



A: XXXIX-0000

CONFIABILIDADE DE BARRAS COMPOSTAS (BUILT-UP) DE PERFIS FORMADOS A FRIO SUBMETIDAS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO

RELIABILITY OF COMPOSITE BARS (BUILT-UP) OF COLD-FORMED PROFILES SUBJECTED TO AXIAL COMPRESSION FORCE

Celmar P. de Andrade (1) (A); Marcílio S. R. Freitas (2); André L. R. Brandão (3)

Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto, Brasil.

(2) Prof. D. Sc., Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto, Brasil.

(3) Prof. D. SC., Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Integradas, Itabira, Brasil.

Endereço para correspondência: celmar.andrade@aluno.ufop.edu.br; (A) Apresentador

Área temática: Segurança, Funcionalidade e Confiabilidade Estrutural.

Resumo

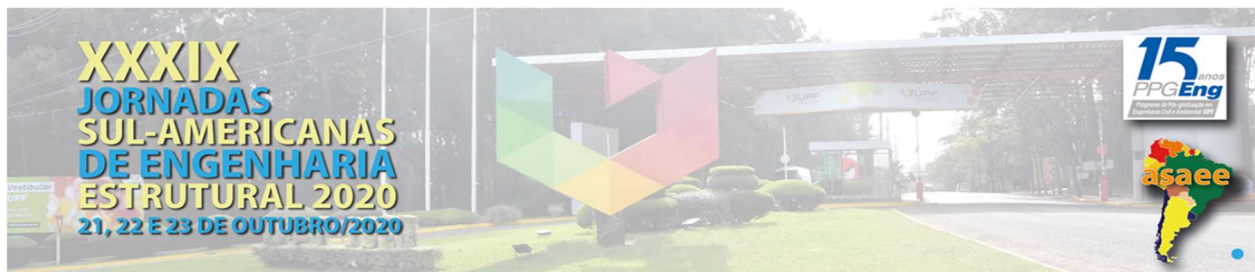
Os perfis formados a frio (PFF), em diversas situações, apresentam-se como uma solução econômica na construção civil. Esses elementos são constituídos por chapas planas de aço conformadas em temperatura ambiente (ABNT NBR 14762 2010). Recentemente, têm sido utilizadas barras compostas que geralmente possuem seção transversal simétrica. Este trabalho tem como principal objetivo analisar a segurança de barras compostas por perfis formados a frio (built-up) submetidas à força axial de compressão, projetadas de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 14762 (2010). São utilizados os métodos de confiabilidade FOSM, FORM e SMC. Um total de 266 resultados de ensaios experimentais, obtidos a partir de trabalhos de diversos pesquisadores, foram analisados para obtenção das estatísticas da relação resistência de ensaio versus resistência predita através do Método da Resistência Direta (MRD). Foram utilizados os coeficientes de ponderação da resistência definidos para combinações de ações gravitacionais prescritas na norma brasileira ABNT NBR 14762 (2010) e americana AISI S100 (2016), $1,2D_n+1,6L_n$ e $1,25D_n+1,5L_n$, e relações entre ações variável e permanente, L_n/D_n , igual a 3 para o LSD e 5 para LRFD, adotadas na calibração da AISI S100 (2016), com os índices de confiabilidades alvos $\beta_0 = 2,5$ para LRFD e $\beta_0 = 3,0$ para LSD. Os resultados obtidos apontam que são necessários mais estudos para adequação do MRD para barras compostas, uma vez que o mesmo não está calibrado para tal situação.

Palavras-chave: Perfis formados a frio; Barras compostas; FORM; Confiabilidade; MRD.

Abstract

Cold-formed steel columns, in several situations, are presented as an economical solution in civil construction. These elements are made up of flat steel sheets formed at room temperature (ABNT NBR 14762 2010). Recently, composite columns that generally have a symmetrical cross section have been used. The main objective of this work is to analyze the safety of composed bars of cold-formed profiles (built-up) subjected to axial compression force, designed in accordance with the Brazilian standard ABNT NBR 14762 (2010). The FOSM, FORM and MCM reliability methods are used. A total of 266 experimental test results, obtained from the work of several researchers, were analyzed to obtain the statistics of the test resistance versus predicted resistance through the Direct Strength Method (DSM). The resistance factor defined for combinations of gravitational actions prescribed in the Brazilian standard ABNT NBR 14762 (2010) and in the American AISI S100 (2016), $1.2D_n+1.6L_n$ e $1.25D_n+1.5L_n$ were used, and relations between variable and permanent action, L_n/D_n , equal to 3 for LSD (Limit State Design) and 5 for LRFD (Load and Resistance Factor Design) adopted in the calibration of the AISI S100 (2016), with the indexes of target reliabilities $\beta_0 = 2.5$ for LRFD and $\beta_0 = 3.0$ for LSD. The results obtained indicate that further studies are needed to adapt the DSM to composite bars, since it is not calibrated for such a situation.

Keywords: Cold formed profiles; Composite bars; FORM; Reliability; MRD.



1. INTRODUÇÃO

Os perfis formados a frio (PFF) podem ser fabricados em várias seções, o que pode proporcionar diversas vantagens na sua utilização. Geralmente possuem menor peso e maior relação largura/espessura das chapas, assim instabilidades ao longo de seu comprimento podem ocorrer. As barras compostas por perfis formados a frio podem ser uma solução vantajosa por apresentarem melhor resistência contra movimentos fora do plano, quando comparados aos perfis individuais. Na Figura 1 são mostradas seções de barras compostas analisadas neste trabalho.

Apesar de não ser calibrado para o dimensionamento de barras composta, o Método da Resistência Direta (MRD) vem sendo tratado como objeto de pesquisas para a aplicação em barras compostas. O MRD, proposto originalmente por Schafer e Peköz (1998), tem como princípio básico a obtenção das forças resistentes da seção a partir de uma análise de estabilidade elástica da seção transversal.

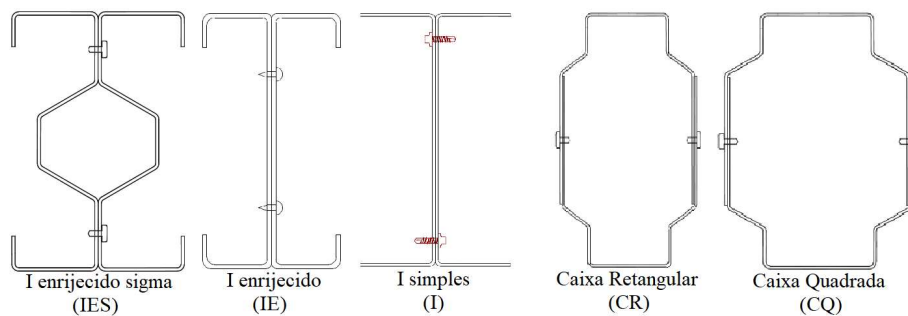


Figura 1. Seções *built-up* analisadas neste trabalho.

No Brasil é utilizada a NBR 14762 (2010), na qual estão presentes as equações de projeto do Método da Resistência Direta, calibradas na AISI, sendo que na norma brasileira o coeficiente de ponderação da resistência, γ , é o inverso do coeficiente ϕ do AISI. A norma americana AISI S100 (2016) traz disposições de projeto para LRFD (*Load and Resistance Factor Design*), utilizado pelos Estados Unidos e México, e LSD (*Limit States Design*), usado no Canadá.

A confiabilidade estrutural baseia-se na análise da probabilidade de violação de um estado limite de um elemento estrutural, o que pode incluir tanto a segurança contra a falha estrutural quanto a redução da eficiência de parte da estrutura. A violação de um estado-limite pode ser definida como a situação em que se atinge uma condição indevida do elemento estrutural. Para o estado limite último, o formato usual do método LRFD é representado pela equação 1. Tanto o LRFD como LSD são baseados na mesma filosofia: com o efeito de carga de projeto inferior ou igual à resistência de projeto.

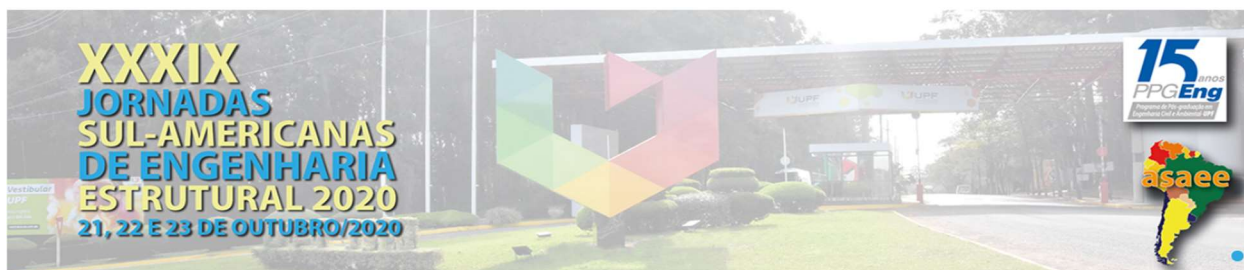
$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad 1$$

onde, ϕ é o coeficiente de ponderação da resistência, $\phi < 1$;

R_n a resistência nominal;

γ_i o coeficiente de ponderação das ações;

Q_i o efeito das ações.



A confiabilidade estrutural pode ser utilizada para a calibração de normas. Usualmente os coeficientes de ponderação da resistência e das ações são determinados de modo que o índice de confiabilidade, β , alcance um valor alvo desejado.

O formato LRFD foi calibrado para a combinação de ações $1,2D_n + 1,6L_n$, com a razão entre a ação permanente nominal (D_n) e a ação variável nominal (L_n) definida por $L_n/D_n = 5$, e o índice de confiabilidade alvo $\beta_0 = 2,5$. Já para o LSD os dados utilizados na calibração foram: combinação de ações $1,25D_n + 1,5L_n$, $L_n/D_n = 3$, e $\beta_0 = 3,0$. No caso da NBR 14762 (2010), não foi realizado um procedimento de calibração, mas o nível de segurança obtido pela utilização das equações de dimensionamento de barras sob compressão é esperado se aproximar ao definido pela norma norte-americana, uma vez que a combinação de ações últimas da norma brasileira é também $1,25D_n + 1,5L_n$. Além disso, o seu coeficiente de ponderação da resistência ($\gamma = 1,20$) tem equivalência ao ϕ de 0,83 (no formato norte-americano), ou seja, um valor intermediário entre os coeficientes de ponderação da resistência adotados para o LRFD e o LSD.

O objetivo deste artigo é avaliar a confiabilidade de barras compostas por perfis formados a frio submetidos à força axial de compressão. Para o cálculo da resistência foi utilizado o Método da Resistência Direta, disponível na norma brasileira, com base em um banco de dados com 266 colunas compostas. Este estudo reuniu perfis de seções I enrijecidas com enrijecedores de alma e flange (IES), seções I enrijecidas com enrijecedores de flange (IE), seções I simples (I) e seções Caixa (CR e CQ). Os valores do coeficiente profissional, P , calculados para este artigo foram obtidos pela razão entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados teóricos. Os índices de confiabilidade foram obtidos com a utilização dos métodos de confiabilidade: Método de Confiabilidade de Primeira Ordem e Segundo Momento (FOSM), Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) e Método de Simulação de Monte Carlo (SMC). Os resultados são avaliados para os coeficientes de ponderação da resistência de $\phi = 0,80$ (LSD), de $\phi = 0,83$ (NBR) e de $\phi = 0,85$ (LRFD). Foram utilizados os mesmos dados de calibração da norma norte-americana.

2. METODOLOGIA

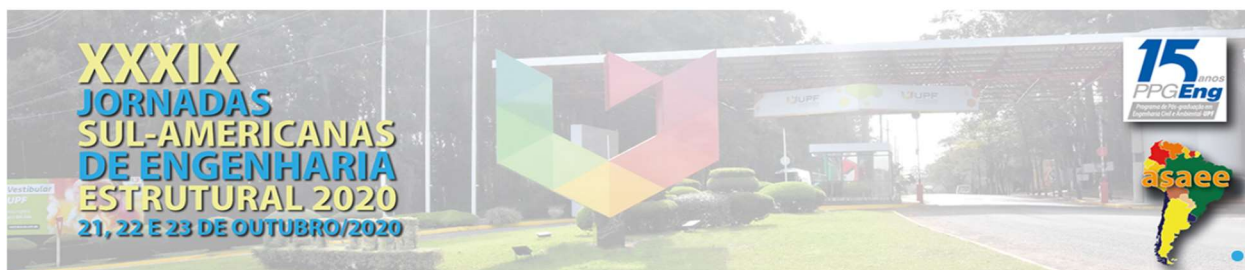
2.1. método da resistência direta

O Método da Resistência Direta, utilizado para o cálculo das forças axiais resistentes de cálculo de perfis formados a frio, leva em consideração as propriedades geométricas originais da seção (seção bruta) e a análise geral da estabilidade elástica. Para a etapa de análise da estabilidade elástica, um *software* bastante difundido é o CUFSM (Li e Schafer 2010), que permite a obtenção das cargas críticas e os respectivos modos de flambagem. Segundo a NBR 14762 (2010), o valor característico da força axial de compressão resistente, $N_{c,Rk}$, é o menor valor calculado para as forças axiais resistentes associados aos modos de flambagem local ($N_{c,RI}$), global ($N_{c,Re}$) e distorcional ($N_{c,Rdist}$) (equação 2).

$$N_{c,Rk} = \text{mínimo}(N_{c,Re}, N_{c,RI}, N_{c,Rdist}) \quad 2$$

2.2. coeficiente profissional

O coeficiente profissional ou erro do modelo é uma variável aleatória resultante da razão entre a resistência experimental e a resistência teórica. Os valores das resistências experimentais



correspondem à capacidade resistente de uma coluna ensaiada, enquanto a resistência teórica neste caso é a obtida pelo MRD.

O coeficiente profissional P permite a verificação do quão conservador ou inseguro é o modelo estudado. Desta forma, P_m se aproxima do valor unitário caso o modelo represente adequadamente o fenômeno físico estudado. O coeficiente de variação, V_P , é obtido pela razão entre o desvio padrão, σ_P , e a média, P_m , que denota o nível de dispersão dos dados em torno da média.

O banco de dados, com resultados experimentais, contém um total de 266 testes realizados por diferentes autores. Este estudo reuniu perfis de seções I enrijecidos com enrijecedores de alma e flange (IES), seções I enrijecidos com enrijecedores de flange (IE), seções I simples (I) e seções Caixa (CR e CQ). Os dados da variável P foram organizados em grupos por tipo de seção. Na tabela 1 é apresentada a quantidade de dados por grupo (n) e os resultados do estudo estatístico. A função densidade de probabilidade (FDP) normal ajustou-se adequadamente a cada grupo. Neste caso, foi empregado o teste de aderência de Anderson-Darling, com auxílio do *software* Minitab 20®.

Tabela 1. Grupo de dados e estatísticas do coeficiente profissional

Grupo de dados	L (mm)	h/t	n	P_m	σ_P	V_P	Referências
IES	299,60 - 3200	81,93 - 208,33	73	1,17	0,24	0,20	Abu-Hamd <i>et al.</i> (2018), Zhang e Young (2012, 2015), Aghoury <i>et al.</i> (2020); Li e Young (2022)
IE	261 - 3038	61,07 - 410,71	93	1,01	0,22	0,22	Lu <i>et al.</i> (2017), Fratamico <i>et al.</i> (2018), Roy <i>et al.</i> (2018)
I	999,69 - 1800,70	33,33 - 80,01	45	0,93	0,09	0,10	Selvaraj e Madhavan (2021)
CR	270 - 3200	80,00 - 135,08	29	0,80	0,06	0,08	Zhang e Young (2018), Nie <i>et al.</i> (2020), Li e Young (2022)
CQ	299,80 - 3199,50	82,05 - 183,33	26	1,14	0,07	0,06	
T	261 - 3200	33,33 - 410,71	266	1,03	0,22	0,22	-

2.3. métodos FOSM, FORM e SMC

A confiabilidade estrutural pode ser avaliada com a utilização dos métodos analíticos aproximados FORM e FOSM, e por métodos de simulação como o SMC. O método FOSM é baseado na primeira ordem da série de Taylor, limitando-se aos momentos de até segunda ordem, ou seja, média e desvio padrão (Brandão, 2012). O método FORM foi proposto inicialmente por Hasofer e Lind (1974), e nele as informações estatísticas a respeito das variáveis aleatórias média, desvio padrão, a distribuição de probabilidade, assim como, os coeficientes de correlação, são utilizados.

Na análise por SMC são geradas variáveis aleatórias, com base em suas respectivas distribuições de probabilidade. A probabilidade de falha (P_f) é dada pela razão entre a quantidade de vezes em que a função de falha indicou a falha e o número total de simulações (Melchers e Beck 2018).



2.4. função do estado limite

A função do estado limite ou função de falha é proposta baseada nas condições usuais de segurança referentes aos estados limites em relação às variáveis de resistência, que são função da resistência do material, da geometria da seção e de suas dimensões e das solicitações, que podem ser expressas em termos das ações permanente e variáveis. Matematicamente a função de falha pode ser expressa pela equação 3.

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

onde R_n é a resistência nominal do elemento estrutural, M é o fator material, que reflete as incertezas do material, F é o fator fabricação, que reflete as incertezas da geometria, P é o coeficiente profissional (erro do modelo), D e L são as ações permanentes e variáveis, c é o coeficiente determinístico de transformação das ações em seus efeitos. Os parâmetros estatísticos das variáveis M , F , D e L são apresentados na tabela 2, obtidos de Ellingwood *et al.* (1980).

Tabela 2. Parâmetros estatísticos e distribuição de probabilidade

Variáveis	Valor médio / valor nominal	Coefficiente 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

3. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

Os índices de confiabilidade foram calculados através dos métodos FOSM, FORM e SMC, e os resultados obtidos são apresentados na tabela 3. Foi levado em consideração as especificações de calibração do AISI S100 (2016), com coeficientes de ponderação da resistência de $\phi = 0,80$ (LSD), de $\phi = 0,83$ (NBR) e de $\phi = 0,85$ (LRFD). Assim foram definidas as seguintes situações:

- Para o LRFD: (I) $1,2D_n + 1,6L_n$, relação $L_n/D_n = 5$, $\phi = 0,85$, $\beta_0 = 2,5$;
- Para o LSD: (II) $1,25D_n + 1,5L_n$, relação $L_n/D_n = 3$, $\phi = 0,80$, $\beta_0 = 3,0$;
- Para a NBR 14762: (II) $1,25D_n + 1,5L_n$, relação $L_n/D_n = 3$, $\phi = 0,83$, $\beta_0 = 2,5$.

O agrupamento de dados foi definido de acordo como na tabela 1.

Tabela 3. Índices de confiabilidade para os métodos SMC, FORM e FOSM

Grupo de Dados	β_{SMC}			β_{FORM}			β_{FOSM}		
	LRFD	LSD	NBR	LRFD	LSD	NBR	LRFD	LSD	NBR
IES	2,38	2,43	2,32	2,47	2,51	2,41	2,70	2,79	2,65
IE	1,91	1,93	1,83	1,99	2,01	1,91	2,13	2,19	2,06
I	2,30	2,40	2,25	2,33	2,42	2,28	2,36	2,49	2,32
CR	1,84	1,90	1,76	1,86	1,94	1,78	1,82	1,92	1,74
CQ	3,12	3,27	3,13	3,12	3,27	3,12	3,32	3,54	3,36
T	1,94	1,98	1,89	2,04	2,06	1,96	2,19	2,26	2,12



Nas Fig. 2 e 3 são apresentados os gráficos com os índices de confiabilidade para as filosofias LRFD, LSD e para o formato da NBR 14762.

Nas três situações adotadas, analisando os valores obtidos pelo método FORM, apenas os valores do grupo de dados das seções Caixa Quadradas foram superiores ao $\beta_0 = 2,5$ para LRFD e NBR 14762, e $\beta_0 = 3,0$ para LSD. Para o SMC, na combinação (1), os valores de β variam de 1,84 a 3,12, para combinação (2) os valores de β variam de 1,90 a 3,27, e para NBR os valores de β variam de 1,76 a 3,13, sendo o maior valor de β observado nas seções Caixa Quadradas e o menor valor para seções Caixa Retangulares. Para o método FORM, na combinação (1), os valores de β variam de 1,86 a 3,12, para combinação (2) os valores de β variam de 1,94 a 3,27, e para NBR os valores de β variam de 1,78 a 3,12, sendo o maior valor de β observado nas seções Caixa Quadradas e o menor valor para seções Caixa Retangulares. E para o método FOSM, para combinação (1), os valores de β variam de 1,82 a 3,32, para combinação (2), os valores de β variam de 1,92 a 3,54, e para NBR os valores de β variam de 1,74 a 3,36, com os maiores e menores valores seguindo o mesmo comportamento dos métodos FORM e SMC.

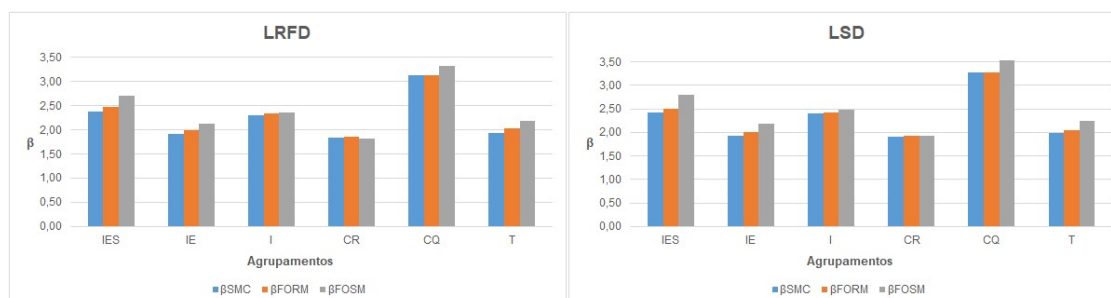


Figura 2. Índices de confiabilidade para filosofia LRFD e LSD

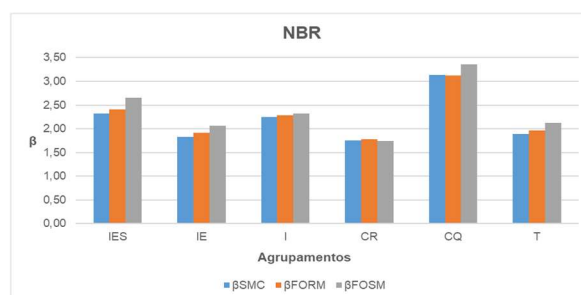


Figura 3. Índices de confiabilidade para NBR 14762

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar a confiabilidade de barras compostas por perfis formados a frio submetidos à força axial de compressão, utilizando-se o coeficiente de ponderação da resistência, γ , igual 1,20 (ABNT NBR 14762 2010), bem como para as situações do AISI S100:2016. As seguintes conclusões foram obtidas a partir dos resultados desta análise:

- O método FORM apresentou boa precisão nos resultados ao se comparar à Simulação de Monte Carlo. Além disso, o FORM se mostrou eficiente para a função de falha e o número de variáveis do problema, convergindo com 5 iterações.



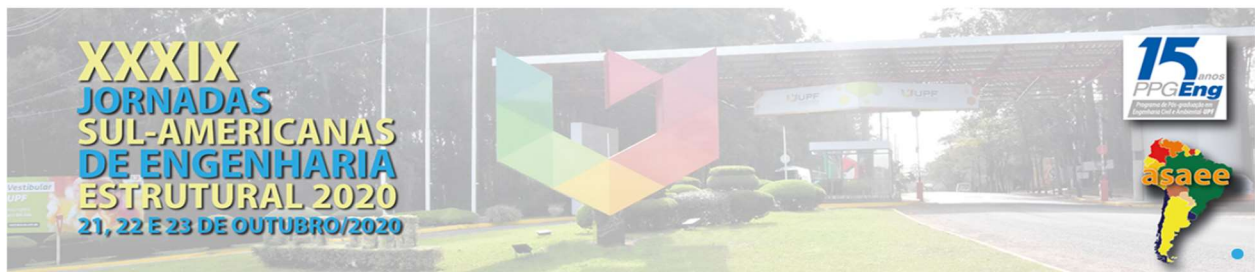
- Os resultados do método FOSM se mostraram ligeiramente superiores aos outros métodos de confiabilidade para a maioria dos grupos. Ressalta-se que este é um método simplificado, utilizado na calibração da norma AISI S100 (2016), mas de menor precisão.
- Para a filosofia LRFD apenas o grupo CQ apresentou resultados satisfatórios, com os índices de confiabilidade superiores ao alvo $\beta_0 = 2,5$.
- Para a filosofia LSD novamente apenas o grupo CQ apresentou resultado adequado em relação ao nível de segurança exigido, com valores superiores ao valor alvo de $\beta_0 = 3,0$.
- O mesmo se repetiu para o formato NBR adotado, com apenas o grupo CQ apresentando resultado adequado em relação ao nível de segurança exigido, com valores superiores ao valor alvo de $\beta_0 = 2,5$.
- Se faz necessário aprofundar os estudos para aprimoramento do MRD para sua aplicação no dimensionamento de barras compostas de perfis formados a frio, uma vez que o método ainda não se encontra calibrado para tais perfis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto) e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Choi, C.K. e Kim, S.H. (1989). Coupled use of reduced integration and nonconforming modes in improving quadratic plate elements. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, v. 28, n. 4, p. 1909-1928.
- Abu-Hamd, M., Abdel-Ghaffar, M. M.E. e El-Samman, B. M. (2018). Buckling strength of axially loaded cold formed built-up I-sections with and without stiffened web. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 9, n. 4, p. 3151-3167.
- Aghoury, M.E., Tawfic, M. e Amoush, E. (2020). Compressive Strength of Axially Loaded Built-up Sigma Cold Formed Sections Columns. *Future Engineering Journal*: v. 1, n. 1, Article 6.
- American Iron and Steel Institute (2016). North American specification for the design of cold-formed steel structural members. AISI-S100-16. Washington, D.C.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). (2010). Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio - Procedimento. ABNT NBR 14762. Rio de Janeiro.
- Brandão, A.L.R. (2012). Calibração de coeficiente de ponderação da resistência em barras e ligações de perfis formados a frio. Tese de doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Ellingwood, B.; MacGregor, J.G.; Galambos, T.V.; Cornell, C.A. (1980). Development of a Probability-Based Load Criterion for American National Standard A58 – NBS Special Publication. National Bureau of Standards, United States Department of Commerce, Washington: D.C.
- Fratamico, D.C., Torabian, S., Zhao, X., Rasmussen, K.J.R. e Schafer, B.W. (2018). Experiments on the global buckling and collapse of built-up cold-formed steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 144, p. 65-80.



- Hasofer, A.M. e Lind, N.C. (1974). Exact and invariant second moment code format. *Journal of the engineering mechanics division: ASCE*, v. 100, n. 1, p. 111-121.
- Li, Q.-Y. e Young, B. (2022). Experimental and numerical investigation on cold-formed steel built-up section pin-ended columns. *Thin-Walled Structures*, v. 170.
- Li, Z. e Schafer, B.W. (2010). Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: Conventional and Constrained Finite Strip Methods. Versão 4.5. Cornell University.
- Lu, Y., Zhou, T., Li, W. e Wu, H. (2017). Experimental investigation and a novel direct strength method for cold-formed built-up I-section columns. *Thin-Walled Structures*, v. 112, p. 125-139.
- Melchers, R.E. e Beck, A.T. (2018). *Structural Reliability Analysis and Prediction*, 3ª Ed., Hoboken: Wiley.
- MINITAB. MINITAB®: Version: 20.4. Available at: <http://www.minitab.com/pt-br/>
- Nie, S., Zhou, T., Eatherton, M. R., Li, J. e Zhang, Y. (2020). Compressive behavior of built-up double-box columns consisting of four cold-formed steel channels. *Engineering Structures*, v. 222.
- Roy, K., Ting, T.C.H., Lau, H.H. e Lim, J.B.P. (2018). Effect of thickness on the behavior of axially loaded back-to-back cold-formed steel built-up channel sections - Experimental and numerical investigation. *Structures*, v. 16, p. 327-346.
- Schafer, B.W. e Peköz, T. (1998). Direct Strength Prediction of Cold-Formed Steel Members Using Numerical Elastic Buckling Solutions. In *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures: Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction*. St. Louis, Missouri.
- Selvaraj, S. e Madhavan, M. (2021). Design of cold-formed steel built-up columns subjected to local-global interactive buckling using direct strength method. *Thin-Walled Structures*, v. 159.
- Zhang, J.H. e Young, B. (2012). Compression tests of cold-formed steel I-shaped open sections with edge and web stiffeners. *Thin-Walled Structures*, v. 52, p. 1-11.
- Zhang, J.H. e Young, B. (2018). Experimental investigation of cold-formed steel built-up closed section columns with web stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 147, p. 380-392.
- Zhang, J.H. e Young, B. (2018). Numerical investigation and design of cold-formed steel built-up open section columns with longitudinal stiffeners. *Thin-Walled Structures*, v. 89, p. 178-191.