



AValiação DA Confiabilidade DE BARRAS DE PERFIS FORMADOS A FRIO SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES COM O EMPREGO DO MÉTODO FORM.

Assessment of the reliability of cold-formed steel members subjected to bending using the FORM method.

Fernanda Ferra Andrade Toledo (P) (1); Marcílio Sousa da Rocha Freitas (2); André Luis Riqueira Brandão (3)

(1) Eng. Civil, aluna de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, Brasil.

(2) Dr. Prof. Titular, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, Brasil.

(3) Dr. Prof. Adjunto, Universidade Federal de Itajubá, Itabira - MG, Brasil

E-mail para correspondência: ffandrade15@yahoo.com.br; (P) Apresentador

Resumo: As estruturas devem oferecer segurança e boas condições de utilização, de forma que não venham a se romper ou falhar ou mesmo provocar desconforto a seus ocupantes. O estudo da confiabilidade estrutural se relaciona com a avaliação da probabilidade de violação de um estado limite para um sistema estrutural. Assim, o objetivo deste trabalho é aplicar uma metodologia para análise dos índices de confiabilidade para barras de perfis formados a frio submetidas à flexão simples, projetadas segundo a norma brasileira ABNT NBR 14762:2010 e a norma americana AISI S100:2016. Primeiramente, foi elaborado um banco de dados de resultados experimentais de alguns autores para o estado limite em questão e obtidas as forças resistentes para cada modelo ensaiado, com a utilização da NBR 14762:2010. É avaliado, também, o erro de modelo (relação entre os valores teórico e experimental), fornecendo um resultado estatístico, também chamado de coeficiente profissional. Em seguida, foi empregado o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) para obtenção do índice de confiabilidade (β) em função do coeficiente de ponderação da resistência (γ). Os resultados são comparados ao índice de confiabilidade alvo (β_0), da calibração da norma americana.

Palavras chaves: estruturas; confiabilidade; perfis formados a frio; vigas em aço; flexão.

Abstract:

The structures must provide safety and good conditions of use, so that they will not break or fail or even cause discomfort to its occupants. The study of structural reliability is related to the assessment of the probability of violation of a limit state for a structural system. Thus, the objective of this work is to apply a methodology for the analysis of reliability indexes for cold formed members subjected to bending, designed according to the Brazilian standard ABNT NBR14762:2010 and the American standard AISI S100:2016. Firstly, a database of experimental results of some authors was elaborated for the limit state in question and the strengths were obtained for each model tested, using NBR 14762: 2010. The model error (relation between the theoretical and the experimental values) is also evaluated, providing a statistical result, also called the professional coefficient. Then, the First Order Reliability Method (FORM) was



used to obtain the reliability index (β) as a function of the resistance coefficient (γ). The results are compared to the target reliability index (β_0) used in the calibration of the American standard.

Keywords: structures; reliability; cold-formed steel members; steel beams; bending.

1 INTRODUÇÃO

A utilização da estrutura metálica no Brasil como tecnologia construtiva começou em meados do século XIX, com o surgimento do ferro fundido, e evoluiu até os dias atuais com o uso do aço. Os perfis formados a frio, que são alvo de estudo deste trabalho, tem sido utilizados em diversos segmentos e representam uma solução economicamente viável e bem aceita na construção metálica, em consequência da rapidez e economia exigidas pelo mercado, além do grande número de seções transversais obtidas, facilidade na montagem, obtenção de produções estruturais mais esbeltas e eficientes, se comparados aos perfis laminados e soldados.

O dimensionamento adequado de uma estrutura pode ser entendido como a escolha correta do modelo estrutural a ser utilizado e dos perfis que formarão este sistema, buscando garantir sua segurança e sua capacidade de desempenhar a função à qual se destina de forma satisfatória, aliando sempre segurança, eficiência e economia. O objetivo principal da engenharia estrutural é assegurar que a estrutura atenda aos requisitos básicos de sua função sem entrar em colapso ou deformar/vibrar excessivamente, respeitando as condições econômicas. Porém, a presença de diversas incertezas (nas ações, nas propriedades dos materiais, na resistência ao escoamento do aço, o módulo de elasticidade do material, o comprimento das barras, entre outras) dificulta esta tarefa.

A avaliação da confiabilidade tem exercido importante papel na engenharia estrutural, já que a busca por estruturas com melhor desempenho, menor custo e mínima chance de falha cresce cada vez mais. O conceito de segurança estrutural concilia os aspectos qualitativo e quantitativo, onde o primeiro diz se uma estrutura é ou não segura e o segundo, tenta atribuir um valor ao grau de segurança, constituindo-se assim, em uma ferramenta valiosa para a análise da segurança das estruturas, fornecendo uma medida mais precisa do grau de segurança, uma vez que esse se baseia na determinação de probabilidades de falha (P_f) ou índices de confiabilidade.

O presente estudo utiliza dados experimentais obtidos por Yu e Schafer (2006, 2003), Javaroni e Gonçalves (2006) e Javaroni (1999), no qual foram analisados perfis de aço formados a frio U simples e U enrijecido através de testes de flambagem. Foram obtidas as capacidades resistentes à flexão pelo Método da Resistência Direta e pelo Método da Seção Efetiva (NBR 14762:2010). A comparação entre os resultados experimental e teórico fornece as informações de uma variável aleatória definida como coeficiente profissional, ou erro do modelo, utilizada na análise de confiabilidade estrutural.

2 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

A análise de confiabilidade tem como problema básico assegurar que a resistência R seja maior que o efeito do carregamento Q , ou seja, $R > Q$, ao longo da vida útil da estrutura. Como resistência e carregamento são variáveis aleatórias, a análise da confiabilidade só é possível em termos probabilísticos $P(R > Q)$. Essa probabilidade

indica a medida real da confiabilidade do sistema e deve ser medida em termos de probabilidade de falha, como exposto a seguir:

$$P_f = P(\text{falha}) = P(R < Q) \quad (1)$$

Essa probabilidade pode ser calculada pela integração da função densidade de probabilidade conjunta $f_{req}(r,q)$ das variáveis aleatórias envolvidas. No caso de variáveis aleatórias independentes tem-se:

$$P_f = \int_0^\infty \left[\int_0^q f_R(r) dr \right] f_Q(q) dq = \int_0^\infty F_R(q) f_Q(q) dq \quad (2)$$

onde, $F_R(q)$ é a função distribuição acumulada de R avaliada no ponto q . A Equação (2) representa a equação básica do conceito de projeto baseado em uma análise probabilística. O fato de que nem sempre a distribuição acumulada de R ou a função densidade de Q são disponíveis de forma evidente, cria dificuldade na aplicação de tal equação.

O primeiro passo para a avaliação da confiabilidade ou probabilidade de falha de uma estrutura é escolher critérios de desempenho da estrutura e os parâmetros de solicitações e resistências relevantes para o problema. Assim, no lugar das variáveis Q e R haverá um vetor de variáveis básicas X , composto pelas variáveis aleatórias X_i . É necessário conhecer as relações funcionais entre as variáveis que correspondem a um determinado critério de desempenho. Essa relação é chamada função desempenho e pode ser escrita matematicamente como:

$$g(\underline{X}) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3)$$

onde, $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ é um vetor de variáveis de cálculo do sistema.

A chamada superfície de falha, ou função de estado-limite de interesse, pode ser definida no estado-limite onde $g(X) = 0$. Essa é a fronteira entre as regiões de segurança e de falha no espaço dos parâmetros de projeto e, também, representa o estado além do qual o sistema de engenharia não é mais capaz de desempenhar a função para a qual foi projetado (Hsiao, 1989).

Na figura 1 estão representados o estado-limite e as regiões seguras e de falha, onde, por simplicidade, R e Q são as variáveis aleatórias consideradas no projeto.

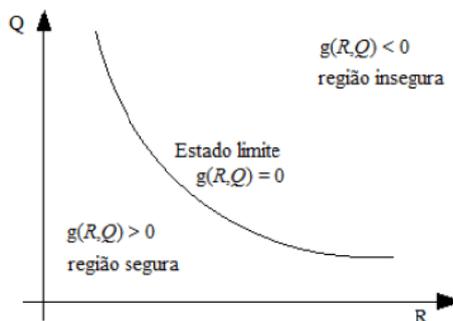


Figura 1. Ilustração do conceito de estado-limite

(Adaptado de Haldar; Mahadevan, 2000 por Brandão, 2012).

A Figura 2 mostra funções densidade marginais f_R e f_Q para R e Q , respectivamente, juntamente com a função densidade bivariada $f_{R,Q}(r,q)$.

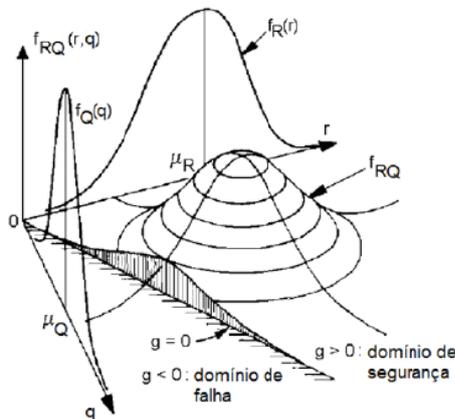


Figura 2. Região de integração para determinação da probabilidade de falha

(Adaptado de Melchers, 1999 por Brandão, 2012)

Usando a Equação (3), pode-se estabelecer que a falha ocorre quando $g(X) < 0$. Portanto, na Equação (4) a probabilidade de falha p_f é dada pela integral:

$$p_f = \int \dots \int_{g(\underline{x}) < 0} f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (4)$$

onde, $f_x(X_1, X_2, \dots, X_n)$ é a função densidade de probabilidade conjunta para as variáveis básicas X_1, X_2, \dots, X_n e a integração é realizada na região de falha, isto é, onde $g(X) < 0$. A distribuição conjunta pode ser substituída pelo produto das funções densidade individuais na integral, se as variáveis básicas forem estatisticamente independentes.

Os métodos podem ser classificados como aqueles baseados na teoria das probabilidades (e expansões em séries de Taylor) e métodos baseados na geração de amostras sintéticas (simulação de Monte Carlo). Na primeira categoria, podem ser encontrados métodos que procuram estimar a confiabilidade com momentos de baixa ordem (normalmente médias e covariâncias) das respostas estruturais. Além desses, também podem ser encontrados métodos que procuram estimar as funções densidade de algumas variáveis relevantes. A Figura 3 mostra essa classificação dos métodos disponíveis para análises de confiabilidade.

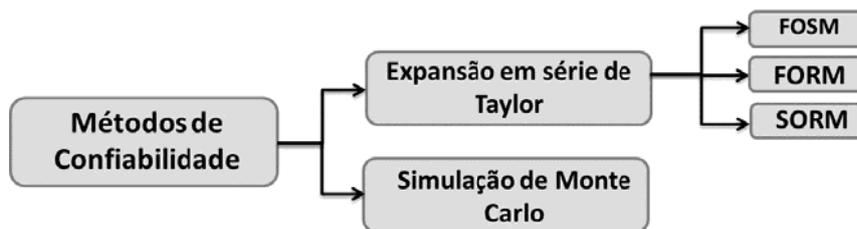


Figura 3. Classificação dos métodos de análise de confiabilidade

2.1 Método de confiabilidade de primeira ordem - FORM

Como o cálculo da probabilidade de falha p_f pela equação (4) é bastante complexo, tornou-se necessário facilitar os cálculos probabilísticos, com o desenvolvimento de métodos analíticos simplificados. Neste trabalho é abordado o método de confiabilidade de primeira ordem FORM - *First Order Reliability Method*.

Neste método, toda a informação estatística sobre as variáveis aleatórias é utilizada, incluindo distribuições estatísticas quaisquer, assim como coeficientes de correlação entre pares de variáveis e o domínio de integração da equação (4) é aproximado por uma função linear. As variáveis aleatórias (X) referentes ao espaço de projeto X , cujas distribuições estatísticas de probabilidade são quaisquer (diferentes ou não da distribuição normal), são transformadas em variáveis aleatórias (Y) normais padrão estatisticamente independentes. Esta transformação é conhecida como transformação de Nataf.

Em função das variáveis normais padrão Y como $g(Y)$ e a superfície de falha $g(Y) = 0$, a equação de estado-limite $G(X)$ é reproduzida e aproximada por um hiperplano no ponto de projeto Y^* . A distância entre Y^* e a origem representa o índice de confiabilidade do sistema.

Com isso, a probabilidade de falha pode ser calculada facilmente por:

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (5)$$

onde β é a distância do ponto Y^* até a origem e é definido na equação (6), como:

$$\beta = \|Y^*\| \quad (6)$$

Temos, na equação (7) que:

$$Y^* = -\alpha\beta \text{ e } g(Y) = \beta - \sum \alpha_i\beta_i \quad (7)$$

onde α é o vetor normal à superfície de falha no ponto de projeto.

A obtenção da confiabilidade pelo método FORM é mostrada na figura 6. Neste método, é indispensável o processo de transformação das variáveis aleatórias para o espaço normal padrão, bem como a busca do ponto de projeto, que são as principais dificuldades do método.

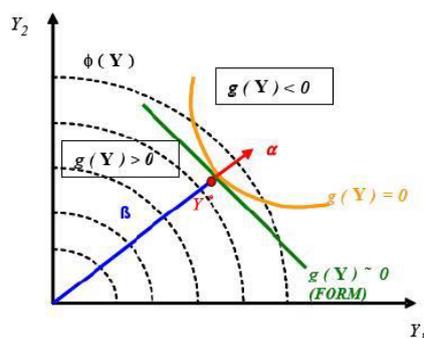




Figura 4. Representação gráfica do método FORM (Hasofer; Lind, 1974).

2.2 Dados estatísticos da resistência

Para utilização do método FORM, a média e o coeficiente de variação da variável resistência, R_m e V_m , e o tipo de distribuição de probabilidade são informações estatísticas fundamentais. A resistência de um elemento estrutural pode ser assim escrita:

$$R = R_n(PMF) \quad (8)$$

onde,

R_n é a resistência nominal do elemento estrutural, P é o erro de modelo ou coeficiente profissional, M é o fator material e F é o fator fabricação.

P , M e F são variáveis aleatórias adimensionais que refletem as hipóteses de cálculo (erro de modelo), incertezas do material e da geometria. Admitindo que não há correlação entre M , F e P e considerando a teoria probabilística de primeira ordem, o valor médio R_m pode ser observado na seguinte equação que define a resistência média (Ravindra e Galambos, 1978):

$$R_m = R_n(P_m M_m F_m) \quad (9)$$

onde,

P_m é a relação média entre a resistência determinada empiricamente e a resistência esperada para as propriedades do material e a seção transversal real das amostras ensaiadas;

M_m é a relação média entre a resistência mecânica real e o valor mínimo especificado;

F_m é a relação média entre a propriedade geométrica real da seção e o valor especificado (nominal).

O coeficiente de variação da variável R é igual a:

$$V_R = \sqrt{V_P^2 + V_M^2 + V_F^2} \quad (10)$$

onde,

V_P é o coeficiente de variação da relação entre os resultados experimental e calculado da resistência, V_M é o coeficiente de variação que reflete incertezas das propriedades materiais e V_F é o coeficiente de variação que reflete incertezas de geometria.

Os valores médios P_m , M_m e F_m , e os respectivos coeficientes de variação V_P , V_M e V_F são os parâmetros estatísticos que definem a variabilidade da resistência. Os dados estatísticos necessários para determinação de R_m e V_R são P_m , M_m , F_m , V_P , V_M e V_F , podendo ser observados pelas equações apresentadas acima. Os valores de P_m e V_P podem ser

encontrados com a comparação dos resultados práticos e as resistências teóricas calculadas a partir de uma prescrição normativa.

Em relação aos índices de confiabilidade β , sabe-se que seus valores variam de forma significativa de acordo com os tipos de carregamento, tipos de materiais de construção e tipos de elementos estruturais especificados em um projeto.

Grande parte das combinações de ações envolvendo ações gravitacionais são representadas pela soma da ação permanente com a ação variável. As combinações de ações gravitacionais são importantes e governam os projetos em muitas situações práticas. As ações devidas ao peso próprio apresentam pequena variabilidade ao longo da vida útil da estrutura. A tabela a seguir apresenta as estatísticas adotadas para as ações consideradas, ação permanente e ação variável, propostos por Galambos et al. (1982).

Tabela 1. Estatísticas das ações consideradas (Galambos et al., 1982)

Tipo de ação	D_m/D_n^*	L_m/L_n^*	V	Tipo de distribuição de probabilidade
Permanente (D)	1,05	–	0,10	Normal
Variável (L)	–	1,00	0,25	Valores Extremos Tipo I

3 BARRAS SUBMETIDAS À FLEXÃO

A NBR 14762:2010, baseada no método dos estados limites, estabelece os requisitos mínimos para dimensionamento de estruturas de perfis de aço formados a frio, constituídos por chapas ou tiras de aço-carbono ou aço de baixa liga, destinados a estruturas de edifícios. A norma em questão prevê três métodos para dimensionamentos de barras fletidas: Método da Largura Efetiva (MLE), Método da Seção Efetiva (MSE) e Método da Resistência Direta (MRD). Os dois últimos são abordados no presente trabalho.

3.1 Método da Seção Efetiva

3.1.1 Início de escoamento da seção efetiva

O momento fletor resistente de cálculo que causa o escoamento na seção efetiva na fibra mais solicitada é dado pela equação:

$$M_{Rd} = W_{ef} \cdot f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10) \quad (11)$$

onde, W_{ef} é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema que atinge o escoamento, calculado com base nas equações a seguir:

$$W_{ef}=W, \text{ para } \lambda_p \leq 0,673 \quad (12)$$

$$W_{ef}=W \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \cdot \frac{1}{\lambda_p}, \text{ para } \lambda_p > 0,673 \quad (13)$$

$$\lambda_p = \left(\frac{W f_y}{M_l}\right)^{0,5} \quad (14)$$

onde, M_l é o momento fletor de flambagem local elástica:

$$M_l = k_l \left(\frac{\pi^2 E}{12(1-\theta^2)(b_w/t)^2} W_c\right) \quad (15)$$

W é módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;

W_c é módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida.

Os valores do coeficiente de flambagem, k_l , podem ser calculados pelas expressões da Tabela 5 da NBR 14762:2010.

3.1.2 Flambagem lateral com torção

Uma viga constituída por um PFF, tem comportamento diferente de uma viga formada por outro tipo de perfil, podendo apresentar o fenômeno da flambagem lateral com torção. O momento fletor resistente de cálculo, tomando-se um trecho compreendido entre seções contidas lateralmente, deve ser calculado por:

$$M_{Rd} = x_{FLT} \cdot W_{c,ef} \cdot f_y / \gamma \quad (\gamma = 1,10) \quad (16)$$

onde, $W_{c,ef}$ é o módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra extrema comprimida:

$$W_{c,ef}=W_c, \text{ para } \lambda_p \leq 0,673 \quad (17)$$

$$W_{c,ef}=W_c \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \frac{1}{\lambda_p}, \text{ para } \lambda_p > 0,673$$

(15)

$$\lambda_p = \left(\frac{x_{FLT} W f_y}{M_l}\right)^{0,5} \quad (18)$$

$$M_l = k_l \left(\frac{\pi^2 E}{12(1-\theta^2)(b_w/t)^2} W_c\right) \quad (19)$$

Os valores do coeficiente de flambagem local k_l , podem ser calculados pelas expressões da Tabela 6 da NBR 14762:2010.

χ_{FLT} é o fator de redução do momento fletor resistente, associado à flambagem lateral com torção:

$$\chi_{FLT} = 1,0, \text{ para } \lambda_0 \leq 0,6; \quad (20)$$

$$\chi_{FLT} = 1,1(1-0,278 \lambda_0^2), \text{ para } 0,6 < \lambda_0 \leq 1,336; \quad (21)$$

$$\chi_{FLT} = 1/ \lambda_0^2, \text{ para } \lambda_0 \geq 1,336; \quad (22)$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{W_c f_y}{M_e} \right)^{0,5} \quad (23)$$

W_c é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida;

M_e é o momento fletor de flambagem lateral com torção, calculado a partir da expressão a seguir:

$$M_e = C_b r_0 (N_{ey} N_{ez})^{0,5} \text{ (Barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica, sujeitas à flexão em torno do eixo de maior simetria, x)} \quad (24)$$

C_b é o fator de modificação para momento fletor não uniforme, que pode ser calculado pela Equação (23) ou pode ser tomado igual a 1,0, a favor da segurança. Ele é utilizado para validar as expressões no caso de vigas com ações transversais (cargas distribuídas ou concentradas) e leva em conta a distribuição não uniforme dos momentos fletores.

$$C_b = \frac{12,5M_{m\acute{a}x}}{2,5M_{m\acute{a}x} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (25)$$

$M_{m\acute{a}x}$ é o máximo valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no trecho em questão;

M_A , M_B e M_C são os valores do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no primeiro quarto, centro e terceiro quarto do trecho analisado, respectivamente.

3.2 Método da Resistência Direta

A obtenção da resistência característica elástica ou inelástica de vigas, M_{Re} , pela NBR 14762:2010, considerando somente a flambagem lateral com torção (FLT) no MRD, segue o mesmo procedimento utilizado pelo AISI 100:2016, exceto que a resistência deixa de ser expressa em termos de tensão crítica, passando no MRD a ser expressa em termos de momento fletor. A conversão de tensão para momento é feita simplesmente pela multiplicação da tensão pelo módulo resistente da seção transversal completa em relação à fibra mais comprimida, resultando nas fórmulas de M_{Re} necessários ao MRD. O MRD utiliza curvas específicas para o cálculo da resistência considerando a interação entre os modos de flambagem local e lateral com torção, M_{Rl} , e distorcional, M_{Rd} , de vigas, devidamente calibradas e ajustadas para estes modos de flambagem. A resistência da viga também apresentada como uma função da esbelteza, que neste caso se refere à esbelteza nos modos local ou distorcional de flambagem, λ_l e λ_{dist} , respectivamente.

O momento fletor resistente característico, M_{Rk} , é a menor resistência verificada considerando apenas a flambagem lateral com torção, M_{Re} , ou aquela devido à interação entre flambagem local com a flambagem lateral com torção, M_{Rl} , ou, ainda, aquela verificada considerando somente o modo de flambagem distorcional, M_{Rdist} . Ou seja,

$M_{Rk} = \min(M_{Rk}; M_{Rl}; M_{Rdist})$. As Equações 26 a 35 resumem o MRD para barras submetidas à flexão simples.

Para a análise da estabilidade dos perfis, é necessário utilizar um recurso computacional, como os *softwares* CUFSM e GBTUL. O programa CUFSM (*Cornell University - Finite Strip Method*), utilizado neste trabalho, foi desenvolvido por Schafer e utiliza o método das faixas finitas para análise dos perfis formados a frio. O programa é disponibilizado no site da Universidade Cornell, e possui como atribuições o fornecimento de tensão de flambagem elástica para barras em perfis formados a frio, biapoçadas, sujeitas a qualquer distribuição de tensões em suas extremidades.

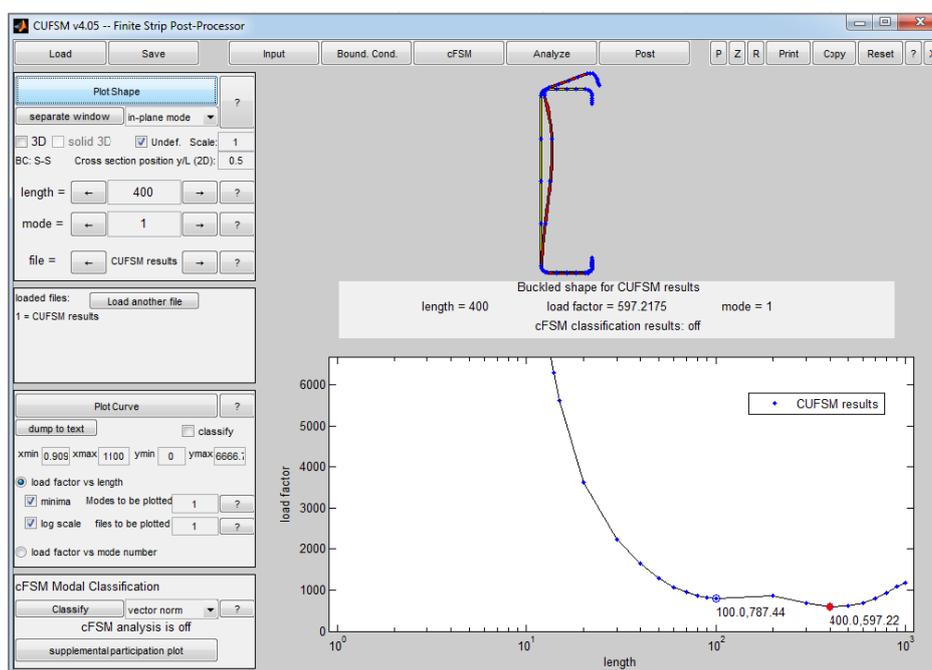


Figura 5. Entrada de dados CUFSM

A Figura 5 apresenta o pós-processamento da análise do perfil Ue 204x53x14x2.4. Observa-se que o primeiro ramo do gráfico corresponde à flambagem local de chapa e o segundo ramo corresponde ao modo distorcional. O fator de carga (*load factor*) correspondente aos valores mínimos, quando multiplicados pela tensão de escoamento do material, fornece as tensões de flambagem elástica dos modos local e distorcional.

- Flambagem lateral com torção:

$$M_{Re} = W f_y, \text{ para } \lambda_0 \leq 0,6 \tag{26}$$

$$M_{Re} = 1,11 \left(1 - \frac{0,278}{\lambda_0^2} \right) W \cdot f_y, \text{ para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336 \tag{27}$$

$$M_{Re} = \frac{W f_y}{\lambda_0^2}, \text{ para } \lambda_0 \geq 1,336 \tag{28}$$

$$\text{Onde, } \lambda_0 = \left(\frac{W f_y}{M_e} \right)^{0,5} \quad (29)$$

- Flambagem local:

$$M_{Rl} = M_{Re}, \text{ para } \lambda_l \leq 0,776 \quad (30)$$

$$M_{Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}} \right) \frac{M_{Re}}{\lambda_l^{0,8}}, \text{ para } \lambda_l \geq 0,776 \quad (31)$$

$$\text{Onde, } \lambda_l = \left(\frac{M_{Re}}{M_l} \right)^{0,5} \quad (32)$$

- Flambagem distorcional:

$$M_{Rdist} = W f_y, \text{ para } \lambda_{dist} \leq 0,673 \quad (33)$$

$$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}} \right) \frac{W f_y}{M_{dist}}, \text{ para } \lambda_{dist} > 0,673 \quad (34)$$

$$\text{Onde, } \lambda_{dist} = \left(\frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5} \quad (35)$$

O Método da Resistência Direta (MRD) tem se mostrado bastante eficaz nos cálculos de barras à flexão e à compressão. Este procedimento está previsto como anexo da NBR 14762:2010, sendo uma alternativa ao tradicional método da largura efetiva, que considera as propriedades geométricas efetivas da seção transversal. A norma brasileira estabelece valores mínimos para a relação D/b_w para as barras de seção U_e e Z_e , sob flexão simples em torno do eixo de maior inércia, permitindo que essa verificação seja dispensada em alguns casos.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir de dados experimentais de Schafer (2006, 2003), Javaroni *et al.* (2006) e Javaroni (1999), foi montado um banco de dados para obtenção das forças resistentes através da NBR 14762:2010, para os perfis ensaiados U enrijecidos e simples, inicialmente 74 amostras. A Tabela 1 mostra as seções dos perfis em questão.



Schafer (2003)							Schafer (2006)						
Perfil	M _{test} (kN.m)	M _{cri} (kN.m)	M _{crd} (kN.m)	M _{test} / M _{DSI}	M _{test} / M _{DSd}	M _{MSE} (kN.m)	Perfil	M _{test} (kN.m)	M _{cri} (kN.m)	M _{crd} (kN.m)	M _{test} / M _{DSI}	M _{test} / M _{DSd}	M _{MSE} (kN.m)
Ue 204x53x14x2,4	19,5	34,9	25,6	1,10	1,28	17,71	Ue 207x55x16x2,5	23,1	44,6	32,5	0,83	0,99	-
Ue 204x54x15x2,5	19,5	37,8	27,3	1,04	1,21	19,08	Ue 207x53x16x2,6	23,1	44,3	32,8	0,83	0,99	-
Ue 203x52x13x2,0	11,7	19,9	16,5	0,93	1,10	12,72	Ue 205x51x17x2,5	18,7	42,6	33,5	0,71	0,84	-
Ue 204x52x13x1,9	11,7	18,3	15,4	1,03	1,22	12,24	Ue 205x52x17x2,5	18,7	43,4	33,5	0,7	0,83	-
Ue 204x52x13x1,9	11,1	18,8	15,7	0,93	1,10	12,45	Ue 205x50x16x2,1	13,8	24,3	21,6	0,99	1,1	-
Ue 204x52x14x1,9	11,1	18,6	15,5	0,94	1,11	12,45	Ue 205x50x16x2,2	13,8	26,2	22,9	0,98	1,07	-
Ue 205x51x15x2,4	6,3	6,7	6,9	1,07	1,20	7,06	Ue 202x49x17x1,8	11,8	15,6	15,7	0,82	0,89	-
Ue 203x52x13x1,4	6,3	7,4	7,4	1,04	1,17	7,24	Ue 202x50x16x1,8	11,8	15,8	15,1	0,8	0,89	-
Ue 205x51x14x1,2	5,8	5,0	5,4	1,07	1,21	5,90	Ue 204x52x14x1,3	5,5	6,5	7	0,95	1,01	-
Ue 204x51x14x1,3	5,8	5,3	5,8	1,05	1,17	6,08	Ue 203x52x15x1,3	5,5	6,3	7,5	0,97	0,99	-
Ue 204x51x14x1,2	5,4	4,7	5,1	1,03	1,17	5,57	Ue 208x49x17x0,9	1,9	1,9	3,8	0,96	0,84	-
Ue 204x51x14x1,2	5,4	4,7	5,1	1,04	1,17	5,55	Ue 207x49x17x0,9	1,9	1,9	3,9	0,98	0,84	-
Ue 153x51x14x1,6	5,1	11,4	9,9	1,06	1,16	7,04	Ue 204x51x13x1,2	4,8	4,2	5,3	0,99	1,01	-
Ue 153x51x14x1,6	5,1	11,6	9,2	1,04	1,14	7,11	Ue 204x51x13x1,2	4,8	4,6	5,6	0,95	0,97	-
Ue 100x49x13x1,4	3,1	8,3	5,1	1,03	1,15	3,83	Ue 207x51x17x0,9	1,8	1,7	3,7	1,05	0,89	-
Ue 100x51x14x1,4	3,1	7,5	4,9	1,02	1,15	3,83	Ue 205x51x16x0,9	1,8	1,7	3,3	1,04	0,92	-
Ue 93x50x13x1,4	2,3	7,3	4,6	1,17	1,24	3,47	Ue 306x52x13x1,6	10,7	9,5	10,1	1,12	1,21	-
Ue 93x50x12x1,4	2,3	7,2	4,3	1,16	1,24	3,44	Ue 306x51x14x1,7	10,7	9,8	10,7	1,08	1,15	-
Ue 305x49x13x1,7	11,8	9,9	13,1	1,18	1,32	12,33	Ue 303x52x13x1,7	11,1	10,4	11	0,79	0,86	-
Ue 305x45x14x1,7	11,8	10,1	13,8	1,19	1,33	12,00	Ue 304x54x13x1,7	11,1	10,9	11,4	0,77	0,85	-
Ue 305x51x13x1,7	15,5	10,6	13,7	1,07	1,28	13,17	Ue 256x51x12x1,6	5,8	9,3	9,6	0,98	1,05	-
Ue 304x50x15x1,7	15,5	10,9	14,8	1,07	1,25	13,23	Ue 257x53x14x1,6	5,8	10	10,8	0,91	0,97	-
Ue 256x49x13x1,5	7,9	7,3	13,7	1,18	1,28	8,69	Ue 254x50x17x1,5	9,6	7,4	10,2	0,8	0,81	-
Ue 255x52x14x1,5	7,9	7,3	14,8	1,14	1,23	8,75	Ue 254x49x18x1,5	9,6	7,5	10,9	0,8	0,79	-
							Ue 253x52x16x1,2	7	4,5	6,7	1,03	1	-
							Ue 253x51x16x1,2	7	4,7	7	1,01	0,98	-
							Ue 152x51x16x1,5	5,9	9,8	8,8	0,89	1	-
							Ue 152x51x16x1,4	5,9	8,9	8	0,92	1,03	-
							Ue 95x48x10x1,4	1,9	7,9	4	1,04	1,05	-
							Ue 95x48x9,0x1,4	1,9	7,8	3,4	1,04	1,09	-

Figura 6. Amostra das seções utilizadas

A resistência dos perfis foi obtida com o recurso de uma planilha de Excel, elaborada com a formulação do MSE, e também, com a utilização do programa CUFISM v4.05 em conjunto com o recurso da planilha em Excel, para cálculo através do MRD, quando aplicável.

Utilizando as resistências encontradas, foi avaliado o erro do modelo, representado pela relação entre o dado experimental e teórico, fornecendo um resultado estatístico. Com o erro do modelo e o auxílio do programa Minitab 18, foi encontrada a curva que melhor representa a distribuição de probabilidade por método. Além disso, foram gerados os histogramas e os gráficos das distribuições de probabilidade.

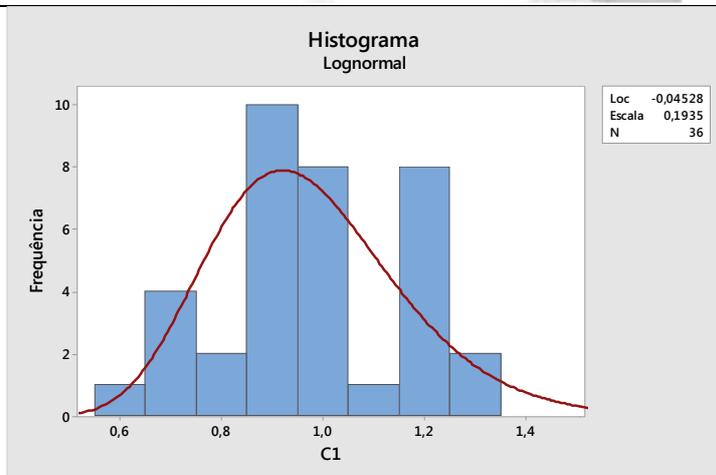


Figura 7. Histograma gerado no Minitab

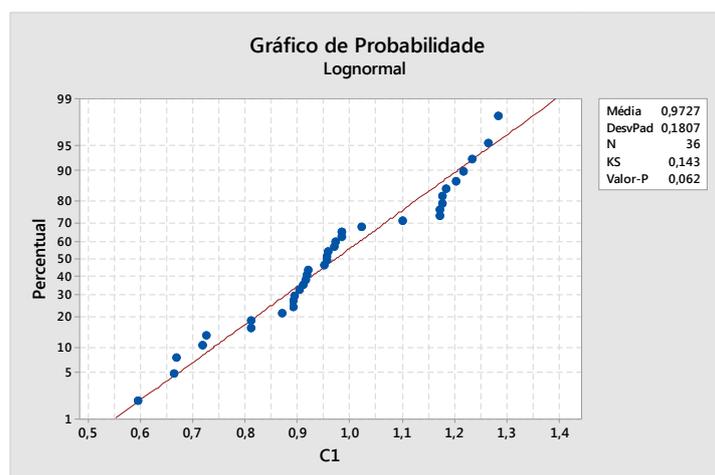


Figura 8. Gráfico de probabilidade gerado no Minitab

Em seguida, foi empregado o método de confiabilidade FORM para obtenção do índice de confiabilidade β , em função do coeficiente de ponderação da resistência $\gamma=1,10$, definido pela norma brasileira. Para tal, foram utilizadas as combinações de ações das normas AISI S100:2016 e NBR 14762:2010: $1,2D_n+1,6L_n$ e $1,25D_n+1,5L_n$, implementadas no Excel. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4:

Tabela 2. Índice de confiabilidade para o MSE – Modo Local

Nº de dados:	36	Índice de confiabilidade	1,2Dn + 1,6Ln		1,25Dn + 1,5Ln		
			Dn/Ln = 1/5	Dn/Ln = 1/3	Dn/Ln = 1/5	Dn/Ln = 1/3	
Média:	0,973	β_{FORM}	1,95	1,94	1,79	1,80	
Desvio padrão:	0,181		β_{FOSM}	1,94	1,94	1,77	1,79
Coef. Variação:	0,186			β_{SMC}	1,91	1,91	1,77
Distribuição:	Lognormal						

Tabela 3. Índice de confiabilidade para o MRD – Modo Local

Nº de dados:	36	Índice de confiabilidade	1,2Dn + 1,6Ln		1,25Dn + 1,5Ln	
			Dn/Ln = 1/5	Dn/Ln = 1/3	Dn/Ln = 1/5	Dn/Ln = 1/3
Média:	1,070	β_{FORM}	2,501	2,533	2,339	2,389
Desvio padrão:	0,127		β_{FOSM}	2,567	2,624	2,377
Coef. Variação:	0,119	β_{SMC}	2,502	2,534	2,308	2,382
Distribuição:	Normal					

Tabela 4. Índice de confiabilidade para o MRD – Modo Distorcional

Nº de dados:	31	Índice de confiabilidade	1,2Dn + 1,6Ln		1,25Dn + 1,5Ln	
			Dn/Ln = 1/5	Dn/Ln = 1/3	Dn/Ln = 1/5	Dn/Ln = 1/3
Média:	1,054	β_{FORM}	2,48	2,51	2,31	2,36
Desvio padrão:	0,119		β_{FOSM}	2,54	2,59	2,34
Coef. Variação:	0,113	β_{SMC}	2,47	2,51	2,32	2,36
Distribuição:	Normal					

5 CONCLUSÕES

Para os dados referentes ao MRD, foram descartados cinco amostras de perfis que foram considerados pelo autor dos ensaios como flambagem distorcional, pois observou-se que os valores correspondiam à flambagem lateral por torção.

Comparando-se os resultados com o índice de confiabilidade alvo $\beta_0 = 2,5$ da calibração da norma americana, a análise do conjunto de perfis onde ocorre flambagem distorcional (figura) sugere ser necessário a utilização de um coeficiente de ponderação γ maior, uma vez que os valores encontrados foram bem abaixo do valor alvo para o índice de confiabilidade. Já para o outro conjunto de perfis, que sofre flambagem local, os valores aproximaram-se do valor alvo, demonstrando sua adequação.

Foi apresentado neste trabalho um procedimento para análise de confiabilidade de perfis U enrijecidos submetidos a flexão. Os métodos de dimensionamento de barra, MSE e MRD, foram utilizados para obtenção da capacidade de resistência ao momento fletor, de seções definidas a partir do conjunto de dados experimentais obtidos de bibliografia especializada. Os Métodos analíticos FORM e FOSM foram empregados para a avaliação dos índices de confiabilidade (β). Além disso, para verificar a precisão dos métodos analíticos, também foi aplicada a Simulação de Monte Carlo.

Com a aplicação do MRD, os índices de confiabilidade calculados, ficaram próximos do índice de confiabilidade alvo ($\beta_0 = 2,5$). A melhor adequação dos índices de confiabilidade ao valor alvo, com os dados de calibração da norma AISI-LRFD, sugere que o coeficiente de ponderação $\phi = 0,90$ (inverso de ϕ) está adequado. No entanto, com a combinação de ações da NBR 14762 (2010), ou seja 1,25D+1,5L, β está um pouco abaixo de β_0 , sugerindo que o nível de segurança da norma brasileira não é o mesmo da norma americana.

O Método FOSM (First Order Second Moment) também apresentou resultados que ratificam o coeficiente de ponderação atualmente empregado na norma e americana, já que esta metodologia é a mesma da calibração da primeira versão da norma AISI para o LRFD (Load and Resistance Factor Design).



Os índices de confiabilidade obtidos por quaisquer método de confiabilidade, quando empregado o MSE, ficaram bem abaixo de 2,5. Entretanto, verificou-se que a referência Schafer (2003) apresenta seções cujos parâmetros (bf/bw e D/bw) não atendem as restrições geométricas da norma brasileira NBR 14763 (2010). Sugere-se a realização estudos de confiabilidade para analisar o nível de segurança do MSE, à partir da inclusão de mais dados experimentais de flexão em perfis formados a frio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFOP, à CAPES e ao CNPq pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

American National Standards Institute, 2016. American Iron and Steel Institute S100: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structures Members. Washington, DC.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010. *NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento*. Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Brandão, A. L. R., 2012. *Calibração de coeficiente de ponderação da resistência em barras e ligações de perfis formados a frio*. 227 f. Tese (Doutorado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/MG, Brasil

Galambos, T.V., Ellingwood, B., MacGregor, J.G., Cornell, C.A., 1982. *Probability based load criteria: assessment of current design practice*. USA, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, n. ST5, pp. 959-977.

HSIAO, L.E., 1989. *Reliability based criteria for cold-formed steel members*. Missouri-Rolla: University of Missouri-Rolla, Missouri, 1989. (Ph.D. Thesis).

Javaroni, C. E., 1999. *Perfis de aço formados a frio: Análise teórico-experimental*. 279 f. Tese (Doutorado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, Brasil.

Javaroni, C. E., Gonçalves, R. M., 2006. Distortional buckling of simple lipped channel in bending. *Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures* – Missouri University of Science and Technology, Orlando, Flórida, USA, p.133-146.

Ravindra, M. K.; Galambos, T.V., 1978a. *Load and resistance factor design for steel*. 9. ed. *Journal Of The Structural Division*. ASCE, v.104, p. 1337-1353.

Schafer, B. W., Yu, C., 2003. Local buckling tests on cold-formed steel beams. *Journal of Structural Engineering* – ASCE, p.1596-1606.

Schafer, B. W., Yu, C., 2006. Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. *Journal of Structural Engineering* – ASCE, p.515-528.