

## Avaliação da segurança de vigas de alma senoidal sujeitas à flambagem lateral com torção - Parte 1: requisitos básicos

(Safety assessment of sinusoidal-web girders under lateral-torsional buckling - Part 1: basic requirements)

Roberval José Pimenta

*Doutorando, Curso de Pós-Graduação em Eng. de Estruturas - UFMG. E-mail: roberval@codeparsa.com.br*

Lourdiane Gontijo das Mercês Gonzaga

*Doutoranda, Curso de Pós-Graduação em Eng. de Estruturas - UFMG. E-mail: lourdianegonzaga@hotmail.com.br*

Gílson Queiroz

*Prof. Dr., Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas - UFMG. E-mail: gilson@dees.ufmg.br*

Sofia Maria Carrato Diniz

*Profa. Dra., Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas - UFMG. E-mail: sofia@dees.ufmg.br*

### Resumo

Ainda não existem normas de projeto de estruturas com perfil de alma corrugada que tratem de todos os fenômenos envolvidos em seu comportamento estrutural. É necessário, portanto, desenvolver recomendações que possam representar, adequadamente, seu comportamento sob os diversos modos de falha, a partir dos conceitos e métodos da Teoria da Confiabilidade. Nesse estudo, é abordada a avaliação da segurança de vigas de alma senoidal para o modo de falha de flambagem lateral com torção (FLT). Para isso, nessa primeira parte, são apresentados os seguintes requisitos básicos: (i) proposição e validação do modelo de cálculo; (ii) estatísticas das variáveis básicas. O modelo de cálculo proposto é baseado numa adaptação das normas ANSI/AISC 360-05 (2005) e ABNT NBR 8800 (2008), em que se despreza a alma senoidal no cálculo das propriedades geométricas. As estatísticas das variáveis básicas foram obtidas da literatura e de medições das dimensões reais dos perfis de alma senoidal fabricados no Brasil.

**Palavras-chave:** Flambagem lateral com torção, vigas de aço, alma senoidal, segurança, confiabilidade.

### Abstract

*There are no design standards or specifications dealing with all the phenomena involved in the structural behavior of corrugated-web beams. The development of recommendations that might express their behavior more properly, within the concepts and methods of the Theory of Reliability is therefore necessary. In this research, the safety assessment of sinusoidal-web beams for the lateral-torsioned buckling failure mode is performed. To this end, in this first part, the following basic requirements are presented: (i) proposal and validation of the calculation model; (ii) statistics of basic variables. The proposed model is based on an adaptation of the standards ANSI/AISC 360-05 (2005) and ABNT NBR 8800 (2008), in which the corrugated web is neglected on the computation of geometric properties. The statistics of basic variables were obtained from literature and measurements of the actual dimensions of sinusoidal-web shapes manufactured in Brazil.*

**Keywords:** Lateral torsioned buckling, steel beams, sinusoidal-web, safety, reliability.

## 1. Introdução

Ainda não existem normas de projeto para perfis de alma corrugada que tratem de todos os fenômenos envolvidos em seu comportamento estrutural, em especial a flambagem lateral com torção (FLT). Para determinação do momento resistente relativo a esse estado-limite, procedimentos simplificados foram propostos na DAST-Ri 015 (1990). Esses procedimentos mostraram-se, entretanto, excessivamente conservadores na faixa de baixa e média esbeltez e contra a segurança na região de grande esbeltez (Fakury et al., 2005).

É necessário, portanto, desenvolver recomendações que possam representar, de maneira adequada, o comportamento de vigas de alma corrugada sob os diversos modos de falha, a partir dos conceitos e métodos da Teoria da Confiabilidade. Nesse estudo, é abordada a avaliação da segurança de vigas de alma com corrugação senoidal para o modo de falha de flambagem lateral com torção. O objetivo dessa primeira parte da pesquisa é apresentar os seguintes requisitos necessários para a avaliação da confiabilidade: proposição e validação do modelo de cálculo, que represente adequadamente a resposta da estrutura e descrição estatística das variáveis básicas pertinentes. Na segunda parte desta pesquisa (Pimenta et al., 2009) são calculados os índices de confiabilidade pelo método de confiabilidade de primeira ordem (FORM), utilizando as informações apresentadas nesse trabalho.

## 2. Proposição do modelo de cálculo

Nesse trabalho, um modelo de cálculo é proposto para o projeto de vigas de alma senoidal sob o estado-limite de FLT com base numa adaptação das premissas das normas estadunidense ANSI/AISC 360-05 (2005) e brasileira ABNT NBR 8800 (2008) para perfis de alma plana - ressalta-se que ambas as normas fornecem, basicamente, os mesmos resultados. Esse método de cálculo foi devidamente comprovado por centenas de

ensaios experimentais e demonstrou ser capaz de prever com precisão razoável o comportamento de vigas de alma plana no estado-limite de FLT [Galambos, 1983; Yura et al., 1978].

O modelo proposto foi formulado com base nas seguintes considerações:

- Eliminação da alma senoidal no cálculo de propriedades da seção.
- Uso de tensão residual de  $0,3f_y$  com base nas normas mencionadas.

Para verificar a viabilidade dessa proposição, foi realizada uma extensa análise paramétrica, utilizando um modelo de elementos finitos desenvolvido em estudos anteriores, devidamente validado por análise experimental (Queiroz et al., 2007). O modelo de cálculo das normas brasileira e estadunidense, entretanto, não leva, diretamente em conta, o efeito das imperfeições geométricas iniciais em sua formulação. Foi necessário que se procedesse a uma avaliação prévia do valor da imperfeição a ser utilizado na análise numérica. O modelo numérico foi, então, aplicado, inicialmente, a vigas de alma plana. Foram considerados três

valores de imperfeição inicial:  $L/1000$ ,  $L/3000$  e  $L/10000$ . Cada valor de imperfeição foi associado ao máximo deslocamento lateral do primeiro modo de flambagem obtido de análises prévias de autovalor, um procedimento conservador, que conduz ao menor valor de resistência última. Foram adotadas tensões residuais de compressão de 70 MPa, nas bordas das mesas [padrão de Lehigh, típico de perfis laminados e conservador para perfis soldados com chapas de bordas cortadas a maçarico, principalmente no caso de alma senoidal (ver item 3.4)]. Foram realizadas 294 simulações numéricas (para cada valor de imperfeição) com 31 diferentes tipos de perfis de alma plana, com índices de esbeltez  $\lambda = l/r_y$  variando de 29 a 134, buscando cobrir a maior parte do espectro utilizado na prática.

Os resultados obtidos foram, então, comparados com as previsões das normas brasileira e estadunidense. Com base em análise estatística, concluiu-se que o uso da imperfeição geométrica inicial de  $L/10000$  fornece a melhor correlação com as formulações das normas (Figura 1).

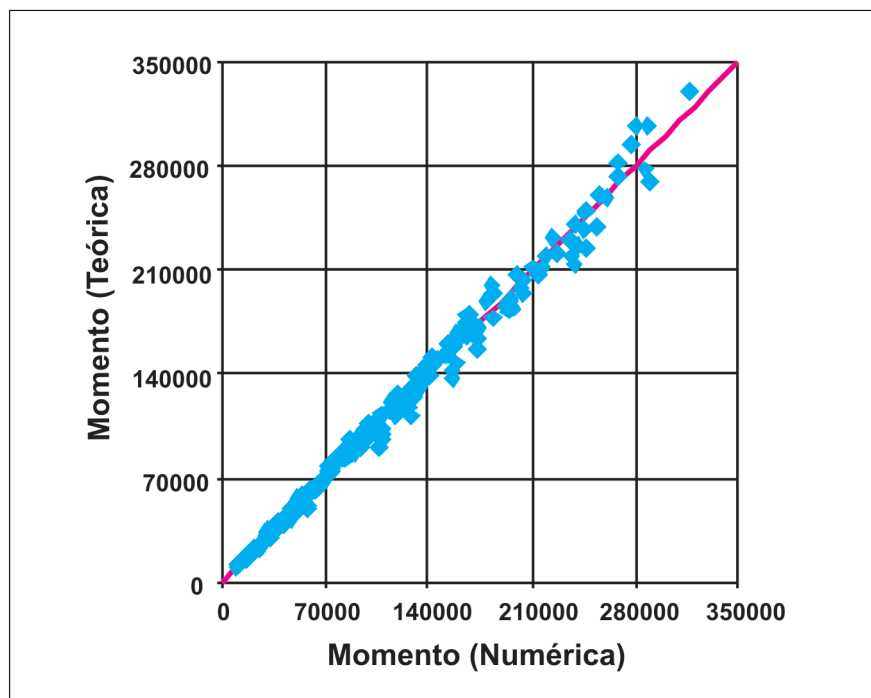


Figura 1 - Relação entre resultados das análises teórica e numérica dos perfis de alma plana ( $L/10000$ ).

Face ao exposto e principalmente devido ao conservadorismo implícito no modelo numérico, o valor da imperfeição geométrica inicial de  $L/10000$  foi utilizado, também, na análise paramétrica com perfis de alma senoidal. A título de informação, as medidas da imperfeição geométrica inicial dos perfis de alma senoidal não ficaram distantes desse valor, com média de, aproximadamente,  $1/3400$  (Pimenta, 2008). Foram processados 593 casos com 45 diferentes seções de vigas de alma senoidal, considerando-se a mesma tensão residual utilizada nas análises dos perfis de alma plana e índices de esbelteza  $\lambda$  variando de 25 a 130.

Nas Figuras 2 e 3, apresentam-se os resultados obtidos. Na Figura 2, são fornecidos os resultados da análise teórica em função da numérica e, na Figura 3, são dados os valores da relação entre os momentos obtidos pelas análises numérica e teórica ( $M_{num}/M_{teo}$ ) em função da relação entre os índices de esbelteza ( $\lambda/\lambda_p$ ).

Como pode ser observado, obteve-se excelente correlação entre os resultados das análises teórica e numérica, similar à dos perfis de alma plana (comparem-se as Figuras 1 e 2), mas com dispersão um pouco menor. O modelo proposto, portanto, será utilizado para representar a resistência de vigas com perfil de alma senoidal, sujeitas à flambagem lateral com torção.

### 3. Descrição estatística das variáveis aleatórias envolvidas

#### 3.1 Resistência ao escoamento

Um estudo buscando caracterizar os parâmetros básicos da resistência ao escoamento do aço USICIVIL 350 ( $f_y = 350$  MPa), assim como sua distribuição, foi realizado utilizando os resultados de ensaios conforme ASTM A 307, fornecidos junto com os certificados da usina no período de 2004 a 2007. Foram escolhidos, aleatoriamente, 332 ensaios, correspondentes às espessuras utilizadas nas mesas dos perfis de alma senoi-

dal - de 6,3 mm a 19,0 mm - cujas distribuição de frequência e função densidade de probabilidade (PDF) podem ser vistas na Figura 4.

Foram calculados a média ( $\mu$ ) e o desvio-padrão ( $\sigma$ ) dessas amostras, cujos valores são, respectivamente, 409 MPa e 26,5 MPa. O coeficiente de tendência (*bias coefficient*) é, portanto,  $\delta = \mu/f_y = 1,17$  e o coeficiente de variação (COV ou V) é igual a 0,065. Esses valores referem-se à

resistência ao escoamento estática, obtidos pela equação de ajuste proposta nos Memorandos Técnicos 7 e 8 do Structural Stability Research Council - SSRC (Galambos, 1998), considerando-se, a favor da segurança, que os ensaios foram realizados com a maior taxa de deformação permitida pela norma, ou seja, 1042 microdeformações por segundo, o que significa que os valores dos ensaios foram reduzidos em 29 MPa.

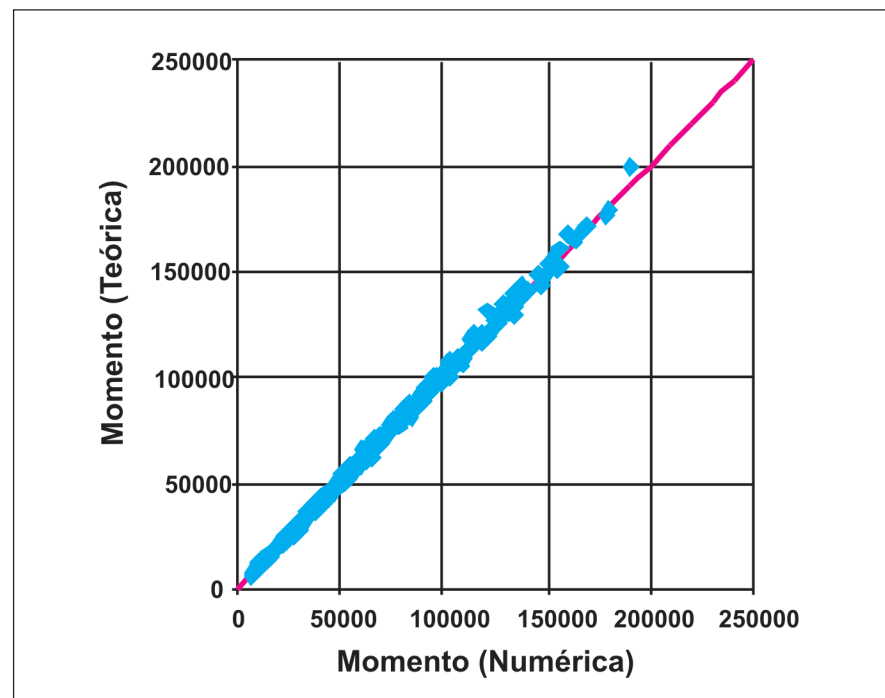


Figura 2 - Relação entre resultados das análises teórica e numérica dos perfis de alma senoidal ( $L/10000$ ).

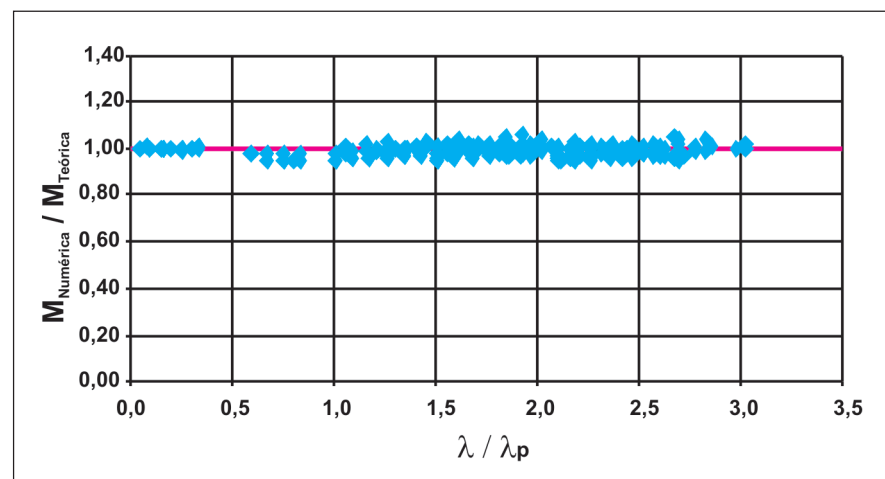


Figura 3 - Relação entre os resultados das análises teórica e numérica em função do índice de esbelteza.

Foram feitos testes de *Kolmogorov-Smirnov* para prova de aderência, cujos resultados, para um nível de significância de 5%, mostraram que, tanto a distribuição normal, como a lognormal são aceitáveis, embora a lognormal seja melhor. Nesse trabalho, será considerado, portanto, que a resistência ao escoamento possui distribuição lognormal.

### 3.2 Módulo de elasticidade

Schmidt e Bartlett (2002) assumem o módulo de elasticidade como uma variável aleatória com valor nominal ( $E_n$ ) de 200 GPa, média de 1,038 vezes o valor nominal ( $\delta=1,038$ ) e COV de 0,026, tendo como base, os ensaios realizados no Canadá em 1990 por Chernenko e Kennedy (1991).

Nesse trabalho, adotar-se-ão os coeficientes sugeridos por Schmidt e Bartlett (2002), com os quais se chega aos valores de 207,6 GPa, para a média, e de 5,4 GPa, para o desvio-padrão. De acordo com Halder e Mahadevan (2000), com base na análise estatística do estudo da determinação do módulo de elasticidade do aço utilizado na ponte Golden Gate, tanto a distribuição normal, quanto a lognormal podem ser utilizadas de forma satisfatória para modelar a frequência de distribuição de probabilidades de  $E$ , sendo que a distribuição lognormal é melhor e será adotada nesse trabalho.

### 3.3 Propriedades geométricas

Para verificar a variabilidade das propriedades geométricas dos perfis senoidais fabricados no Brasil, encontra-se, em curso, um programa de medições das dimensões reais desses perfis e de suas imperfeições geométricas iniciais. Numa análise preliminar dos resultados, calcularam-se os coeficientes de tendência e de variação do módulo plástico  $Z$ , tendo sido encontrados os valores de 1,03 e 0,018, respectivamente. Nesse trabalho, por simplicidade de análise, definiu-se uma nova variável geométrica  $K$ , a ser utilizada na região de comporta-

mento elástico das vigas, que é representada pela seguinte expressão:

$$K = \frac{\pi^2 I_y}{l^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left( 1 + 0,039 \frac{J l^2}{C_w} \right)} \quad (1)$$

onde  $I_y$  e  $C_w$  são, respectivamente, o momento de inércia em torno do eixo que passa pela alma e a constante de empenamento,  $J$  é a constante de torção e  $l$  é o comprimento da viga.

Estudos demonstraram (Pimenta, 2008) que os coeficientes de tendência e de variação de  $K$  são, praticamente, independentes do comprimento  $l$  da viga, tendo sido encontrados, na região de comportamento elástico da viga, os valores de 1,04 e 0,026, respectivamente. Para ambas as variáveis, foram realizados testes de *Kolmogorov-Smirnov* para

prova de aderência, que demonstraram que a distribuição normal pode ser adotada - ver Figura 5 - para o módulo plástico  $Z$  (normalizado pelo valor nominal).

### 3.4 Tensões residuais

Segundo Chernenko e Kennedy (1991), com base na revisão dos trabalhos de diversos pesquisadores, o coeficiente de variação das tensões residuais de perfis formados por chapas cortadas a maçarico pode ser tomado, aproximadamente, igual a 0,30. A norma canadense CAN-CSA-S16-1 (2003), baseada no padrão mais favorável de tensões residuais de pilares *WWF* - perfis soldados com chapa cortada a maçarico -, classificou-os em uma curva de flambagem mais resistente que a dos perfis laminados, seguindo as recomendações de

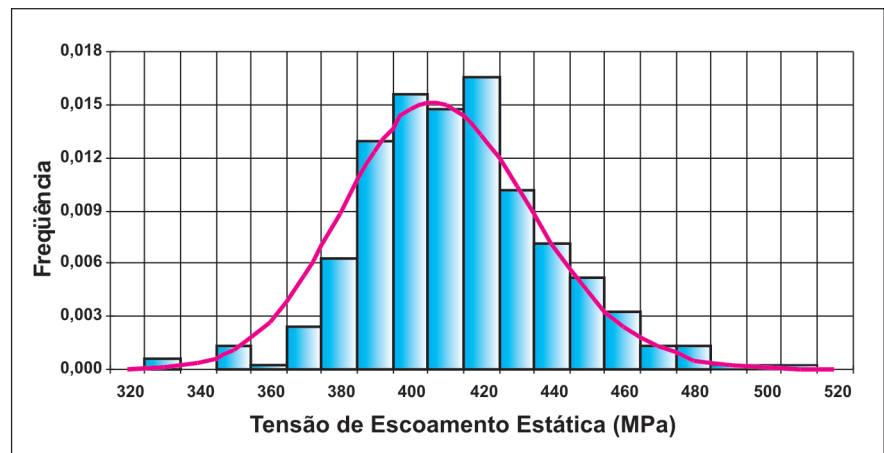


Figura 4 - Distribuição de frequência e PDF da resistência ao escoamento.

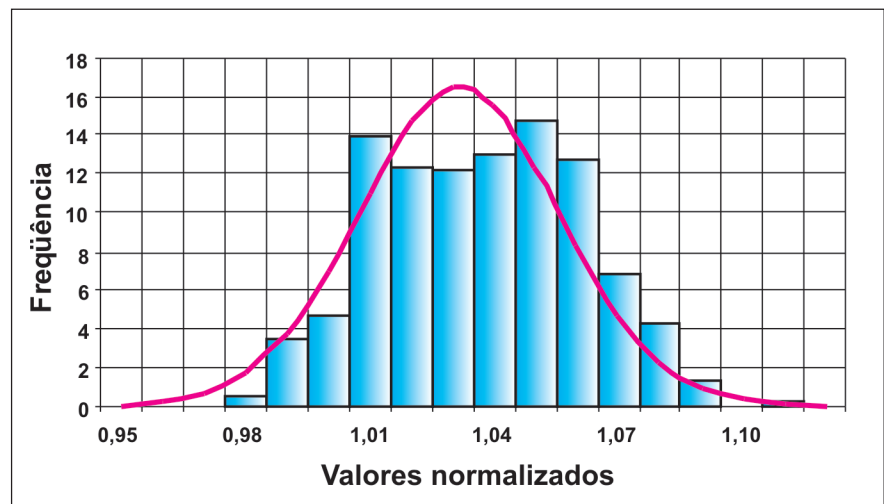


Figura 5 - Distribuição de frequência e PDF do módulo plástico  $Z$ .

Chernenko e Kennedy (1991). Isso demonstra que a consideração de tensões residuais em perfis soldados de alma plana com chapas cortadas a maçarico e, principalmente, em perfis senoidais (Pimenta, 2008), seguindo a distribuição e magnitude de tensões residuais de perfis laminados, é um procedimento conservador.

Em função da comparação com os resultados dos perfis de alma plana, a tensão residual, considerada nas análises numéricas, foi tomada com distribuição semelhante ao padrão de Lehigh, com valor máximo de compressão igual a 70 MPa nas bordas das mesas. Vale lembrar que, nas formulações das normas americana e brasileira, o valor nominal da tensão residual de compressão é tomado igual a  $0,3f_y$ . Nesse trabalho, com base nas pesquisas de Bjorhovde (1972) e Chernenko e Kennedy (1991), a tensão residual será considerada como uma variável aleatória com distribuição normal e com valores dos coeficientes de tendência e de variação iguais a 1,0 e 0,30, respectivamente.

### 3.5 Coeficiente profissional

O coeficiente profissional  $P$  é a relação entre o valor da resistência medida ou ensaiada e a prevista pelas equações de projeto, dadas nas normas ou especificações. Essa relação possui características estocásticas e pode ser considerada uma variável aleatória que caracteriza a variabilidade da resistência da barra, oriunda das incertezas do modelo de cálculo adotado. Nesse trabalho, o coeficiente profissional será tomado como a relação entre o resultado da análise numérica, considerado como a resistência real da barra, e as equações de cálculo do momento resistente dos procedimentos da ABNT NBR 8800 (2008) e da ANSI/AISC 360-05 (2006), apresentados no item 2, adaptados aos perfis de alma senoidal - ver as normas para detalhes.

A média e o desvio-padrão do coeficiente profissional de cada região de comportamento da viga foram calculados e apresentados, respectivamente, os

seguintes valores: 0,99 e 0,021, para a região plástica, 0,98 e 0,021, para a região inelástica e, finalmente, 0,98 e 0,022, para a fase elástica. A distribuição de frequência de  $P$  da fase inelástica pode ser apreciada na Figura 6.

Foram realizados testes de *Kolmogorov-Smirnov* para prova de aderência, que demonstraram que a distribuição normal é uma boa representação para nível de significância de 5%. A título de ilustração, os coeficientes de tendência e de variação dos perfis de alma plana foram 0,99 e 0,048, respectivamente.

### 3.6 Ações

Nesse trabalho, serão tratadas apenas as ações de gravidade - ação permanente (*dead load D*) e ação variável (acidental, *live load L*) - de acordo com as prescrições do ASCE 7-05 (2006). As ações permanentes podem ser consideradas com distribuição normal com média  $1,05D_n$  e COV de 0,10 (Ellingwood et al., 1982; Galambos et al., 1982), onde  $D_n$  é a ação permanente nominal. Os estudos estatísticos das ações variáveis acidentais, devidas à ocupação de edificações, indicam que uma distribuição de extremos tipo I (*Gumbel*) possui uma excelente correlação com os dados coletados, segundo Ellingwood e Culver, apud Bartlett et al. (2003).

Nesse trabalho, serão considerados os seguintes valores:  $\mu_L/L_n = 1,0$  e  $V = 0,25$ , para a carga acidental (distribuição de *Gumbel*), e  $\mu_D/D_n = 1,05$  e  $V = 0,10$ , para a ação permanente (distribuição normal). Tais valores foram aqueles que deram origem à norma ASCE-7, e que foram utilizados por Ellingwood et al. (1982) sendo, também, utilizados na calibração da primeira versão LRFD do AISC. Será considerada, além da combinação básica para ações de gravidade da ASCE-7, também a combinação, simplificada, de acordo com a ABNT NBR 8800 (2008):  $1,35D + 1,5L$ .

## 4. Conclusões

Foi proposto um modelo de cálculo para determinação da resistência de vigas com alma senoidal à FLT, tendo como base uma adaptação das prescrições da ABNT NBR 8800 (2008) e da ANSI/AISC 360-05 (2005). Apesar da complexidade dos fenômenos envolvidos, demonstrou-se que as prescrições dessas normas podem ser aplicáveis a perfis usuais de alma senoidal, desprezando-se a alma no cálculo das propriedades geométricas. Descreveram-se, ainda, os parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias básicas envolvidas na formulação proposta e foram apresentados seus coeficientes de tendência e de variação, assim como as distribuições de frequência

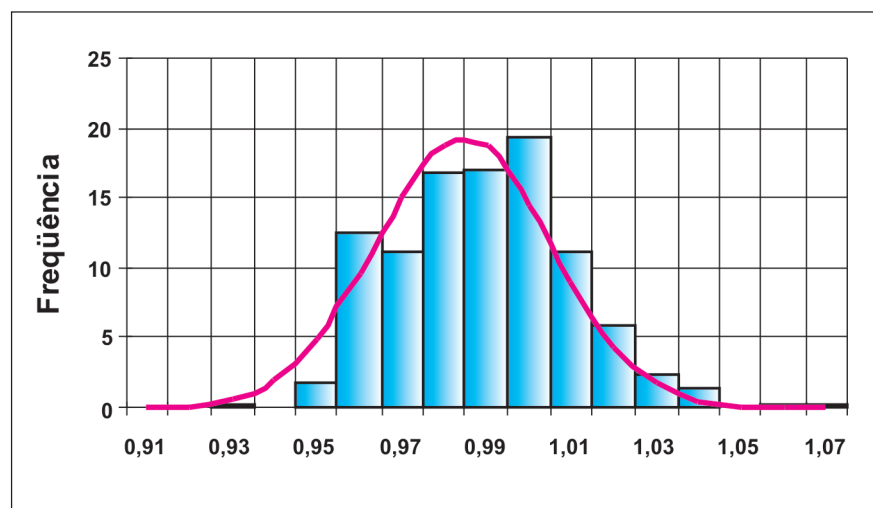


Figura 6 - Distribuição de frequência e PDF do coeficiente profissional  $P$  (fase inelástica).

e funções densidade de probabilidade (PDF), com base em dados obtidos da literatura e de um programa de medições das dimensões reais dos perfis de alma senoidal produzidos nos Brasil. Com essas informações, utilizando-se as ferramentas da Confiabilidade Estrutural, é possível determinar a segurança inerente a esses perfis, projetados segundo o modelo de cálculo proposto - ver Parte 2 dessa pesquisa.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG e à CODEME Engenharia pelo suporte dado a essa pesquisa.

## 6. Referências bibliográficas

- ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Agosto de 2008.
- ANSI/AISC 360-05 - American National Standard ANSI/AISC 360-05. *Specification for Structural Steel Building*. Chicago, Illinois: AISC, 2005.
- ASCE 7-05 – ASCE Standard ASCE/SEI 7-05. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structure*. USA: American Society of Civil Engineers, 2006.
- BARTLETT, F.M., DEXTER, R.J., GRAESER, M.D., JELINEK, J.J., SCHMIDT, B.J., GALAMBOS, T.V. Updating standard shape material properties database for design and reliability. USA, *Engineering Journal, AISC, First Quarter*, 2003.
- BJORHOVDE, R. *Deterministic and Probabilistic Approaches to the Strength of Steel Columns*. USA: Lehigh University, 1972. (PhD. Dissertation).
- CAN-CSA-S16-1. Canadá, *Limit States Design of Steel Structures*. Ontario: The Canadian Standards Association, 2003.
- CHERNENKO, D.E., KENNEDY, D.J.L. An analysis of the performance of welded wide flange columns. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.18, p.537-555, 1991.
- DAST-RI 015. *Deutscher Ausschuss für Stahlbau: DASt-Richtlinie 015 - Träger mit schlanken Stegen*. Colônia: Stahlbau-Verlagsgesellschaft, 1990.
- ELLINGWOOD, B., MACGREGOR, J.G., GALAMBOS, T.V., CORNELL, C.A. Probability-based load criteria: load factors and load combinations. USA, *Journal of the Structural Division, ASCE*, v. 108, n. ST5, 1982.
- FAKURY, R.H., HACKBARTH JÚNIOR, H., CALENZANI, A.F.G., QUEIROZ, G., PIMENTA, R.J. *Determinação do momento-fletor resistente de vigas de aço de alma senoidal à flambagem lateral com torção*. In: CONGRESSO IBEROLATINOAMERICANO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL - CILAMCE, 26. Guarapari, Brasil, 2005
- GALAMBOS, T.V., ELLINGWOOD, B., MACGREGOR, J.G., CORNELL, C.A. Probability-based load criteria: assessment of current design practice. USA, *Journal of the Structural Division, ASCE*, v. 108, n. ST5, 1982.
- GALAMBOS, T.V. *A world view of beam stability and design practice*. USA, Proceedings of SSRC Annual Meeting, 1983.
- GALAMBOS, T.V. *Guide to stability design criteria for metal structures*. (5 ed.). USA: John Wiley & Sons, 1998.
- HALDAR, A., MAHADEVAN, S. *Probability, reliability and statistical methods in engineering design*. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- PIMENTA, R.J. *Perfis de alma senoidal: proposição de métodos de cálculo e análise da confiabilidade estrutural*. Belo Horizonte: DEES-EE-UFGM, 2008. (Tese de Doutorado).
- PIMENTA, R.J., GONZAGA, L.G.M., QUEIROZ, G., DINIZ, S.M.C. Avaliação da segurança de vigas de alma senoidal sujeitas à flambagem lateral com torção, Parte 2: análise de confiabilidade. Ouro Preto, *REM - Revista Escola de Minas*, 2009.
- QUEIROZ G., GONZAGA L. G. M., PIMENTA R. J., FAKURY R. H., RODRIGUES, F. C. Flambagem lateral com torção em vigas com perfis de alma senoidal. Ouro Preto, *REM - Revista Escola de Minas*, v. 60, n. 2, p. 333-340, 2007.
- SCHMIDT, B.J., BARTLETT, F.M. Review of resistance factor for steel: data collection. Canadá, *Canadian Journal of Civil Engineers*, v. 29, 2002.
- YURA, J.A., GALAMBOS, T.V., RAVINDRA, M.K. The bending resistance of steel beams. USA, *Journal of the Structural Division, ASCE*, v. 104, n. ST9, 1978.

Artigo recebido em 28/03/2008 e aprovado em 10/02/2009.

**A REM tem novo endereço:**  
**FUNDAÇÃO GORCEIX - REM**  
**Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57**  
**Bairro: Vila Itacolomy**  
**35400-000 - Ouro Preto - MG**  
**www.rem.com.br**