteza reduzida muito elevada. Heva (2009) sugere a utilização de $L/1000$ como um valor padrão utilizado por muitos autores, sendo L o comprimento total da barra. Em suas medições das imperfeições globais, todas as barras apresentaram valores menores do que $L/1000$, de forma que sua utilização fornece resultados mais conservadores.

Além do valor das imperfeições, a análise numérica necessita do formato dessas imperfeições, que é normalmente obtida pela análise de flambagem elástica. O Abaqus permite que sejam utilizados quantos modos de flambagem elástica forem necessários. Schafer (2010) comenta que a utilização do modo correto é essencial para encontrar um resultado semelhante ao real. A maneira mais comum de se conseguir isto é utilizando apenas o primeiro modo de flambagem. No entanto, nem sempre os resultados do primeiro modo condizem com a realidade.

A norma EN 1993-1-5:2004, anexo C, apresenta algumas resoluções importantes sobre o uso da modelagem numérica para efeito de cálculo. Uma delas diz respeito à utilização de mais de uma imperfeição, *i.e.*, mais de um modo de flambagem representando outro tipo de imperfeição. A norma diz que a imperfeição acompanhante pode ser reduzida em 70%, mas é possível utilizar 100% do valor e obter resultados mais conservadores.



Nos perfis formados a frio, as tensões residuais não são muito significativas para o valor da força resistente quando não é considerado o efeito de encruamento do processo de fabricação (Schafer, 2010). Assim, o efeito negativo da tensão residual pode ser considerado como aproximadamente nulo devido ao efeito positivo do trabalho a frio. Em temperaturas elevadas, as tensões residuais e o efeito do trabalho a frio são ainda menos significativos, pois esses efeitos diminuem ou até mesmo somem devido ao alívio de tensões residuais e à perda do encruamento com o aumento da temperatura.

Em relação ao critério de escoamento, é importante notar diferenças no comportamento entre os aços de alta e baixa resistência. Para os aços de baixa resistência, *e.g.*, aços com resistência ao escoamento de até 350 MPA, podem ser utilizados os fatores de redução e a curva tensão-deformação do aço disponibilizados pela EN 1993-1-2:2005. No entanto, alguns autores têm outros modelos para alguns aços de baixa resistência específicos (Heva, 2009; Chen, 2007b). Quando o aço é de alta resistência, é preferível a utilização das curvas e propriedades disponibilizadas pela literatura (Heva, 2009; Ranawaka, 2010; Chen, 2007b), pois esses aços sofrem uma degenerescência maior devido ao efeito de recristalização dos grãos com o aumento da temperatura, e a conseqüente perda do encruamento e retorno às características do aço base, *i.e.*, o aço retorna às características antes de ter sofrido trabalho a frio (Outinen, 2001). Nesses casos, o modelo disponibilizado pelo Eurocode não se ajusta bem.

Para as condições de contorno de um modelo numérico de perfis formados a frio, pode-se considerar a existência de dois tipos: local e global.

A condição de contorno global refere-se à barra como um todo, e diz respeito às condições tradicionais de rotação dos eixos principais. Essa condição está associada ao coeficiente de flambagem de barras isoladas. Ensaios experimentais utilizam tanto condições de engaste quanto de apoio simples para as condições globais.

A condição local diz respeito à condição de fixação das placas, *i.e.*, das condições de rotação das bordas dos elementos do perfil, e possui relação com o coeficiente de flambagem local do elemento. Em ensaios experimentais, o perfil é normalmente apoiado sobre uma placa rígida (placa de base), permitindo a rotação da borda, o que não aconteceria se o perfil fosse soldado na placa de base.

O modelo é normalmente simulado através do método dos elementos finitos. Este método divide o modelo a ser simulado em vários elementos. Os elementos possuem funções de forma que aproximam as deformações e tensões internas do modelo. Os elementos mais simples possuem funções de forma de aproximação linear, mas podem ter aproximações de ordem superior. Os nós do elemento, pela teoria do elemento finito, terão valores iguais aos valores obtidos analiticamente, desde que alguns pré-requisitos teóricos sejam atendidos.



Alguns elementos podem ter um número menor de pontos de Gauss (os pontos de Gauss são utilizados para realizar a integração numérica das equações do elemento), sendo denominados de integração reduzida. A integração reduzida diminui o tempo de processamento mas ocasiona pequenos erros nos resultados, onde em certos momentos isso é desejável. Quanto menor o tamanho do elemento, mais próximo será do resultado “real”, pois menores serão os erros. Porém, malhas de tamanho muito pequeno podem, ao contrário, introduzir outros erros indesejáveis no resultado.

Uma vez modelado o problema e definido a malha, pode-se usar o método de Riks para uma análise não linear geométrica e física. No entanto, para obter resultados mais realistas nesse método, é necessário utilizar as formas dos modos de flambagem elástico como imperfeições iniciais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste estudo foi dividida em 3 etapas: a construção do modelo numérico, a calibração do modelo numérico e a comparação do fator de redução dado em norma com os resultados numéricos.

3.1 Modelo Numérico

Os modelos numéricos serão desenvolvidos com o auxílio do programa comercial Abaqus (Simulia, 2013), utilizando o método de Riks. Para facilitar a simulação de vários perfis diferentes, foi criado um *script* na linguagem *python*. Os principais parâmetros utilizados no *script* são as dimensões do perfil, as imperfeições iniciais, as propriedades do aço, temperatura do aço, o modelo da curva tensão-deformação do aço juntamente com as curvas que definem os fatores de redução do aço, as condições de contorno, o tipo de elemento e o tamanho do elemento.

Para ajustar o fator de redução da resistência ao escoamento do aço de seções sujeitas à flambagem local em temperatura elevada relativo à temperatura ambiente, $k_{\sigma,\theta}$, foram estabelecidos os seguintes parâmetros para os modelos numéricos:

- Para a construção das geometrias do modelo, foram utilizadas as formulações dadas pela norma brasileira ABNT NBR 6355:2013 para o cálculo da linha média, propriedades geométricas e as arestas de encontro dos elementos (paredes) da seção, onde estas são consideradas como cantos arredondados. A espessura de revestimento de zinco é também considerada quando especificada;
- Para a condição de contorno local, serão utilizados elementos de bordas simplesmente apoiadas;
- Para a condição de contorno global, a barra será simplesmente apoiada, mas sem permitir torção nas seções dos apoios;
- Será utilizado o modelo da curva tensão-deformação da norma EN 1993-1-5:2005, assim como para as curvas dos fatores de redução do escoamento do aço e do módulo



de elasticidade. Serão utilizados aços com resistência ao escoamento de 250MPa e 350MPa, com módulo de elasticidade de 200 GPa;

- Não serão consideradas as tensões residuais ou o efeito do trabalho a frio no aço;
- Será utilizado o elemento de 4 nós com função de forma linear do Abaqus (S4). Schafer(2010) demonstrou que sua utilização, desde que com uma malha de tamanho adequado, apresenta bons resultados se comparado a outros elementos.
- Para o tamanho da malha, além da precisão do resultado, deve-se considerar o tempo necessário de processamento do modelo. Após alguns testes de convergência e baseado no trabalho de Ranawaka (2010), foi escolhido uma malha com elementos de dimensão máxima de 5 mm;
- Serão utilizadas as fórmulas para as imperfeições locais dadas por Schafer (1998). Para a imperfeição global, caso seja necessário, será utilizado L/1000, de acordo com Heva (2009);
- Os modos de flambagem utilizados como imperfeição inicial são muito importantes para o resultado final. Portanto, na análise em temperatura ambiente, serão testadas as seguintes combinações: Modo Distorcional; Modo Local + Modo Distorcional; Modo Local + Modo Global. O Modo Global só será utilizado se ele aparecer em algum dos 100 primeiros modos da análise de flambagem elástica. É importante notar que muitas vezes o primeiro modo é o de flambagem local. Em barras de elevada esbelteza reduzida o primeiro modo é o de flambagem global. Quando o perfil possui uma relação N_l/N_d muito alta, o primeiro modo é normalmente o de flambagem distorcional. Será testado o sentido da imperfeição acompanhante (positiva ou negativa) como especificado na EN 1993-1-5:2004. O modo de flambagem local nunca será considerado como modo acompanhante, e não será testado o sentido da sua imperfeição, pois como citado por Heva (2009), o sentido positivo da flambagem local apresenta resultados mais condizentes;
- Essas combinações serão feitas utilizando as seguintes temperaturas: 20°C, 400°C, 550°C e 700°C. Será considerada apenas a combinação que apresentar o menor valor de força resistente. Como este estudo é focado na flambagem distorcional, a combinação deve apresentar pelo menos o modo distorcional como um dos modos de flambagem;

3.2 Calibração do Modelo Numérico

Para a calibração do modelo numérico serão utilizados 4 trabalhos, com resultados experimentais e numéricos, em temperatura ambiente e em temperatura elevada. O modelo, no entanto, deverá ser ajustado ao mesmo modelo utilizado pelo autor. Os pontos principais que precisam ser alterados no modelo são: valor das imperfeições iniciais, as condições de contorno, o modelo da curva tensão-deformação e a curva dos fatores de redução, ambos variando com a temperatura.



3.2.1 Chen(2007a)

Chen (2007a), utilizando os perfis U enrijecidos ensaiados em temperatura ambiente e em temperatura elevada nos estudos realizados por Young (1998) e Feng (2003), realizou análises numéricas em temperatura ambiente e em temperatura elevada, num total de cinco tipos de perfis com comprimentos variando de 200 mm a 3000 mm. Para o material foi utilizado o modelo disponibilizado pelo próprio autor (Chen, 2007b). O valor da imperfeição inicial utilizada é igual a espessura quando não é comentada a amplitude da imperfeição nos trabalhos originais. Chen (2007a) demonstrou em seu estudo que a utilização das normas em temperatura ambiente com a redução das propriedades do material em temperatura elevada apresentam bons resultados.

Serão utilizados todos os perfis de Chen (2007a) para a calibração do modelo numérico. Foi dada preferência para a utilização de dois modos de flambagem, sendo o segundo modo utilizado a 70% do valor da imperfeição, mantendo as demais condições iguais ao do autor.

3.2.2 Ranawaka (2010)

Ranawaka (2008) realizou ensaios experimentais em perfis U enrijecidos e U enrijecidos com abas em temperatura elevada. Os perfis escolhidos tiveram como falha predominante a flambagem distorcional, sendo a maioria dos perfis U enrijecidos do tipo 30x30x5 mm. As espessuras variaram entre 0,6 a 0,9 mm. Foram utilizados perfis com aços de alta resistência (620 MPa) e baixa resistência (320 MPa). A partir desses resultados experimentais, Ranawaka (2010) simulou os modelos numéricos. Os valores médios das imperfeições iniciais foram mensurados nos ensaios experimentais. Nos aços de alta resistência, as imperfeições foram praticamente iguais à espessura. Para os aços de baixa resistência, as imperfeições foram aproximadamente 60% da espessura. Foram utilizados apenas os modos de flambagem distorcional para a simulação numérica. Os perfis foram soldados à placa de base, e esta não possuía nenhum movimento de rotação (engastada).

Foram empregados apenas os perfis do tipo U enrijecido para a calibração, utilizando um ou dois modos de flambagem como imperfeição inicial, mantendo as demais condições iguais às dos autores.

3.2.3 Heva (2009)

Heva (2009) realizou ensaios experimentais com perfis U enrijecidos sujeitos à flambagem distorcional ou flambagem global e perfis U simples sujeitos à flambagem local ou flambagem global, ambos sob temperatura ambiente e temperatura elevada. Foram utilizados perfis com aço tanto de alta como de baixa resistência. Para os modos de imperfeição inicial, utilizou-se apenas a flambagem local, com valores disponibilizados por Schafer (1998). O material utilizado na análise numérica foi baseado no modelo de Ramberg-Osgood. Os perfis foram



soldados à placa de base, e esta estava engastada no equipamento (não permitia rotação). Heva(2009) concluiu que os resultados analíticos das normas previram razoavelmente bem os resultados experimentais, citando apenas alguns pontos onde os resultados saíram do esperado.

Na calibração foram utilizados apenas os perfis U enrijecidos, utilizando até dois modos de flambagem como imperfeição inicial. Como o autor não utiliza imperfeições do tipo d2 (Figura 10), foi utilizado o valor da espessura.

3.2.4 Silvestre (2007)

Silvestre (2007) simulou vários pilares e vigas na tentativa de verificar a interação local-distorcional desses perfis em temperatura ambiente. Os perfis foram escolhidos por tentativa e erro, e cada perfil foi testado para três valores de resistência ao escoamento. Os valores de imperfeição de 10% da espessura e um modelo bi-linear da curva tensão-deformação do aço foram utilizados. Não ficou claro quando Silvestre (2007) utilizou os modos de flambagem local ou de flambagem distorcional para a imperfeição inicial durante sua análise numérica. Silvestre (2007) concluiu em seu trabalho que a interação local-distorcional ocorre para índices de esbeltez reduzido para flambagem distorcional maiores do que 1,2.

Para a calibração deste trabalho, serão utilizados apenas os perfis com resistência ao escoamento de 250MPa e adotadas os valores e os modos das imperfeições iniciais citadas no item 3.1.

3.3 Comparação do fator de redução

Serão testados pelo menos 100 perfis, e eles devem apresentar como modo de falha predominante a flambagem distorcional. Estes perfis devem estar pré-qualificados de acordo com o appendix 1 da norma americana AISI S100-2007 para a utilização do Método da Resistência Direta e da norma ABNT NBR 14762:2010. Caso o perfil apresente interação entre os modos local e distorcional e possua grande discrepância em relação aos valores utilizando apenas imperfeições locais e/ou distorcionais, estes serão descartados. Adicionalmente, a carga crítica de flambagem local do perfil deve ser maior ou próximo da carga crítica de flambagem distorcional ($N_l/N_d \geq 0.9$).

Com os resultados numéricos das forças resistentes, serão calculados segundo a equação 1 os valores do fator de redução para flambagem distorcional de perfis submetidos à flambagem local, e montados gráficos semelhantes às das figuras 2,3 e 4. (onde estão as figuras 3 e 4?)

$$k'_{\sigma,\theta} = \frac{\chi_{dist}^{N_{u,\theta}}}{A_g f_y} \quad (1)$$



onde: χ_{dist} é o fator de redução do esforço resistente, associado à flambagem distorcional; $N_{u,\theta}$ é a força resistente do perfil na temperatura θ ; A_g é a área bruta do perfil e f_y é a resistência ao escoamento do aço.

Com esses resultados, será possível comparar com o fator de resistência fornecido pela norma. Caso apresente diferença, será possível realizar uma proposta de revisão da norma brasileira para incluir esse ajuste para a flambagem distorcional, e também o ajuste realizado por Costa(2012) para a flambagem local.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A etapa da calibração já foi realizada da maneira como descrita no item de metodologia. Como este estudo está em andamento, não há resultados a serem demonstrados, exceto os realizados para a calibração do modelo. As tabelas com os resultados da calibração foram omitidas, apenas apresentando os valores médios e o desvio padrão, assim como a discussão desses resultados.

4.1 Calibração

A comparação com os resultados numéricos obtidos por Chen(2007a) para o perfil do tipo L36 mostram uma boa aproximação do modelo, com valor médio de 0,95 e desvio padrão de 0,11.

No estudo de Ranawaka(2010), quando são utilizados o modo local e o distorcional como imperfeição inicial do modelo, os resultados ficam em 0,75 em relação aos valores experimentais, com 0,10 de desvio padrão. Quando se utiliza apenas a imperfeição distorcional, os resultados melhoram para 0,97 dos valores experimentais, com 0,13 de desvio padrão. Os valores calculados segundo a norma ABNT NBR 14762:2010 se aproximaram melhor desse segundo resultado, utilizando apenas a flambagem distorcional. Isso demonstra que a análise numérica pode obter valores muito conservativos quando se trata de flambagem distorcional. Em todos os outros autores, não houve diferença significativa entre o modo local interagindo com o modo distorcional e o modo distorcional puro. Vale ressaltar que todos os perfis estudados por Ranawaka(2010) possuíam cargas críticas de flambagem distorcional menores do que as de flambagem local ($N_l/N_d > 1,07$).

No trabalho realizado por Heva(2009), a média dos valores obtidos foi de 86% dos resultados experimentais, com desvio padrão de 13%. No entanto, ao compararmos com os resultados numéricos obtidos por Heva (2009), estes ficam com média de 0,93 e 0,045 de desvio padrão. Isso demonstra que, apesar de uma maior dispersão e erros sistemáticos nos valores experimentais, o modelo numérico se aproxima muito bem do modelo numérico de Heva (2009).

Os resultados comparativos com Silvestre (2007) foram agrupados na tabela 1. As três colunas indicam os modos que foram utilizados para as imperfeições iniciais. Os perfis podem ser



agrupados em dois grupos importantes, os que possuem índice de esbeltez reduzido para flambagem distorcional menores do que 1 e os que possuem índice de esbeltez reduzido maiores do que 1,4.

Tabela 1: Resultados de calibração tendo como referência os resultados de Silvestre (2007)

Modo	D	L+D	L
$\lambda_d < 1$	$0,90 \pm 0,03$	$0,89 \pm 0,04$	$0,91 \pm 0,05$
$\lambda_d > 1,4$	$1,09 \pm 0,04$	$1,21 \pm 0,09$	$1,33 \pm 0,09$
Total	$1,00 \pm 0,10$	$1,06 \pm 0,17$	$1,13 \pm 0,22$

λ_d – Índice de esbeltez reduzido associado a flambagem distorcional; D – Distorcional; L – Local.

Como observado, os resultados utilizando as três configurações de imperfeição inicial para $\lambda_d < 1$ foram muito semelhantes, sem diferenças significativas. Já para $\lambda_d > 1,4$, apenas os resultados utilizando a imperfeição distorcional pura foram melhores. A relação entre a carga crítica de flambagem local pela carga crítica de flambagem distorcional (N_l/N_d) dos perfis variou entre 0,9 e 1,24, independente do índice de esbeltez reduzida para flambagem distorcional. Como os resultados de Silvestre (2007) são apenas numéricos, *i.e.*, não há dado experimental comprobatório, fica difícil retirar alguma conclusão definitiva. Para isso era importante a realização de testes experimentais em alguns dos perfis com índice de esbeltez reduzido maior do que 1.4.

5 Considerações Finais

É possível observar uma boa aproximação dos resultados numéricos com os resultados experimentais e/ou resultados numéricos obtidos na literatura, como mostram os resultados apresentados na calibração. No entanto, ainda não está muito claro como a utilização de modos diferentes de flambagem pode afetar a flambagem distorcional, principalmente se houver interação local-distorcional. Portanto, o estudo a ser desenvolvido evitará ao máximo o aparecimento da interação local-distorcional, principalmente em perfis como os apresentados em Ranawaka (2010).

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro em forma de fomento à pesquisa concedido pelo CNPq e pela FAPEMIG.



REFERÊNCIAS

ABNT NBR 14323:2013. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Texto-Base da Norma - Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio.

ABNT NBR 14762:2010. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Texto-Base da Norma - Dimensionamento de Estruturas de Aço constituída por perfis formados a frio.

CHEN, J.; D. YOUNG, B. (2007a) Cold-formed steel liped channel columns at elevated temperatures. *Engineering Structures*, v. 29, p. 2445–2456, 2007.

CHEN, J.; D. YOUNG, B. (2007b) Experimental investigation of cold-formed steel material at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, v. 45, p. 96–110, 2007.

COSTA, A.A.R. (2012) Estudo da Flambagem Local de Perfis U Enrijecidos em Situação de Incêndio. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 120p. 2012

EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of Steel Structures, Parte 1.2: General Rules, Structural Fire Design. European Committee for Standardization.

EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.3: General Rules, Supplementary rules for Cold-formed Thin gauge Members and Sheeting. European Committee for Standardization.

FENG, M.; WANG, Y.C.; DAVIES, J.M. (2003); Structural behaviour of cold-formed thin-walled short steel channel columns at elevated temperatures. Part 1: Experiments. *Thin-Walled Structures* 2003;41(6):543–70.

HEVA, Y. B. (2009), Behavior and Design of Cold-formed Steel Compression Members at Elevated Temperatures. School of Urban Developments, Queensland University of Technology – QUT. 2009

OUTINEN, J.; KAITILA, O.; MÄKELÄINEN, P. (2001); High-Temperature Testing of Structural Steel and Modelling of Structures at Fire Temperatures: Research Report. Helsinki University of Technology, 2001.

RANAWAKA, T.; MEHENDRAN, M. (2008) Distortional buckling tests of cold-formed steel compression members at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 65, p. 249–259, 2008.



RANAWAKA, T.; MEHENDRAN, M. (2010) Numerical modeling of light gauge cold-formed steel compression members subjected to distortional buckling at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, v. 48, p. 334–344, 2010.

SCHAFER, B.W.; PEKÖZ, T. (1998) Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 47, p. 193–210, 1998.

SCHAFER, B.W.; LI, Z.; MOEN, C.D. (2010) Computational modeling of cold-formed steel. *Thin-Walled Structures*, v. 48, p. 752–762, 2010.

SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D.; DINIS, P. B. (2007) Aplicação do método da resistência direta a colunas e vigas de aço enformadas a frio com seção em C afetadas por interação entre instabilidade local-de-placa e distorcional. *REM: R. Esc. Minas*, v. 60, p. 341-354, 2007.

SIMULIA CORP. (2013). Software ABAQUS/CAE, versão 6.13. Dessel Systems Simulia Corp., USA.