

Reliability analysis of perforated cold-formed steel members in compression

Roberta L. F. Jardim¹, Marcílio S. R. Freitas¹, André L. R. Brandão²

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções, Universidade Federal de Ouro Preto
Campus Universitário Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

roberta.farago@hotmail.com, marcilio@ufop.edu.br

²Instituto de Engenharias Integradas, Universidade Federal de Itajubá - Campus de Itabira
Rua Irmã Ivone Drumond, 200, Distrito Industrial, 35903-087, Itabira, Minas Gerais, Brasil.

andrerieira@unifei.edu.br

Abstract. Cold-formed steel (CFS) members have been widely used in residential, industrial and commercial buildings as primary load bearing structural elements due to their advantages such as higher strength to weight ratio over other structural materials such as hot-rolled steel and concrete. CFS members are made of thin steel sheets and hence they are more susceptible to various buckling modes. CFS with perforations are commonly used in construction industry for example in residential construction and also low-rise buildings. This paper shows a study of the level of reliability of perforated CFS members, based on AISI code, in order to adapt Brazilian code. The aim of this study is the assessment of the reliability index β for a variation of the nominal live-to-dead load ratios as well as comparison of the value found considering different load combinations. A test database of cold-formed steel columns concentrically loaded was assembled and test-to-predicted statistics were obtained for the Direct Strength Method (DSM). The first order reliability method (FORM) is used to calculate the reliability index β . Based on the results of the reliability index, it was found that the required safety level was not reached when the target reliability index of 3.0 was established.

Keywords: thin-walled; cold-formed steel; direct strength method; perforated columns; holes.

1 Introdução

A ABNT NBR 14762 [1] define os perfis formados a frio (PFF) como sendo elementos formados por chapas planas de aço dobradas a temperatura ambiente. Os PFF são largamente empregados na construção civil, tanto em edificações residenciais quanto em instalações comerciais e industriais. Oferecem versatilidade na construção por causa de sua leveza e facilidade de manuseio e uso (Chodraui [2]). Os PFF podem possuir furos ou não. Essa escolha é baseada nas funcionalidades que se deseja obter a partir destes perfis. É comum a presença de furos nos elementos de vigas e colunas, cujas finalidades são acomodar e dar passagem a tubulações nas paredes e tetos das edificações, além de serem úteis nas conexões com elementos construtivos e estruturais (Moen e Schafer [3]).

Este trabalho tem como objetivo avaliar a confiabilidade de barras em perfis formados a frio submetidas à força axial de compressão, com perfuração na alma, seguindo critérios propostos por Moen e Schafer [3]. A norma brasileira NBR 14762 [1] não contempla formulação para o dimensionamento de perfis com a presença de furos. O método FORM (*First Order Reliability Method*), um método de confiabilidade de primeira ordem, foi empregado para obtenção dos índices de confiabilidade β . A norma AISI S100 [4] adota como índice de confiabilidade alvo, β_o , o valor 2,5 para o projeto em estados limites segundo o LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) e o valor 3,0 para o projeto em estados limites segundo o LSD (*Limit State Design*).

As variáveis de projeto são tratadas como aleatórias, com a modelagem de suas incertezas por meio de distribuições de probabilidade adequadas. A partir de um banco de dados com 183 ensaios de colunas com seções U enrijecido, perfuradas na alma, foram obtidas as estatísticas para a variável aleatória coeficiente profissional (erro do modelo), definida pela razão entre a carga última experimental e a carga última teórica. Para obtenção da

capacidade resistente teórica de cada amostra, aplicou-se o Método da Resistência Direta (MRD). A análise de estabilidade elástica foi realizada com auxílio dos *softwares* CUFSM (Schafer e Ádány [5]) e CUTWP (Sarawit [6]).

2 Adaptações do MRD para perfis com furos

O Método da Resistência Direta (MRD), cuja denominação é oriunda do inglês *Direct Strength Method* (DSM), contém formulações para obtenção da força axial de compressão em perfis formados a frio. O MRD está apresentado no corpo principal da norma AISI S100 [4] e como anexo da NBR 14762 [1]. De acordo com esse método, o valor característico da força axial de compressão, ou simplesmente força nominal (P_n), deve ser tomado como o menor valor nominal obtido para a flambagem global (P_{ne}), local (P_{nl}) e distorcional (P_{nd}). Entretanto, a aplicação do método depende da análise de estabilidade elástica, com furos, com o intuito de se obter as forças axiais de flambagem elástica local (P_{crl}), distorcional, (P_{crd}) e global (P_{cre}).

Moen e Schafer [3] desenvolveram seis formulações para cálculo das instabilidades global, local e distorcional, aplicáveis a colunas com perfurações:

DSM 1 – As equações originais do MRD para obtenção de P_{ne} , P_{nl} e P_{nd} (AISI S100 [4]; NBR 14762 [1]) são aplicadas normalmente, mas a influência do furo é considerada na análise de flambagem;

DSM 2 – A força de escoamento P_y das equações originais do MRD é substituída pela força de escoamento P_{ynet} , obtida com a seção transversal na região do furo (seção líquida);

DSM 3 – As forças nominais P_{nl} e P_{nd} são limitados a P_{ynet} ;

DSM 4 – Nesta formulação, P_{ne} e P_{nl} seguem a formulação original, mas P_{nl} é limitado a P_{ynet} . Além disso, na equação original para a obtenção da força nominal distorcional (P_{nd}) uma modificação passa a considerar uma transição entre a flambagem elástica e o escoamento da seção líquida;

DSM 5 – Considera-se a mesma transição definida para DSM 4 na flambagem distorcional. Além disso, foi introduzida uma transição na formulação da flambagem local, de P_{nl} para P_{ynet} ;

DSM 6 – Considera-se mesma transição definida para DSM 4 na flambagem distorcional. Uma transição na formulação da flambagem local também é considerada, mas com formulação modificada em relação à DSM 5.

Em todas as formulações apresentadas, a influência dos furos deve ser considerada na determinação de P_{cre} , P_{crl} e P_{crd} . De forma geral, as equações da flambagem global são as mesmas, exceto para DSM 2, onde foi explicada a substituição de P_y por P_{ynet} . Este trabalho aborda quatro formulações intermediárias (DSM 2 a DSM 5), seguindo a ordem das opções apresentadas no trabalho de Moen e Schafer [3].

3 Método FORM

O método de confiabilidade de primeira ordem (FORM - *First Order Reliability Method*) tem sido amplamente utilizado em aplicações de estimativa de confiabilidade estrutural. O método envolve a expansão de Taylor da função de falha, ou seja, a linearização da equação do estado limite, em torno do ponto de projeto, que corresponde ao ponto de falha mais provável. A seleção de um ponto de linearização apropriado é uma consideração importante uma vez que o método é iterativo (Ang e Tang [7]).

Os principais desafios no método FORM são a busca ao ponto de projeto, aquele correspondente a menor distância entre a superfície de falha e a origem no espaço das variáveis reduzidas, chamada de índice de confiabilidade β , e a transformação das variáveis não normais em variáveis normais padrão. Neste trabalho foi utilizado o algoritmo HLRF (Hasofer e Lind [8], Der Kiureghian e Liu [9]).

De acordo com o método obtém-se o índice de confiabilidade β , através do qual pode-se estimar a probabilidade de falha, conforme eq. (1), em que Φ é a função de distribuição cumulativa normal padrão:

$$P_f = \Phi(-\beta) . \quad (1)$$

Um estado limite é representado como uma condição para a qual uma estrutura falhe em atender aos objetivos pelos quais foi projetada (NBR 14762 [1]). O formato usual das normas brasileiras baseadas no método dos estados limites pode ser representado pela seguinte expressão:

$$\frac{1}{\gamma} R_n \geq \gamma_D D_n + \gamma_L L_n \quad (2)$$

onde R_n é a resistência nominal (ou característica), calculada por formulação de projeto; γ é o coeficiente de ponderação da resistência. No formato do AISI S100 [4], tem-se um coeficiente (ϕ), menor que a unidade, multiplicando a resistência nominal (ϕR_n); γ_D e γ_L são os coeficientes de ponderação das ações permanente e variável; D_n e L_n são os valores nominais (ou característicos) das ações permanente (*Dead Load*) e variável (*Live Load*).

O lado direito da inequação (2), $\gamma_D D_n + \gamma_L L_n$, representa uma combinação de ações últimas normais, conforme classificação da (NBR 14762 [1]). Segundo Ellingwood *et al.* [10], a análise de confiabilidade estrutural com as combinações de ações $\gamma_D D_n + \gamma_L L_n$ são recomendadas por questões de praticidade e eficiência.

A partir das condições usuais de segurança referentes aos estados limites, propõe-se uma função de falha em termos de variáveis de resistência (R) e solicitação (S). A resistência de um elemento estrutural é tipicamente uma função da resistência do material, da geometria da seção e suas dimensões. A solicitação pode ser expressa em termos das ações permanente e variáveis, decorrentes do uso e ocupação. Matematicamente, esta função pode ser representada pela eq. (3) (Hsiao [11]):

$$G(.) = R_n MFP - c(D + L) . \quad (3)$$

A variáveis M , F e P são aleatórias adimensionais. A variável aleatória M , denominada "fator material", pode ser determinada pela razão de uma propriedade mecânica ensaiada e um valor nominal. O "fator de fabricação" F está relacionado com a variabilidade das propriedades geométricas. O "fator profissional" P (ou erro do modelo) é uma variável que reflete as incertezas decorrentes dos métodos de análise utilizados e será abordada na seção subsequente. Com referência às ações gravitacionais, D e L são as variáveis das ações permanente e variável. Os parâmetros estatísticos e distribuições de probabilidade das variáveis apresentados na Tab. 1 foram obtidos de Ellingwood *et al.* [10].

Tabela 1. Parâmetros estatísticos e distribuições de probabilidade das variáveis

Variável	Valor médio/valor nominal	Coef. de Variação	Distribuição de probabilidade
M	1,10	0,10	Lognormal
F	1,00	0,05	Lognormal
D	1,05	0,10	Normal
L	1,00	0,25	Extremos Tipo I

Ressalta-se que a reconstrução das variáveis D e L , no contexto da função de falha (eq. (3)), depende não apenas das informações estatísticas da Tab. 1, como também dos valores nominais D_n e L_n , que por sua vez devem garantir a igualdade na inequação (eq. (2)) representativa do método dos estados limites. Neste caso, estabeleceu-se um valor genérico da resistência nominal (R_n), uma relação L_n/D_n , e uma combinação de ações últimas normais. Em seguida, propõe-se um coeficiente de ponderação da resistência e obtém-se o nível de segurança para a situação estabelecida.

A norma AISI S100 [4] abrange duas filosofias de projeto em estados limites, o LRFD (*Load and Resistance Factor Design*), utilizado nos Estados Unidos e México, e o LSD (*Limit State Design*), utilizado no Canadá. O conceito de projeto usado pelas filosofias de projeto LRFD e o LSD é basicamente o mesmo. O FOSM foi o método de confiabilidade utilizado para a calibração da norma AISI S100 [4], mas os dados de calibração como os coeficientes de ponderação da resistência, as combinações de ações, a relação L_n/D_n , e os índices de confiabilidade alvo (β_o), foram específicos para cada filosofia de projeto (Tab. 2).

Neste trabalho, a análise de confiabilidade foi realizada, inicialmente, com os dados de calibração do AISI S100 [4]. Uma análise posterior foi realizada com o emprego do coeficiente de ponderação da resistência γ de 1,2 e a combinação II, que são adotados na NBR 14762 [1]. Embora perfis com perfuração não sejam abordados pela NBR 14762 [1], foi utilizado o coeficiente de ponderação da resistência desta norma. Além disso, como não há uma definição para a NBR 14762 [1], as relações L_n/D_n iguais a 3 e 5 são empregadas nesta segunda análise.

Tabela 2. Dados de calibração da norma AISI

Filosofia	$\gamma_D D_n + \gamma_L L_n$	L_n/D_n	ϕ (AISI)	β_o
LRFD	(I) $1,2D_n + 1,6L_n$	5	0,85	2,5
LSD	(II) $1,25D_n + 1,5L_n$	3	0,80	3,0

4 Fator Profissional

O Fator Profissional P (ou erro do modelo) é uma variável aleatória que reflete as incertezas na determinação da capacidade resistente de um componente estrutural, e por isso deve ser considerada na análise de confiabilidade estrutural. Esta variável quantifica a precisão das previsões de capacidade resistente de uma barra em relação à carga de colapso obtida em ensaios experimentais. O procedimento de análise estatística do Fator Profissional consta de duas etapas: (i) montagem de um banco de dados de ensaios e (ii) aplicação de uma equação de projeto para obtenção da força axial de compressão.

Neste trabalho foram utilizados resultados de diversos estudos [3, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19] totalizando 183 testes de compressão centrada em colunas de seção U enrijecida (U_e), com ampla variedade de comprimentos e furos localizados na alma. Os perfis estudados possuem vários formatos de perfuração, sendo os mais comuns circulares e retangulares. Para cada perfil estrutural constante do banco de dados foram empregadas as formulações de projeto descritas anteriormente, denominadas DSM 2, DSM 3, DSM 4 e DSM 5, com o objetivo de se obter a capacidade resistente de cada amostra.

Como resultados da análise estatística da variável P , obtém-se a média desta variável (P_m) e o desvio padrão (σ_P). A média da variável aleatória indica o caráter tendencioso do modelo teórico. Sendo assim, P_m , que deve ser unitária se o modelo representa exatamente o fenômeno físico estudado, revela quão conservador é ou não o modelo teórico em questão. A razão do desvio padrão pela média define o coeficiente de variação (V_P) da variável fator profissional. A Tabela 3 mostra os resultados da análise estatística da variável Fator Profissional (P) e o número de ensaios N por agrupamento de dados. Os dados foram agrupados com base na formulação de projeto e no modo de falha obtido. Uma nomenclatura compatível com a denominação de cada grupo é mostrada na tabela. Os testes de ajuste de Anderson Darling realizados com o auxílio do *software* Minitab 18 [20] possibilitaram a obtenção da função de distribuição de probabilidade que melhor se ajustou aos dados da variável P , em cada grupo analisado.

Tabela 3. Estatísticas do coeficiente profissional dos grupos de dados

Grupos de dados	Nomenclatura	N	P_m	σ_P	V_P	f_{dp} ajustada
DSM 2; Modo Global	G2	14	1,074	0,120	0,112	Normal
DSM 2; Modo Local	L2	153	1,153	0,156	0,136	Normal
DSM 2; Modo Distorcional	D2	16	1,214	0,266	0,219	Extremo tipo 1
DSM 2; Todos os dados	T2	183	1,153	0,168	0,145	Lognormal
DSM 3; Modo Global	G3	6	1,046	0,091	0,087	Normal
DSM 3; Modo Local	L3	163	1,035	0,112	0,109	Normal
DSM 3; Modo Distorcional	D3	14	1,144	0,240	0,210	Extremo tipo 1
DSM 3; Todos os dados	T3	183	1,044	0,128	0,123	Lognormal
DSM 4; Modo Global	G4	5	1,071	0,075	0,070	Normal
DSM 4; Modo Local	L4	138	1,043	0,114	0,110	Normal
DSM 4; Modo Distorcional	D4	40	1,078	0,171	0,158	Extremo tipo 1
DSM 4; Todos os dados	T4	183	1,051	0,128	0,122	Lognormal
DSM 5; Modo Global	G5	5	1,071	0,075	0,070	Normal
DSM 5; Modo Local	L5	146	1,055	0,117	0,111	Normal
DSM 5; Modo Distorcional	D5	32	1,073	0,189	0,176	Extremo tipo 1
DSM 5; Todos os dados	T5	183	1,059	0,131	0,124	Lognormal

5 Resultados da análise de confiabilidade

Os índices de confiabilidade (β) foram calculados pelo método FORM para duas diferentes combinações de ações normais últimas: (I) $1,2D_n + 1,6L_n$ (AISI S100 [4]) e (II) $1,25D_n + 1,5L_n$ (AISI S100 [4]; NBR 14762 [1]) e

relações L_n/D_n de 3 e 5 (AISI S100 [4]). As análises de confiabilidade foram realizadas com base em quatro cenários, com as considerações seguintes:

- 1A) Combinação I, relação $L_n/D_n = 5$, $\phi_{LRFD} = 0,85$.
- 1B) Combinação II, relação $L_n/D_n = 3$, $\phi_{LSD} = 0,80$.
- 2A) Combinação II, relação $L_n/D_n = 5$, $\gamma = 1,2$.
- 2B) Combinação II, relação $L_n/D_n = 3$, $\gamma = 1,2$.

Os cenários 1A e 1B correspondem aos analisados para a calibração da norma AISI S100 [4], conforme apresentado na Tab. 2. A Tabela 4 apresenta os índices de confiabilidade β de cada um dos cenários definidos neste estudo. Além disso, as Fig. 1 e 2 apresentam gráficos comparativos dos índices de confiabilidade. Verifica-se claramente, quando se analisa todo o conjunto de dados em cada uma das quatro formulações, uma maior média da variável erro do modelo e valores muito próximos de coeficiente de variação. Isso faz com que a formulação DSM 2 apresente os resultados mais conservadores, representados por um maior valor do índice de confiabilidade. Os resultados dos índices de confiabilidade sofrem pequenas variações que são decorrentes da mudança de modo de falha de alguns perfis ao haver mudança nas expressões das diversas formulações.

As Figuras 1 e 2 mostram que as formulações DSM 4 e DSM 5 apresentam índices de confiabilidade muito próximos, em todos os modos de instabilidade. Moen e Schafer [21] apontam a formulação DSM 4 como a metodologia que apresenta a melhor performance, considerando a comparação com resultados experimentais, com resultados de simulação numérica com o *software* Abaqus e análise de confiabilidade estrutural.

Tabela 4. Índices de confiabilidade β , para os cenários 1A, 1B, 2A e 2B

Nomenclatura	1A	1B	2A	2B
	$1,2D_n + 1,6L_n$	$1,25D_n + 1,5L_n$	$1,25D_n + 1,5L_n$	
	$L_n/D_n=5$	$L_n/D_n=3$	$L_n/D_n=5$	$L_n/D_n=3$
G2	2,760	2,867	2,662	2,730
L2	2,866	2,964	2,774	2,835
D2	2,760	2,855	2,668	2,724
T2	2,854	2,961	2,759	2,827
G3	2,762	2,881	2,661	2,738
L3	2,653	2,758	2,554	2,619
D3	2,621	2,712	2,527	2,579
T3	2,632	2,736	2,533	2,596
G4	2,891	3,021	2,789	2,877
L4	2,672	2,777	2,574	2,639
D4	2,642	2,748	2,543	2,608
T4	2,657	2,763	2,559	2,624
G5	2,891	3,021	2,789	2,877
L5	2,706	2,812	2,608	2,674
D5	2,560	2,658	2,463	2,519
T5	2,674	2,780	2,575	2,641

Na Figura 1 é mostrado que os índices de confiabilidade para o cenário 1A são superiores a β_0 de 2,5. Observa-se que a formulação de dimensionamento DSM 2 é, de forma geral, mais conservadora. No caso do cenário 1B, os resultados obtidos não foram satisfatórios, uma vez que os índices de confiabilidade são predominantemente inferiores a β_0 de 3,0. Situação semelhante foi verificada em trabalhos de Ganesan [22], Freitas et al. [23] e Capanema [24], sendo os índices de confiabilidade obtidos para compressão centrada inferiores ao alvo de 3,0, mesmo nos casos de perfis sem perfuração.

Na Figura 2 observam-se os índices de confiabilidade para as duas relações L_n/D_n adotadas. Se o índice de confiabilidade alvo adotado numa futura calibração da NBR 14762 [1] fosse β_0 de 2,5, qualquer uma das formulações estaria atendendo a este nível de segurança. Por outro lado, se o índice de confiabilidade alvo fosse β_0 de 3,0 nenhuma delas atenderia a segurança desejada.

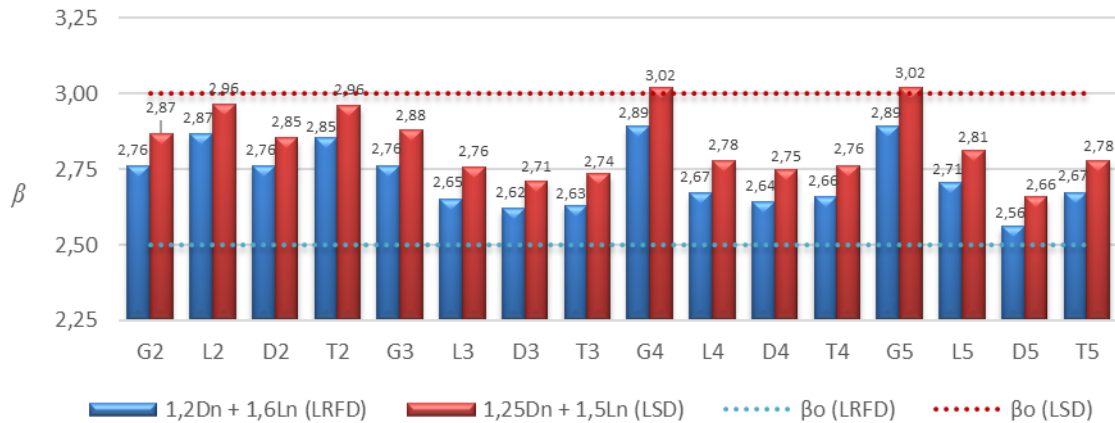


Figura 1. Comparação dos índices de confiabilidade β para os cenários 1A e 1B

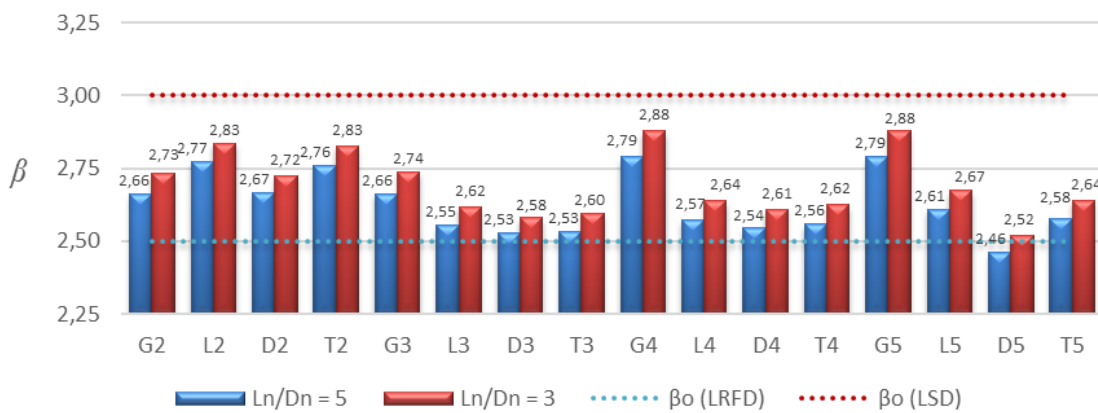


Figura 2. Comparação dos índices de confiabilidade β para os cenários 2A e 2B

Em diversos estudos de confiabilidade estrutural relacionados com perfis de aço formados à frio, verificou-se, com base na medida de sensibilidade fator de importância obtida com o método FORM, que a variável erro do modelo P não pode ser negligenciada (Toledo [25]).

6 Conclusões

Este trabalho teve por objetivo avaliar a confiabilidade de barras em perfis formados a frio, com perfuração na alma, submetidas à força axial de compressão, seguindo critérios propostos por Moen e Schafer [3]. Com base nos resultados dos índices de confiabilidade β , pode-se concluir que:

- Para o cenário 1A todas as formulações apresentaram índices de confiabilidade superiores ao índice de confiabilidade alvo β_0 de 2,5. A formulação DSM 2 foi a mais conservadora para esse cenário.
- Os resultados das análises de confiabilidade foram muito similares quando as formulações DSM 4 e DSM 5 foram aplicadas. Sugere-se a inclusão da formulação DSM 4, já adotada na norma AISI S100 [4], em caso de atualização da norma brasileira NBR 14762 [1].
- A combinação de ações gravitacionais da norma brasileira é a mesma adotada no AISI-LSD. Verifica-se que para todas as formulações estudadas, tanto para a relação L_n/D_n igual a 3 ou 5, a NBR 14762 [1] com o atual coeficiente de ponderação da resistência atenderia uma confiabilidade alvo β_0 de 2,5. Por outro lado, em nenhuma situação seria atendida uma confiabilidade alvo β_0 de 3,0.

Agradecimentos. Os autores agradecem à UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto) e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por apoiarem o desenvolvimento deste trabalho.

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

Referências

- [1] Associação Brasileira Normas Técnicas. NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.
- [2] Chodraui, G. M. B. Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2006.
- [3] Moen, C. D. e Schafer, B. W. Direct Strength Design of Cold-Formed Steel members with perforations: Research Report RP 09-1. Washington: American Iron and Steel Institute – 58 Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2009. 540 p.
- [4] American Iron and Steel Institute AISI-S100. North American specification for the design of cold-formed steel structural members, 2016.
- [5] Schafer, B. W. e Adany, S. “Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods”. *XVIII International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, 2006.
- [6] Sarawit, A. (2006). "CUTWP Thin-walled section properties, December 2006 update <www.ce.jhu.edu/bschafer/cutwp>", acessado em Janeiro 2018.
- [7] Ang, A. H-S., Tang, W. H. *Probability concepts in engineering planning and design: Decision, risk, and reliability*. Wiley, 1984.
- [8] Hasofer, A. e Lind, N. “Exact and invariant second moment code format”. *Journal of the engineering mechanics division (ASCE)*, vol. 100, pp. 111-121, 1974.
- [9] Der Kiureghian, A. e Liu, P. L. “Structural Reliability Under Incomplete Probability Information”. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, Vol. 112, n.1, 1986.
- [10] Ellingwood, B.; Galambos, T. V.; MacGregor, J. G. e Cornell, C. A. Development of a Probability Cased Load Criterion for American National Standard A58: Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures. US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1980. 222 p.
- [11] Hsiao, L. E. Reliability Based Criteria for Cold-Formed Steel Members. Ph.D. Thesis, University of Missouri-Rolla, 1989.
- [12] Pu, Y., Godley, M. H. R., Beale, R. G. e Lau, H. H. “Prediction of ultimate capacity of perforated lipped channels”. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*. 125(5):510–4, 1999.
- [13] Sivakumaran, K. S.” Load capacity of uniformly compressed cold-formed steel section with punched web”. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*. 14:550–8, 1987.
- [14] Miller, T. H. e Peköz, T. “Unstiffened strip approach for perforated wall studs”. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, v.120, n.2, p.410-421, 1994.
- [15] Abdel-Rahman N. e Sivakumaran, K. S. “Effective design width for perforated cold formed steel compression members”. *Can Journal of Structural Engineering (ASCE)*. 25:315–30, 1998.
- [16] Ortiz-Colberg, R. A. The load carrying capacity of perforated cold-formed steel columns. Master's thesis, Cornell University, 1981.
- [17] Yao, X., Guo, Y. e Nie, Z. “Distorcional Buckling Experiment on Cold-Formed Steel Lipped Channel Columns with Circle Holes under Axial Compression”. *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, 2016.
- [18] Xu, L., Shi, Y. e Yang, S. “Compressive Strength of Cold-Formed Steel C-shape Columns with Slotted Holes”. *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, 2014.
- [19] Yao, X. “Experiment and Design Method on Cold-Formed Thin-Walled Steel Lipped Channel Columns with Slotted Web Holes Under Axial Compression”. *The Open Civil Engineering Journal*, 2017.
- [20] Minitab Statistical Software. Versão 18. LLC.
- [21] Moen, C. D., Schafer, B. W.” Direct strength method for the design of cold-formed steel columns with holes”. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 137(5):559–70, 2011.
- [22] Ganesan, K. Resistance factor for cold-formed steel compression members. Master's thesis, Virginia Tech, 2010.
- [23] Freitas, M. S. R., Brandão, A. L. R. e Freitas, A. M. S. “Resistance factor calibration for cold-formed steel compression members”. *Revista Escola de Minas*, vol. 66, 233-238 p., 2013.
- [24] Capanema, D. C. O. Análise da confiabilidade de barras em perfis formados a frio submetidas à força axial de compressão pelo método FORM. Dissertação, Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.
- [25] Toledo, F. F. A. Obtenção do índice de confiabilidade de barras de perfis formados a frio submetidas à flexão simples com o emprego do método FORM. Dissertação, Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.