

## Confiabilidade de vigas metálicas dimensionadas pela norma brasileira NBR 8800

(Reliability of steel beams designed by Brazilian code NBR 8800)

Marcílio Sousa da Rocha Freitas

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. LAMEC/DECIV/Escola de Minas/UFOP*  
E-mail: marcilio@em.ufop.br

Aparecida Mucci Castanheira

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. LAMEC/DECIV/Escola de Minas/UFOP*  
E-mail: cmuccic@yahoo.com.br

Arlene Maria Sarmanho Freitas

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. LAMEC/DECIV/Escola de Minas/UFOP*  
E-mail: arlene@em.ufop.br

### Resumo

O estudo da confiabilidade estrutural se relaciona com a avaliação da probabilidade de violação dos *estados limites* para um sistema estrutural. Uma vez definidos pelo projetista os *estados limites* relevantes ao sistema estrutural, deve-se calcular o nível de segurança com respeito a esses estados. Nesse trabalho, é feito um estudo do nível de confiabilidade de vigas de perfis I laminados para o *estado limite* de flexão, projetadas segundo a Norma Brasileira NBR 8800 (1986) e seu projeto de revisão NBR 8800 (2003) através do método de confiabilidade de primeira ordem (FORM). São apresentados gráficos das variações do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) em função do índice de esbeltez  $e$ , e, em seguida, é apresentada uma metodologia para uniformizar a confiabilidade, no domínio de um *estado limite*, através da adoção de procedimentos de correção do coeficiente de resistência.

**Palavras-chave:** Vigas de aço, confiabilidade estrutural, FORM.

### Abstract

*The study of structural reliability is related to the assessment the probability of limit state violations in a structural system. Once the designer defines the relevant limits of the structural system, the safety level of these limits must be evaluated. A reliability study of hot-rolled I beams in a flexure limited state, designed in accordance with Brazilian Code NBR 8800 (1986) and draft of new NBR 8800 (2003) was done by the First Order Reliability Method (FORM). Variations of the reliability index ( $\beta$ ) versus slenderness are plotted, and finally a methodology to obtain uniform reliability in a limited-state domain by adopting correction procedures for the strength factor is presented.*

**Keywords:** Steel beams, structural reliability, FORM.

## 1. Introdução

A finalidade preliminar das normas de projeto estrutural é controlar e padronizar o risco em níveis aceitáveis pela sociedade. O método de dimensionamento que predominou na maior parte do século XX foi o *Método das tensões admissíveis*. No sentido de minorar as objeções relativas ao *método das tensões admissíveis*, foi desenvolvido o *método dos estados limites*. Um *estado limite* é uma condição onde a estrutura ou elemento estrutural torna-se inadequado para desempenhar a função proposta. Isto significa que os esforços e deformações devem ser inferiores a certos *valores limites*, que dependem do material usado e do tipo de estrutura adotada. Distinguem-se dois tipos de estados limites nesse método: *estado limite último* e *estado limite de utilização*.

O método dos *estados limites*, em contraste ao método das tensões admissíveis, requer uma análise cuidadosa sobre como melhor lidar com os possíveis modos do comportamento estrutural (resposta linear elástica versus não-linear), técnicas de análise (primeira ordem versus segunda ordem) e limites de desempenho (utilização, início da não-linearidade estrutural, início da instabilidade do sistema).

Um formato usualmente utilizado de critério de cálculo em *estados limites* é:

$$\phi R_n \geq \sum_{i=1}^j \gamma_i Q_{ni} \quad (1)$$

O lado esquerdo da equação refere-se à resistência (capacidade) da estrutura, enquanto o lado direito caracteriza a ação do carregamento. O lado da resistência do critério de cálculo consiste no produto  $\phi R_n$ , no qual  $R_n$  é a “resistência nominal” e  $\phi$  é o “coeficiente de resistência”. O lado do carregamento do critério de cálculo expresso pela equação 1 é a soma de produtos  $\gamma Q_n$ , no qual  $Q_n$  é a “ação da carga nominal” e  $\gamma$  é o “coeficiente de ponderação das ações” correspondente.

O critério de projeto utilizado nas normas é selecionar um conjunto de coeficientes de majoração das ações para serem aplicados em todas as situações de cálculo. No entanto, é interessante, sempre que possível, examinar como os coeficientes de majoração das ações e de resistência variam para diferentes *estados limites* e combinações de ações.

Os coeficientes de ponderação das ações foram desenvolvidos por calibração, utilizando métodos de confiabilidade (Ellingwood et al., 1982). Foram adotados casos-padrão de estruturas determinadas estaticamente, calculadas pelas especificações estruturais da época para diversos materiais como aço, concreto armado e protendido, madeira, alumínio e alvenaria, buscando um resultado final com aproximadamente a mesma confiabilidade. Os coeficientes foram determinados para um tempo de vida útil de 50 anos.

Esse trabalho apresenta os resultados de uma avaliação do nível de confiabilidade de vigas de perfis laminados para o *estado limite* último de flexão, projetadas segundo a norma NBR 8800 (1986) e seu projeto de revisão NBR 8000 (2003), que são mais detalhados em Castanheira (2004). Serão apresentados gráficos das variações do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) em função do índice de esbeltez de vigas metálicas em perfis laminados de abas paralelas (AÇOMINAS, 2003). Trabalhos semelhantes a esse, tratando da determinação do índice de confiabilidade  $\hat{\alpha}$  e da influência de diversos parâmetros físicos e geométricos em vigas, têm sido realizados, tanto para concreto armado (Machado et al., 2000, 2001) quanto para vigas metálicas (Santos, 2000).

## 2. Estado limite de flexão em vigas metálicas segundo a NBR 8800

Assumidas as hipóteses da resistência dos materiais, as barras sujeitas à flexão simples têm distribuição linear de

tensões normais, que variam de um máximo de tração, em uma das faces da viga, a um máximo de compressão na face oposta.

$M_c$  é um valor de momento-fletor que causa nas faces da viga essa distribuição de tensão com  $f_{\max} < f_y$ , sendo  $f_y$  a tensão de escoamento do material, ver Figura 1(a). Se esse momento é aumentado, as tensões máximas atingem, num determinado instante, o valor  $f_y$  da tensão de escoamento. O valor desse momento, que marca o início do escoamento, é representado por  $M_r$ , ver Figura 1(b). Se o momento continuar sendo aumentado, atinge um certo valor  $M_p$ , que provoca, na seção transversal, o diagrama de tensões indicado na Figura 1(c), que se caracteriza pelo escoamento (ou plastificação) de parte da seção. Continuando aumentando o valor do momento, será atingida a plastificação total da seção, [Figura 1(d)]. O valor do momento correspondente a esta situação é o momento de plastificação da seção,  $M_{pl}$ .

A resistência à flexão simples  $M_n$  é definida por vários *estados limites*, cada um deles em função de um parâmetro de esbeltez  $\lambda$ . A variação de resistência, ilustrada na Figura 1, pode ser genericamente resumida por meio do gráfico da Figura 2, válido para vigas não esbeltas, no qual:

1. Trecho  $\lambda > \lambda_r$  (onde  $M_n < M_r$ ) corresponde aos valores de  $M$  que causam tensões máximas inferiores ao escoamento. Define o trecho da curva em que ocorre flambagem elástica.
2. Ponto  $\lambda = \lambda_r$  (onde  $M_n < M_r$ ) corresponde ao início do escoamento.
3. Trecho  $\lambda_p > \lambda > \lambda_r$  (onde  $M_r < M_n < M_{pl}$ ) corresponde aos valores de  $M$  equivalentes à plastificação parcial da seção. Define o trecho da curva em que ocorre flambagem inelástica.
4. Finalmente, o trecho  $\lambda > \lambda_p$  (onde  $M_n = M_{pl}$ ) corresponde aos valores de  $M$  equivalentes à plastificação total da seção.

Para perfis de seção I com dois eixos de simetria no plano médio da alma,

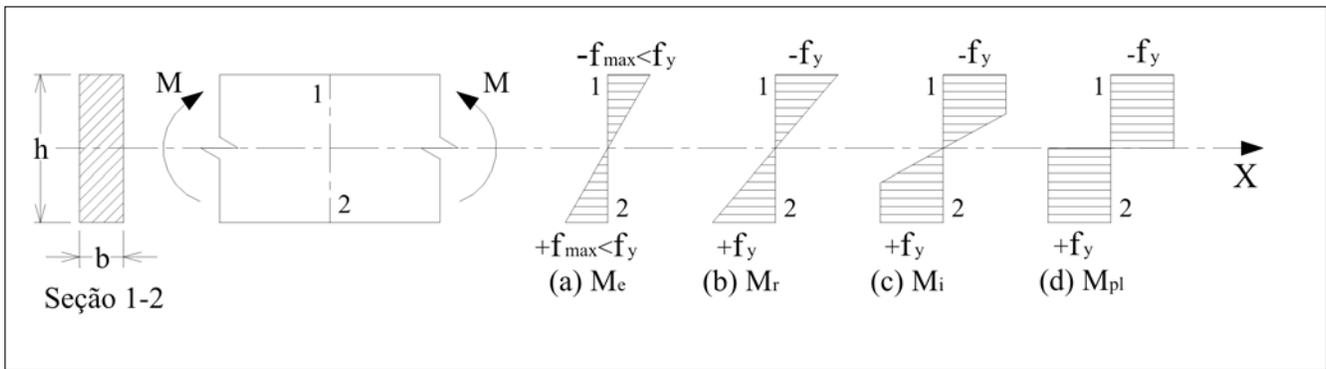


Figura 1 - Distribuição das tensões normais nas barras à flexão simples (Andrade, P. B., 1994).

fletidos em torno do eixo de maior inércia, que foram avaliados nesse trabalho, foram verificados os três *estados limite* seguintes: Flambagem Local da Alma (FLA), Flambagem Local da Mesa (FLM), Flambagem Lateral por Torção (FLT).

Nesse trabalho, foi feita uma análise da variabilidade do índice de confiabilidade para um mesmo *estado limite*. Escolheu-se, para esse estudo, o *estado limite* último na flexão, pois este sendo bastante abrangente, em termos de funções para a determinação da resistência, facilita qualquer analogia dos resultados para outros *estados limite* menos complexos, tal como o *estado limite* de tração.

## 2.1 Cálculo do momento resistente segundo a NBR 8800

Nesse trabalho, serão tratadas apenas as vigas não-esbeltas. Denominam-se vigas não-esbeltas àquelas em que:

$$\frac{h}{t_w} \leq 5,6 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2)$$

sendo sua resistência de cálculo ao momento-fletor dada por:

$$\frac{M_n}{\gamma} \quad (3)$$

onde  $\gamma$  é o coeficiente de ponderação da resistência para flexão, igual a 1,10.

O momento resistente, segundo o anexo D da NBR 8800 (1986), é determi-

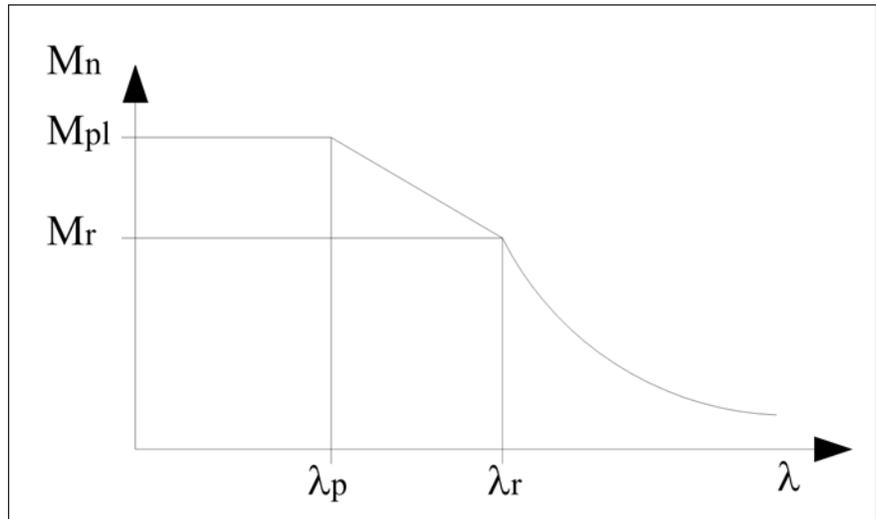


Figura 2 - Variação de  $M_n$  com relação a  $\lambda$  (Andrade, P. B., 1994).

nado em função do tipo de instabilidade que causará a falha do elemento, a saber, FLT, FLM e FLA. Para o cálculo do momento resistente, o elemento pode ser separado em 9 regiões de falhas (ou modos de falha (MF)). Para cada um dos *estados limite* tem-se:

Para FLT:

MF1 - Flambagem plástica ( $\lambda_{(T)} \leq \lambda_{p(T)}$ ):  $M_n = M_{pl}$

MF2 - Flambagem inelástica

$$\lambda_{p(T)} < \lambda_{(T)} \leq \lambda_{r(T)} : M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_{r(T)}) \frac{\lambda_{(T)} - \lambda_{p(T)}}{\lambda_{r(T)} - \lambda_{p(T)}}$$

MF3 - Flambagem elástica ( $\lambda_{(T)} > \lambda_{r(T)}$ ):  $M_n = M_{cr(T)} = M_{el(T)}$

Para FLA:

MF4 - Flambagem plástica ( $\lambda_{(A)} \leq \lambda_{p(A)}$ ):  $M_n = M_{pl}$

MF5 - Flambagem inelástica

$$\lambda_{p(A)} < \lambda_{(A)} \leq \lambda_{r(A)} : M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_{r(A)}) \frac{\lambda_{(A)} - \lambda_{p(A)}}{\lambda_{r(A)} - \lambda_{p(A)}}$$

MF6 - Flambagem elástica ( $\lambda_{(A)} > \lambda_{r(A)}$ ):  $M_n = M_{cr(A)} = M_{el(A)}$

Para FLM:

MF7 - Flambagem plástica ( $\lambda_{(M)} \leq \lambda_{p(M)}$ ):  $M_n = M_{pl}$

MF8 - Flambagem inelástica

$$\lambda_{p(M)} < \lambda_{(M)} \leq \lambda_{r(M)} : M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_{r(M)}) \frac{\lambda_{(M)} - \lambda_{p(M)}}{\lambda_{r(M)} - \lambda_{p(M)}}$$

MF9 - Flambagem elástica ( $\lambda_{(M)} > \lambda_{r(M)}$ ):  $M_n = M_{cr(M)} = M_{el(M)}$

onde  $\lambda_{( )}$ ,  $\lambda_{p( )}$ ,  $\lambda_{r( )}$  são parâmetros de esbeltez definidos pela NBR 8800 (ver Tabela 1) como função do *estado limite*;  $M_{pl}$  é o momento de plastificação;  $M_{r( )}$  e  $M_{cr( )}$  são momentos definidos pela NBR 8800 (ver Tabela 1) como função do *estado limite*. Os subscritos (T), (A) e (M) indicam grandezas associadas à FLT, FLA e FLM, respectivamente. Os modos de falha 6 e 9 são pertinentes a vigas esbeltas, não analisadas nesse trabalho, e o modo de falha 5 não se aplica, a esse caso, conforme o anexo D da NBR 8800 (2003).

Note que para uma dada viga, isto é, definidos o perfil e o espaçamento da contenção lateral, apenas um modo de falha poderá ocorrer para cada *estado limite*. Por exemplo, se FLT ocorrer, a flambagem será plástica ou inelástica ou elástica. O valor do momento resistente é, então, o menor dos três valores calculados para FLT,

FLA e FLM, porém limitado à Equação (4).

$$M_n \leq 1,25W_x f_y \tag{4}$$

onde:

$M_{pl} = f_y Z_x$  (Momento de plastificação total da seção)

$\lambda =$  parâmetro de esbeltez definido para cada caso.

$Z_x =$  Módulo plástico de resistência em relação ao eixo (x), de inércia máxima da seção.

$W_x =$  Módulo elástico de resistência em relação ao eixo (x) da seção.

Para perfis de seção I com dois eixos de simetria no plano médio da alma, fletidos em torno do eixo de maior inércia, têm-se as definições indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros  $M_{r( )}$ ,  $M_{cr( )}$ ,  $\lambda_{( )}$ ,  $\lambda_{p( )}$ ,  $\lambda_{r( )}$  para FLT, FLM, FLA (NBR 8800, 1986, Anexo D).

Estados limites aplicáveis	$M_r$	$M_{cr}$	Parâmetro de esbeltez ( $\lambda$ )	$\lambda_p$	$\lambda_r$
FLT	$(f_y - f_r)W$	$\frac{C_b \beta_1}{\lambda} \sqrt{1 + \frac{\beta_2}{\lambda^2}}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Nota (a)
FLM	$(f_y - f_r)W$	$\frac{0,67E}{\lambda^2} W$	$\frac{b_f}{2t_f}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$0,82 \sqrt{\frac{EW}{M_r}}$
FLA	$f_y W$	-----	$\frac{h}{t_w}$	$3,50 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,6 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Nota (a):

$$\lambda_r = \frac{0,707 C_b \beta_1}{M_r} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{4\beta_2}{C_b^2 \beta_1^2} M_r^2}} \tag{5}$$

onde

$$\beta_1 = \pi \sqrt{GE} \sqrt{I_T A_g} \tag{6}$$

$$\beta_2 = 6,415 \frac{A_g (d - t_f)^2}{I_T} \tag{7}$$

sendo:

$C_b =$  coeficiente de majoração do  $M_{cr}$  definido no item 5.4.5.3 da NBR 8800.

$L_b =$  distância entre contenção lateral.

## 2.2 Cálculo do momento resistente segundo o projeto de revisão da NBR 8800

O momento resistente, segundo o anexo D do texto base de revisão da NBR 8800 (2003), é igualmente determinado em função do tipo de instabilidade que causará a falha do elemento. Para os tipos de seção e eixos de flexão indicados na Tabela 2, para o estado limite FLT, o momento-fletor resistente característico é dado por:

$$M_n = M_{pl}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

$$M_n = C_b \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq M_{pl}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

$$M_n = M_{cr}, \text{ para } \lambda > \lambda_r$$

Para os tipos de seção e eixos de flexão indicados na Tabela 2, para os estados limites FLM e FLA, o momento-fletor resistente característico é dado por:

$$M_n = M_{pl}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

$$M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

$$M_n = M_{cr}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \text{ (não aplicável à FLA)}$$

Em qualquer dos 3 casos apresentados anteriormente a resistência nominal  $M_n$  é limitada pela Equação (8).

$$M_n \leq 1,5W_x f_y \quad (8)$$

Para perfis de seção I com dois eixos de simetria no plano médio da alma, fletidos em torno do eixo de maior inércia, o texto-base de revisão da NBR 8800 adota as definições indicadas na Tabela 2.

## 3. Avaliação da Confiabilidade de vigas metálicas não esbeltas segundo a NBR 8800

Diversos métodos têm sido desenvolvidos para a análise de confiabilidade de estruturas. São usualmente empregados

Tabela 2 - Parâmetros  $M_r(\cdot)$ ,  $M_{cr}(\cdot)$ ,  $\lambda(\cdot)$ ,  $\lambda_p(\cdot)$ ,  $\lambda_r(\cdot)$  para FLT, FLM, FLA (projeto de revisão da NBR 8800, 2003, Anexo D).

Estados limites aplicáveis	$M_r$	$M_{cr}$	Parâmetro de esbeltez ( $\lambda$ )	$\lambda_p$	$\lambda_r$
FLT	$(f_y - f_r)W$	$\frac{C_b \beta_1}{\lambda} \sqrt{1 + \frac{\beta_2}{\lambda^2}}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Nota (a)
FLM	$(f_y - f_r)W$	$\frac{0,69E}{\lambda^2} W$	$\frac{b_f}{2t_f}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - f_r)}}$
FLA	$f_y W$	-----	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \frac{h}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Nota (a):

$$\lambda_r = \frac{0,707\beta_1}{M_r} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{4\beta_2}{\beta_1^2} M_r^2}} \quad (9)$$

onde

$$\beta_1 = \pi \sqrt{GE} \sqrt{I_T A_g} \quad (10)$$

$$\beta_2 = \frac{EC_w}{GI_T} \left( \frac{\Pi}{r_y} \right)^2 \quad (11)$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4}, \text{ para seções I} \quad (12)$$

sendo:

$C_w$  = constante de empenamento da seção transversal.

$C_b$  = fator de modificação para diagrama de momento-fletor não uniforme definido no item 5.4.2.5 e 5.4.2.6 do texto-base de revisão da NBR 8800.

$L_b$  = distância entre contenção lateral.

com eficiência os métodos de primeira e segunda ordem, FORM e SORM. Outras técnicas aplicadas são aquelas baseadas na simulação de Monte Carlo, que são aplicáveis para quase todos os problemas e com o nível de precisão desejável. Nesse trabalho, foi utilizado o método de confiabilidade de primeira ordem (FORM) disponível no programa de análise de confiabilidade estrutural CALREL (1989).

Os perfis são analisados para diversos comprimentos  $L_b$  de modo a abranger todos os modos de falha indicados no *estado limite* de flexão. Nesse trabalho foi adotado o valor  $C_b = 1,0$ . O critério adotado para a escolha dos valores de  $L_b$  foi o mesmo adotado por Santos (2000), que consiste em utilizar, para cada perfil, os valores característicos das variáveis, determinando-se o valor de  $\lambda_r$ , dado pela flambagem lateral por torção, e o raio de giração  $r_y$ . O intervalo de comprimento de análise foi adotado como  $[L_{b(\text{inicial})} : L_{b(\text{final})}]$ , com incremento de  $L_{b(\text{incriem.})}$ , onde:

$$L_{b(\text{inicial})} = L_{b(\text{incriem.})} \quad (13)$$

$$L_{b(\text{incriem.})} = \frac{L_{b(\text{final})}}{30} \quad (14)$$

$$L_{b(\text{final})} = 1,5\lambda_r r_y \quad (15)$$

Tal critério foi adotado visando manter uma uniformidade lógica na escolha dos comprimentos de análise. Adotou-se, nesse trabalho, o número de intervalos de  $L_b$  igual a 30, que se mostrou suficiente para uma boa visualização da dependência  $\beta$  ( $\lambda$ ). Os gráficos são plotados em função do índice de esbelteza  $\lambda$ .

### 3.1 Estatística das variáveis básicas

Somente as variáveis envolvidas no cálculo da resistência foram consideradas aleatórias nesse trabalho, enquanto que as variáveis associadas ao efeito das ações foram tomadas como determinísticas, de modo a tornar a análise e seus resultados mais claros e assumindo o

valor do momento resistente determinado com os valores característicos das variáveis e minorado pelo coeficiente de resistência  $\phi = 0,90$ .

As propriedades estatísticas utilizadas, nesse trabalho, seguem, basicamente, as indicadas nos trabalhos de Ellingwood et al.(1980) e Galambos e Ravindra (1978), dada a falta de informação em relação aos perfis nacionais adotados neste trabalho. Os valores obtidos nos trabalhos citados anteriormente são a razão entre valor médio e nominal (ou característico), o coeficiente de variação (COV) e o tipo de distribuição de probabilidade das variáveis aleatórias.

As variáveis aleatórias utilizadas, para representar as propriedades mecânicas do aço, são:  $f_y$ , tensão de escoamento do aço;  $f_r$ , tensão residual do aço e E, módulo de elasticidade do aço.

Para cada uma das variáveis, tem-se: Tensão de escoamento do aço:  $\bar{f}_y = 1,10f_{y_0}$ ; COV = 0,11; FDP = Log-Normal; Percentil = 20,9%; Tensão residual do aço:  $\bar{f}_r = 1,10f_{r_0}$ ; COV = 0,50; FDP = Log-Normal; Percentil = 63,7%; Módulo de elasticidade:  $\bar{E} = 1,0E_0$ ; COV = 0,06; FDP = Log-Normal; Percentil = 51,4%

Considerou-se, nesse trabalho, para os valores nominais da tensão de escoamento,  $f_{y_0}$ , 345 MPa; da tensão residual,  $f_{r_0}$ , 115 MPa e do módulo de elasticidade do aço, E, 205000 MPa, para a análise dos perfis de acordo com a NBR8800 (1986). Nas análises segundo o projeto de revisão da NBR8800 (2003), foi adotado o valor nominal da tensão residual,  $f_r$ , igual a 70 MPa, conforme nele prescrito.

Quanto às propriedades geométricas que interessam no dimensionamento, estas foram determinadas a partir das dimensões do perfil, adotadas como variáveis aleatórias. Essas são as seguintes:  $b_f$ , largura da mesa;  $t_f$ , espessura da mesa;  $t_w$ , espessura da alma e d, altura do perfil. Adotou-se, nesse estudo, que as dimensões do perfil ( $b_f$ , d,  $t_f$  e  $t_w$ ) possuem as relações entre valor médio sobre o valor nominal igual a 1,00; coeficiente de variação de 0,02 e com distribuição Log-Normal de probabilidade (Castanheira, 2004 e Santos, 2000).

### 3.2 Função de Estado Limite

Para a determinação do momento resistente à flexão, utiliza-se a seguinte função de *estado limite* aplicada a vigas não-esbeltas, sujeitas à flexão normal simples, de seção I com dois eixos de simetria:

$$g(\mathbf{X}) = M(\mathbf{X}) - M_d(\mathbf{X}_k) = 0 \quad (16)$$

onde:

$\mathbf{X}$ : vetor que contém as variáveis aleatórias,

$\mathbf{X}_k$ : vetor dos valores nominais das variáveis,

$M(\mathbf{X})$ : função que define a resistência à flexão, calculada pelos critérios da Norma Brasileira para flexão, utilizando as variáveis aleatórias geradas pelo programa a partir do conhecimento do tipo de distribuição de probabilidade e seus dois primeiros momentos (média e variância), sem o coeficiente de minoração de resistência  $\phi$  (igual a 0,90 pela NBR 8800).

$M_d(\mathbf{X}_k)$ : momento causado pelo carregamento de projeto. Tomou-se o efeito do carregamento de cálculo igual ao momento resistente de cálculo. O momento resistente é calculado com os valores nominais das variáveis multiplicado pelo coeficiente de segurança  $\phi$ . Logo, tem-se que:

$$M_d(\mathbf{X}_k) = 0,90M_n(\mathbf{X}_k) \quad (17)$$

### 3.3 Avaliação do índice de confiabilidade

A Figura 3 apresenta o resultado da determinação do índice de confiabilidade  $\beta$  para a função de *estado limite* apresentada no item 3.2, para um conjunto de 35 perfis I laminados produzidos pela AÇOMINAS, segundo a NBR8800 (1986), em função do índice de esbeltez. A apresentação dos valores de  $\beta$  em função do índice de esbeltez  $\lambda$  num único gráfico, para diferentes perfis, torna evidente a amplitude da variação do índice de confiabilidade, mesmo em se tratando da mesma região para o cálculo do momento resistente. Os valores encontrados para  $\beta$  variam entre 1,2 e 2,2, mostrando uma dispersão relativamente grande no índice de confiabilidade entre perfis com o mesmo índice de esbeltez  $\lambda$ .

Na Figura 4, apresenta-se a variação do índice de confiabilidade  $\beta$  em função do índice de esbeltez  $\lambda$  para um conjunto de 14 perfis I laminados, entre os 35 analisados anteriormente, sendo a análise feita utilizando o projeto de revisão da norma NBR 8800 (2003), para termos de comparação.

Nesse caso, os valores encontrados para  $\beta$  variam entre 1,2 e 1,9, apresentando, portanto, uma menor dispersão do índice de confiabilidade entre perfis com o mesmo índice de esbeltez  $\lambda$ . Observa-se que, nesse caso, os valores de  $\beta$  são menores na fase inelástica, devido à diminuição da tensão residual apresentada no Projeto de Revisão da NBR 8800 (2003). Nas outras regiões, as diferenças dos valores encontrados do índice de confiabilidade  $\beta$  são bastante reduzidas.

### 4. Determinação dos fatores de minoração da resistência

Adotou-se um procedimento para determinação do coeficiente de minoração da resistência  $\phi$ , a ser aplicado na Equação 1, em função de um índice de confiabilidade preestabelecido, para uma dada função de *estado limite* (Castanhei-

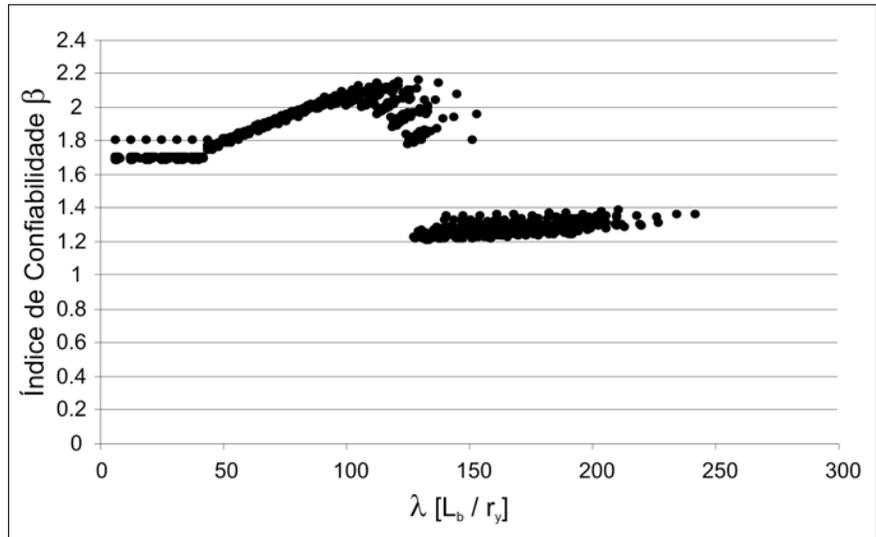


Figura 3 - Variação do índice de confiabilidade de 35 perfis I laminados.

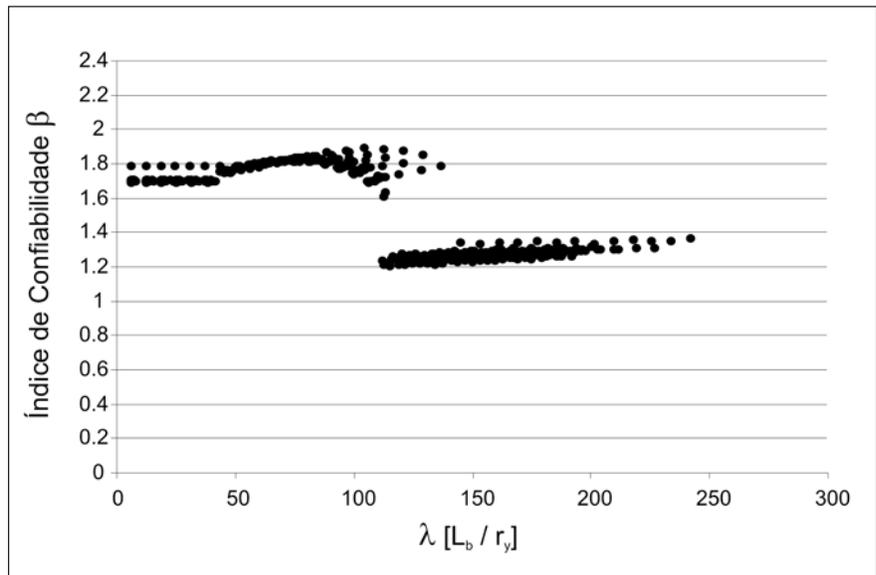


Figura 4 - Variação do índice de confiabilidade de 14 perfis I laminados.

ra, 2004). O método utiliza o vetor dos cossenos diretores  $\alpha$ , fornecido pelo método FORM. É mostrado que tal vetor representa uma medida de sensibilidade de  $\beta$  em relação às variáveis, variando seu valor em função do grau de importância que cada variável assume no desempenho do componente estrutural, quantificando-se, assim, um “peso” distinto para cada uma. Procedimento semelhante foi feito por Santos (2000), porém utilizando medida de sensibilidade obtida no método de Monte Carlo com amostragem por importância.

Como aplicação do método, é feita a determinação dos coeficientes de resistência,  $\phi$ , para três níveis de confiabilidade. Foi utilizada a função de *estado limite* último de flexão, segundo a NBR 8800 (1986). Os resultados são plotados em gráficos de dispersão dos valores de  $\phi$  em função do índice de esbeltez, para todo o domínio analisado. Com a observação dos gráficos, é proposta uma tabela simplificada de coeficientes de resistência a serem aplicados no momento resistente nominal para atingir um índice de confiabilidade alvo.

#### 4.1 Coeficientes de resistência para três níveis de confiabilidade

São apresentados, nas Figuras 5 a 7 os resultados da análise mostrando a dispersão dos coeficientes de resistência para três níveis de confiabilidade. A análise abrange todo o domínio dos perfis, que são plotados em função do índice de esbeltez. O intervalo do comprimento  $L_b$ , para o cálculo do  $\lambda$ , segue o descrito no item 3. Os gráficos apresentam a variabilidade do coeficiente de resistência, mostrando a dificuldade de obtenção de uma uniformidade da confiabilidade com a adoção de um valor único do coeficiente de resistência para todo o estado-limite de flexão. Dessa forma, é proposta a separação de cada gráfico em modos de falha, conforme descrito no item 2.1 (Castanheira, 2004).

Embora os efeitos das ações tenham sido tomados como determinísticos (poderia ser feito de forma semelhante para o caso não determinístico), pôde-se propor uma alternativa para uniformizar a confiabilidade para o estado limite de flexão, conforme a NBR 8800, para perfis laminados de aço de seção I. A Tabela 3 apresenta valores representativos do coeficiente de resistência para três níveis de confiabilidade estudados, separados por modo de falha. Para o modo de falha 2, visando a diminuir o erro produzido pela adoção de um único coeficiente, esse modo foi discretizado para três intervalos de  $\lambda$ .

#### 5. Conclusões

Pode-se observar, através dos resultados obtidos pelo Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM), a ocorrência de uma variabilidade no índice de confiabilidade  $\beta$  para a mesma função de estado limite de flexão apresentada no item 2.

Os resultados obtidos através da utilização do projeto de revisão da norma NBR8800 (2003) diferem daqueles obtidos através da norma em vigor (1986) apenas no modo de falha 2 (FLT, Flambagem Inelástica), onde os valores

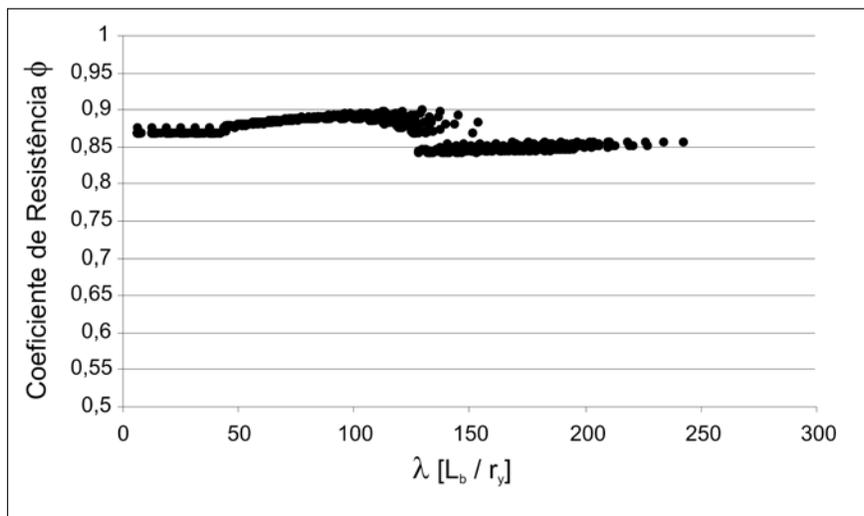


Figura 5 - Variação do coeficiente de resistência  $\phi$  para  $\beta_{alvo}$  de 2,0.

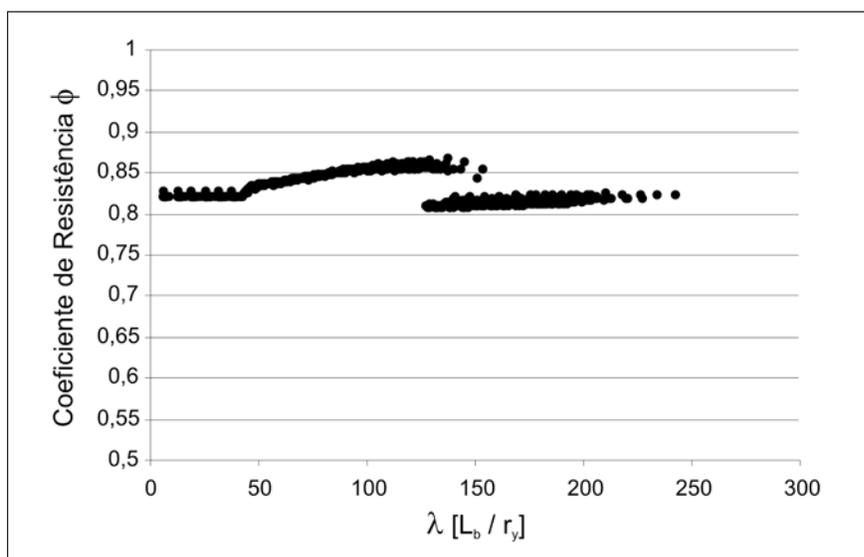


Figura 6 - Variação do coeficiente de resistência  $\phi$  para  $\beta_{alvo}$  de 2,5.

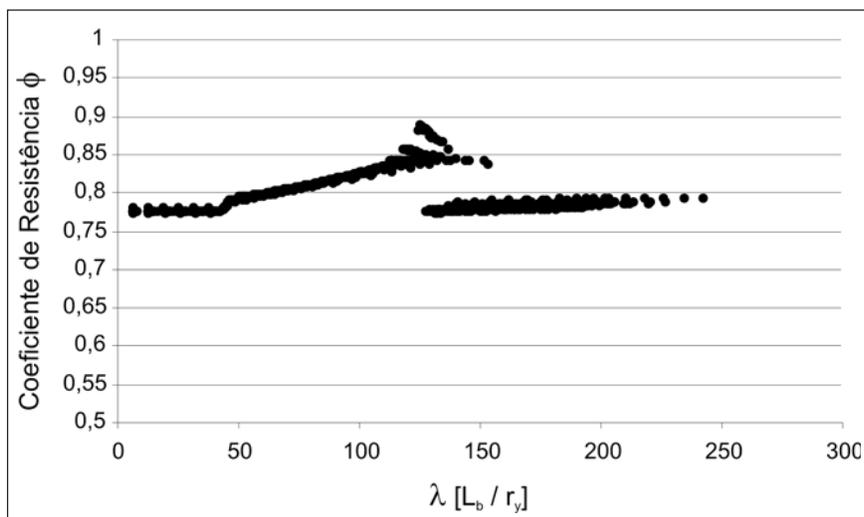


Figura 7 - Variação do coeficiente de resistência  $\phi$  para  $\beta_{alvo}$  de 3,0.

**Tabela 3** - Coeficientes de resistência para três níveis de confiabilidade-alvo.

Índice de Confiabilidade	Coeficiente de Minoração da Resistência $\phi$					
	Modo de Falha 1	Modo de Falha 2			Modo de Falha 3	Modo de Falha 8
		$\lambda < 70$	$70 \leq \lambda < 140$	$\lambda \geq 140$		
$\beta = 2,0$	0,87	0,88	0,89	0,87	0,84	0,88
$\beta = 2,5$	0,82	0,83	0,85	0,85	0,81	0,83
$\beta = 3,0$	0,77	0,79	0,81	0,83	0,78	0,78

Obs.: MF1: FLT plástica; MF2: FLT inelástica; MF3: FLT elástica; MF8: FLM inelástica.

de  $\beta$  aparecem menores no caso do projeto de revisão, porém continua ocorrendo uma dispersão no índice de confiabilidade entre perfis com o mesmo índice de esbeltez  $\lambda$ .

Uma metodologia para calcular o coeficiente de minoração da resistência para um nível de confiabilidade preestabelecido foi utilizada para o estado limite de flexão segundo o anexo D da NBR 8800 (1986) e também para o projeto de revisão da NBR 8800 (2003), mostrando ser possível desenvolver critérios simples, a serem aplicados em norma, a fim de uniformizar a confiabilidade para uma mesma função de estado limite. Os resultados obtidos, nesse trabalho, são semelhantes àqueles obtidos por Santos (2000) para perfis soldados da série VS.

## 6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - Processo 478794/01 e da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Capes pela Bolsa de Mestrado.

## 7. Referências bibliográficas

- AÇOMINAS *Tabela de bitolas - Perfis I*. www.acominas.com.br, 2003.
- ANDRADE, P. B. *Curso básico de estruturas de aço*, Belo Horizonte: IEA Editora, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 8800 Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios*. 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 8800 Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios - Projeto de revisão*. 2003.
- CALREL *User manual*. Report UCB/SEMM/89/18, University of Califórnia at Berkeley, 1989.
- CASTANHEIRA, A. M. *Avaliação de confiabilidade de vigas metálicas*. Universidade Federal de Ouro Preto, 2004. (Dissertação de Mestrado).
- ELLINGWOOD, B., MACGREGOR, J. G., GALAMBOS, T. V., CORNELL, C. A. *Development of a probability based load criterion for american national standard A58*. National Bureau of Standards 577, 1980.
- ELLINGWOOD, B., MACGREGOR, J. G., GALAMBOS, T. V., CORNELL, C. A. *Probability Based Load Criteria: Load Factor and Load Combinations*. *Journal of the Structural Division - ASCE*, v.108, n. 5, p. 978-997, 1982.
- GALAMBOS, T. V. *Design Codes*. In: BLOCKLEY, D. (Ed.). *Engineering Safety*. Inglaterra: McGraw-Hill, 1992. Cap. 3, p. 47-71.
- MACHADO, E. R., FREITAS, M. S. R., DINIZ, S. M. C. *Avaliação da segurança de vigas projetadas segundo a NBR6118*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43. *Anais...* Foz do Iguaçu, 2001.
- MACHADO, E. R., FREITAS, M. S. R., DINIZ, S. M. C. *Avaliação da confiabilidade de estruturas em concreto armado*. In: CONGRESSO IBERO- LATINOAMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA, 21. *Anais...* Rio de Janeiro, CD-ROM, 2000.
- RAVINDRA, M. K., GALAMBOS, T. V. *Load and resistance factor design for steel*. *Journal of the Structural Division - ASCE*, v.104, n. 9, p.1337-1353, 1978.
- SANTOS, L. L. *Sobre a confiabilidade na flexão de vigas segundo as normas de estruturas metálicas*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. (Dissertação de Mestrado).

Artigo recebido em 24/11/2006 e aprovado em 28/11/2006.

**REM - Revista Escola de Minas**  
**71 anos divulgando CIÊNCIA.**