



A: XXXIX-0000

SEGURANÇA ESTRUTURAL DE BARRAS EM PERFIS FORMADOS A FRIO SUBMETIDAS À FORÇA CORTANTE

STRUCTURAL SAFETY OF BARS IN COLD FORMED PROFILES SUBMITTED TO SHEAR STRENGTH

Frederico B. Costa (P)(1); André L. R. Brandão (2); Marcilio S. da R. Freitas (3)

(1) Mestrando em engenharia civil pela Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, Itabira, Brasil.

(3) Dr. Prof., Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil

Endereço para correspondência: Frederico.borges@aluno.ufop.edu.br; (A) Apresentador

Área temática: Segurança, Funcionalidade e Confiabilidade Estrutural.

Resumo

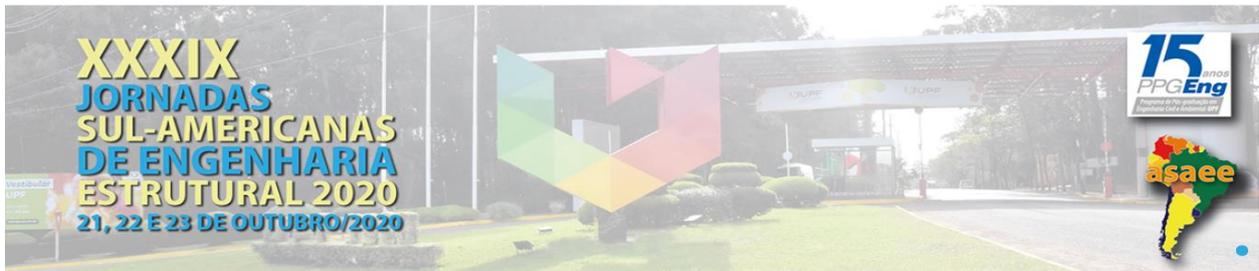
O presente trabalho tem como objetivo analisar a segurança estrutural das barras de perfis formados a frio dimensionadas a força cortante pelas equações disponíveis na NBR 14762. No total, 17 resultados de ensaios de perfis U enrijecidos e 6 resultados de perfis SupaCee® obtidos da literatura foram utilizados para obtenção das estatísticas do erro do modelo. Os resultados obtidos pelo método FORM (First Order Reliability Method) e FOSM (First Order Second Moment) mostraram que os coeficientes de ponderação da resistência precisam de ajustes, dependendo do índice confiabilidade alvo a ser adotado para a norma NBR 14762 (2010).

Palavras-chave: Perfis Formados à Frio; Método FORM; Índice de Ponderação; NBR 14762 (2010).

Abstract

The present work aims to analyze the structural safety of bars of cold-formed profiles dimensioned to shear force by the equations available in NBR 14762. In total, 17 test results of stiffened U-profiles and 6 results of SupaCee® profiles obtained from the literature were used to obtain the model error statistics. The results obtained by the FORM (First Order Reliability Method) and FOSM (First Order Second Moment) methods showed that the strength weighting coefficients need adjustments, depending on the target reliability index to be adopted for the NBR 14762 (2010) standard.

Keywords: Cold-Formed Steel; FORM Method; Reliability Indexes; NBR 14762 (2010).



1. INTRODUÇÃO

Os perfis formados à frio (PFF) são utilizados na construção civil em edificações residenciais, instalações comerciais e industriais. Os PFF fornecem às edificações, qualidades como alta resistência associada à redução do peso próprio, facilidade nos processos de fabricação e montagem da estrutura (Yu et al. 2020). O estudo da confiabilidade estrutural se relaciona com a avaliação da probabilidade de violação de um estado limite para um sistema estrutural (Hsiao 1989).

O objetivo deste artigo é avaliar a confiabilidade de elementos estruturais de aço formado a frio submetidos a força cortante. O dimensionamento das peças foi realizado seguindo os padrões propostos pela norma NBR 14762:2010 e foram comparados a ensaios obtidos da literatura, onde foram selecionados 17 resultados de ensaios de perfis U enrijecidos e 6 resultados de perfis SupaCee®. A relação entre os resultados teóricos e experimentais fornece as estatísticas do fator profissional, variável utilizada para determinar a confiabilidade dos elementos através dos métodos FOSM (*First Order Second Moment*), FORM (*First Order Reliability Method*) e Simulação de Monte Carlo (SMC) analisados. Os índices de confiabilidade obtidos utilizando o coeficiente de ponderação da resistência da NBR 14762:2010 foram comparados com os índices de confiabilidade alvos indicados na norma AISI S100:2016, na descrição da calibração para as filosofias de projeto LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) e LSD (*Limit State Design*).

2. METODOLOGIA

Foi gerado um banco de dados de ensaios em vigas em PFF, com ênfase na obtenção da resistência ao cortante, conforme mostrado na figura 1. Foram obtidos da literatura ensaios experimentais de 17 perfis U enrijecido e 6 ensaios de perfis SupaCee®.

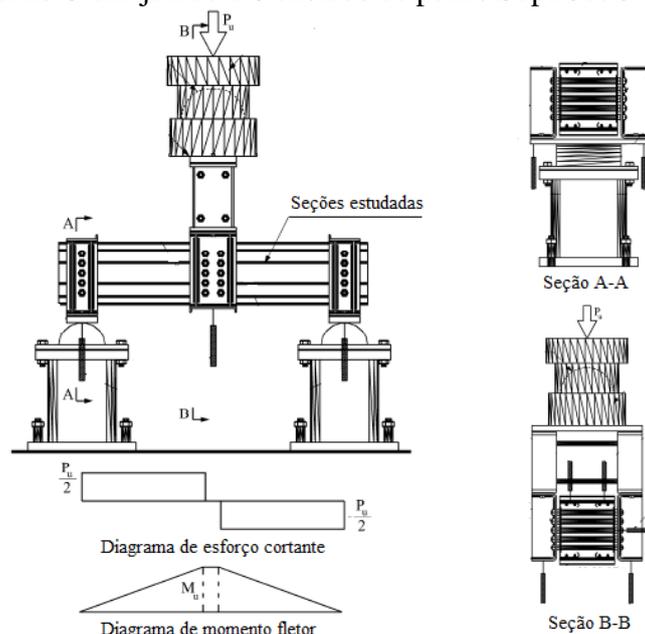
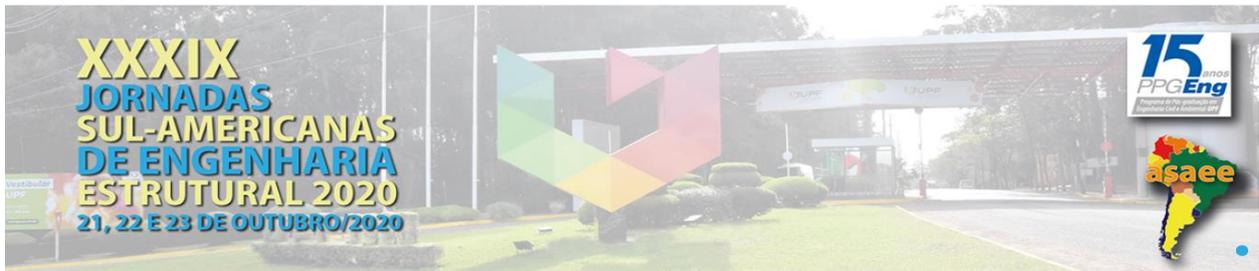


Figura 1. Esquema dos ensaios com predominância de esforços cortantes. Fonte: Keerthan e Mahendran, 2015



Para o dimensionamento das barras, foi utilizada a formulação da norma NBR 14762:2010 (equação 1).

$$\left\{ \begin{array}{ll} V_{Rd} = 0,6f_y h t / \gamma & \text{se } h/t \leq 1,08 \left(E k_v / f_y \right)^{0,5} \\ V_{Rd} = 0,65 t^2 (k_v f_y E)^{0,5} / \gamma & \text{se } 1,08 \left(E k_v / f_y \right)^{0,5} < h/t \leq 1,4 \left(E k_v / f_y \right)^{0,5} \\ V_{Rd} = \left[0,905 E k_v t^3 / h \right] / \gamma & \text{se } h/t > 1,4 \left(E k_v / f_y \right)^{0,5} \end{array} \right. \quad 1$$

Onde:

γ = coeficiente de ponderação da resistência indicado pela norma brasileira como 1,10;

t = espessura da alma;

h = largura da parte plana da alma,

k_v = coeficiente de flambagem local por cisalhamento que é igual a 5 quando a alma não possui enrijecedores transversais ou eles estão muito distantes ($a/h > 3$). O coeficiente, quando a alma possui enrijecedores transversais deve ser calculado pela equação 2:

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} \quad 2$$

Onde:

a = distância entre enrijecedores transversais de alma.

A formulação da norma NBR 14762:2010 não leva em consideração o ganho de resistência em perfis que contenham enrijecedores longitudinais, como é o caso dos perfis SupaCee®, pois considera apenas as seções com alma plana.

2.1. confiabilidade estrutural

A análise da confiabilidade estrutural pressupõe a definição de uma função de estado limite. A função de estado limite $G(X)$ é escrita em função das variáveis aleatórias X envolvidas na análise. A função de estado limite deve ser definida da forma $G(X) = 0$, para que esta separe o conjunto em dois domínios: o domínio de falha ($G(X) < 0$) e o domínio de segurança ($G(X) > 0$) (Hsiao 1989).

Desta forma a probabilidade de falha da estrutura será representada pela equação 3:

$$P_f = P[G(X) \leq 0] \quad 3$$

Onde:

P_f = probabilidade de falha;

$P[X]$ = probabilidade do evento X .

Em uma análise estrutural, a função de estado limite (ou função de falha) pode ser definida em termos das variáveis aleatórias de resistência e sollicitação, como mostra a equação 4.

$$G(X) = R - Q \quad 4$$

Onde:

R = variável aleatória da resistência;

Q = variável aleatória da sollicitação.



Admitindo que as funções densidade de probabilidade e funções densidade acumulada de R e Q sejam conhecidas, as probabilidades associadas aos eventos podem ser indicadas por:

$$P_f = P(R < Q) = P[G(X) \leq 0] = \int_{G(X) \leq 0} f_x(X) dx \quad 5$$

Onde:

$f_x(X)$ = função densidade de probabilidade conjunta de todas as variáveis X envolvidas na análise.

Devido à complexidade para resolver a equação 5, é usual o emprego de métodos de confiabilidade para obtenção da probabilidade de falha e o respectivo índice de confiabilidade β . Tais métodos podem ser classificados como baseados em expansões em série de Taylor, a exemplo do FORM e FOSM, e em métodos baseados na geração de amostras sintéticas, como na SMC (Simulação de Monte Carlo) (HALDAR e MAHADEVAN, 2000).

2.1.1. métodos FOSM, FORM e Simulação de Monte Carlo

A confiabilidade estrutural tem como objetivo principal determinar a probabilidade de falha numa estrutura, utilizando métodos probabilísticos que permitem uma representação explícita das incertezas através de variáveis aleatórias de resistência (R) e solicitações (Q). Tais métodos podem ser analíticos, como por exemplo o FORM e FOSM, e de simulação como a Simulação de Monte Carlo (SMC).

O método FOSM é baseado na aproximação de primeira ordem da série de Taylor da função de estado-limite, utilizando dois parâmetros estatísticos, a média e a variância. Foi proposto inicialmente por Hasofer e Lind (1974) e aprimorado por Rackwitz e Fiessier (1978). O método FORM consiste em um procedimento iterativo para determinação da probabilidade de falha. Este processo tem como característica necessitar que as variáveis aleatórias sejam estatisticamente independentes e transformadas em normais padrão. O índice de confiabilidade β é a distância mínima entre a origem e a superfície de estado limite.

A Simulação de Monte Carlo consiste em gerar diversos valores das variáveis aleatórias envolvidas a partir das suas informações estatísticas. Em cada ciclo da simulação, utiliza-se um conjunto de variáveis geradas para verificar se há violação de um determinado estado limite, de modo que a frequência relativa das falhas possa ser utilizada como a probabilidade de falha. A precisão do método depende do número de simulações.

2.1.2. função de falha

A partir do formato de equação de estado limite normativa, propõe-se uma função de falha em termos de variáveis de resistência (R) e solicitação (Q). 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. Matematicamente, esta função pode ser representada pela equação 6 (Hsiao, 1989):

$$G(.) = R_n MFP - c(D + L) . \quad (6)$$

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 "coeficiente 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. Neste trabalho foram utilizados os parâmetros estatísticos e distribuições de probabilidade das variáveis apresentados na Tab. 1 foram obtidos de Ellingwood et al. (1980).

Tabela 1. Dados estatísticos

Variável aleatória	Média	Coefficiente de variação	Tipo de distribuição
M	1,10	0,10	Lognormal
F	1,00	0,05	Lognormal
D	1,05	0,10	Normal
L	1,00	0,25	Ext. tipo I

2.1.3. coeficiente profissional

O coeficiente profissional P 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. Neste trabalho, a variável P será dada pela equação 7, que mostra a relação entre o resultado experimental V_{teste} e o valor nominal ou característico (V_{Rk}), calculado pela formulação normativa.

$$P = \frac{V_{teste}}{V_{Rk}} \quad 7$$

Como resultados da análise estatística da variável P , obtêm-se a média desta variável (P_m) e o desvio padrão (σ_P). A razão do desvio padrão pela média define o coeficiente de variação (V_P) desta variável.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1. dados experimentais

A tabela 2 apresenta as resistências teóricas de cada viga ensaiada à força cortante (V_{Rk}) que foram calculadas com o método de dimensionamento descrito na ABNT NBR 14762 (2010). A tabela 2 também apresenta a comparação entre a resistência teórica e a resistência experimental apresentada na literatura. A notação utilizada para obtenção das propriedades geométricas da seção transversal de perfis U enrijecidos (Ue) e SupaCee® são apresentados na Fig. 2.

Os dados foram organizados em três grupos: (I) todos os dados reunidos, (II) perfis U enrijecido e (III) perfis Supacee®. Os testes de ajuste de Anderson Darling realizados com o auxílio do software Minitab 19 mostraram que a função densidade de probabilidade (fdp) lognormal foi a que melhor se ajustou aos dados da variável P , em cada grupo analisado.

Tabela 2. Seções U enrijecidas e SupaCee® estudadas e análise da resistência.

Referência	Nomenclatura	f_y MPa	V_{teste} kN	V_{Rk} kN	$P = V_{teste}/V_{Rk}$
------------	--------------	--------------	-------------------	----------------	------------------------



Seções U enrijecidas					
Keerthan and Mahendran 2014	Teste 1	515	75,0	65,03034	1,153308
Keerthan and Mahendran 2014	Teste 2	515	69,4	50,67261	1,369576
Keerthan and Mahendran 2014	Teste 3	515	73,8	76,90143	0,95967
Keerthan and Mahendran 2014	Teste 4	537	57,0	31,6332	1,801904
Keerthan and Mahendran 2014	Teste 5	537	53,2	24,21103	2,197346
Keerthan and Mahendran 2014	Teste 6	537	54,5	39,56661	1,377424
Keerthan and Mahendran 2014	Teste 7	537	43,3	47,29204	0,915588
Keerthan and Mahendran 2014	Teste 8	271	55,1	56,36735	0,977516
Keerthan and Mahendran 2014	Teste 9	271	60,3	53,22394	1,132949
Keerthan and Mahendran 2014	Teste 10	271	52,2	49,84015	1,047348
Keerthan and Mahendran 2014	Teste 11	271	38,1	37,6045	1,013177
Pham and Hancock 2009 a	C15015	541	51,3	39,86914	1,286208
Pham and Hancock 2009 a	C15019	534	70,9	76,71871	0,923764
Pham and Hancock 2009 a	C15024	485	93,4	106,961	0,873028
Pham and Hancock 2009 a	C20015	513	50,8	29,83079	1,703609
Pham and Hancock 2009 a	C20019	510	75,8	61,47153	1,233417
Pham and Hancock 2009 a	C20024	483	103,3	116,4246	0,887356
Seções SupaCee®					
Pham and Hancock 2009 b	SC15012	590	39,3	20,32413	1,935138
Pham and Hancock 2009 b	SC15015	534	51,9	39,75757	1,304657
Pham and Hancock 2009 b	SC15024	514	92,9	113,64	0,81767
Pham and Hancock 2009 b	SC20012	593	45,6	15,2058	2,995568
Pham and Hancock 2009 b	SC20015	532	61,7	29,96248	2,057573
Pham and Hancock 2009 b	SC20024	505	117,3	118,985	0,985923

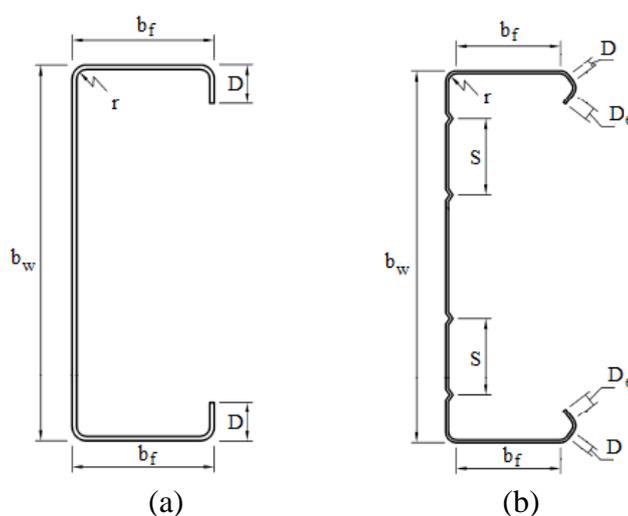


Figura 2. Esquema dos perfis ensaiados: (a) U enrijecido e (b) SupaCee®.

Tabela 3. Dados estatísticos do coeficiente profissional.

Dados estatísticos	Grupo I	Grupo II	Grupo III
P_m	1,34564	1,22666	1,68276



σ_P	0,540556	0,37092	0,812966
V_P	0,40171058	0,30238342	0,48311643

Os índices de confiabilidade β foram obtidos a partir dos métodos FORM, FOSM e da Simulação Monte Carlo (SMC) com 100000 simulações, sendo estabelecido o coeficiente de ponderação $\gamma = 1,10$ (NBR 14762, 2010). Os resultados obtidos pela Simulação de Monte Carlo podem ser utilizados para ratificar a precisão dos métodos analíticos FORM e FOSM. A tabela 4 apresenta os índices de confiabilidade β obtidos para as combinações 1,2Dn + 1,6Ln e 1,25Dn + 1,5Ln, e relações entre as ações nominais, L_n/D_n , de 3 e 5.

Tabela 4. Índice de confiabilidade para os casos estudados.

Combinação 1,25Dn+1,5Ln									
Ln/Dn	Grupo I			Grupo II			Grupo III		
	β_{FOSM}	β_{FORM}	β_{SMC}	β_{FOSM}	β_{FORM}	β_{SMC}	β_{FOSM}	β_{FORM}	β_{SMC}
3	1,83	1,78	1,75	2,00	1,97	1,92	2,00	1,94	1,91
5	1,84	1,79	1,77	1,99	1,97	1,96	2,01	1,95	1,94
Combinação 1,2Dn+1,6Ln									
Ln/Dn	Grupo I			Grupo II			Grupo III		
	β_{FOSM}	β_{FORM}	β_{SMC}	β_{FOSM}	β_{FORM}	β_{SMC}	β_{FOSM}	β_{FORM}	β_{SMC}
3	1,93	1,87	1,84	2,11	2,08	2,04	2,08	2,02	2,00
5	1,95	1,90	1,88	2,12	2,10	2,08	2,10	2,05	2,03

Os índices de confiabilidade β obtidos são inferiores ao alvo de 2,5 (LRFD) em todos os casos analisados, e conseqüentemente bem abaixo do alvo de 3,0 (LSD) sugerindo que o coeficiente de ponderação (γ) poderia ser superior ao valor especificado pela NBR 14762:2010. Para que o índice de confiabilidade β atinja o alvo de 2,5, é necessário um coeficiente γ de pelo menos 1,5.

4. CONCLUSÕES

O objetivo desse estudo é avaliar a confiabilidade de elementos estruturais de aço formado a frio submetidos a força cortante, seguindo os critérios propostos por Pham e Hancock (2009 a e 2009 b). Das análises foram obtidos as seguintes conclusões:

- Todos os valores de β encontrados foram abaixo do alvo 2,5. Isso mostra que seria mais indicado usar um coeficiente γ maior que o especificado pela NBR 14762:2010;
- Quando os perfis foram separados, os valores de β encontrados foram bem próximos. Isso indica que o fato da norma brasileira ignorar o efeito dos enrijecedores transversais não é tão prejudicial à segurança desses casos;
- Quando comparados os valores de V_{Rk} para os casos dos perfis C15015 e SC15015, C15024 e SC15024, C20015 e SC20015 e C20024 e SC20024, temos que os perfis SupaCee® apresentam maior resistência que os seus correspondentes para o perfil U enrijecido. Isso mostra que os enrijecedores longitudinais contribuem para a resistência do perfil quanto à força cortante;
- Os valores de β para o método FORM estavam mais próximos das simulações de Monte Carlo que para o método FOSM, mostrando o método FORM apresenta boa precisão.



5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 14762 (2010), Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- AISI S100 (2016), Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members. American Iron and Steel Institute. Washington, D. C.
- Cornell, C.A., (1969). A probability based structural code. *ACI Journal*, vol. 66, 12, p. 974-985.
- 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.
- Haldar, A., Mahadevan, S., (2000). *Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design*. John Wiley & Sons, Inc. NY. EUA.
- 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.
- Hsiao, L.E., 1989. Reliability Based Criteria for Cold-Formed Steel Members. Ph.D. Thesis, University of Missouri-Rolla.
- Keerthan, P., Mahendran, M., (2015). Experimental investigation and design of lipped channel beams in shear. *Thin-Walled Structures* 86, 174–184.
- Melchers, R.E.; Beck, A.T. (2018). *Structural Reliability Analysis and Prediction*, p.506, 3ª Ed., Hoboken: John Wiley and Sons.
- Pham, C.H., Hancock, G.J., (2009 a). Experimental Investigation of High Strength Cold-Formed C-Section in Combined Bending and Shear, research report N° R894 University of Sydney.
- Pham, C.H., Hancock, G.J., (2009 b). Experimental Investigation of High Strength Cold-Formed SupaCee® Sections in Combined Bending and Shear, research report N° R907 University of Sydney.
- Rackwitz, R.E e Fiessler, B. (1978). Structural reliability under combined random load sequences. *Computer and Structures*, v. 9, p. 489-494.
- Yu, W.-W., LaBoube, R.A., Chen, H. (2020). *Cold-Formed Steel Design*, Wiley, fifth edition, pg 1-35.