

## Confiabilidade de vigas de aço dimensionadas de acordo com a norma brasileira NBR 8800:2008

Wagner Carvalho Santiago<sup>1\*</sup>, Vanessa Bezerra de Almeida<sup>2</sup> e Tiago de Macedo Souza<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Professor Adjunto, Colegiado de Engenharia Civil, Universidade Federal do Vale do São Francisco, wagner.santiago@univasf.edu.br

<sup>2</sup> Graduanda, Colegiado de Engenharia Civil, Universidade Federal do Vale do São Francisco, vbezerraalmeida@hotmail.com

<sup>3</sup> Graduando, Colegiado de Engenharia Civil, Universidade Federal do Vale do São Francisco, tiagofla98.macdos@hotmail.com

### Reliability of steel beams designed in accordance with

### Brazilian code NBR 8800:2008

#### Resumo

Este artigo apresenta um estudo acerca da segurança de vigas de aço dimensionadas de acordo com a norma brasileira NBR 8800:2008. O trabalho está fundamentado na teoria de confiabilidade estrutural, que permite uma representação explícita das incertezas envolvidas em termos das resistências e ações. No tocante às resistências, são consideradas vigas com dois tipos de aços estruturais, dezoito perfis laminados e dezoito perfis soldados. No que tange às ações, são consideradas sete razões entre carregamentos acidental e permanente ( $q_n/g_n$ ), e sete razões entre carregamentos do vento e permanente ( $w_n/g_n$ ). Os resultados mostram que vigas submetidas a maiores razões entre carregamentos tendem a apresentar menores níveis de segurança.

**Palavras-chave:** Segurança, confiabilidade, estruturas metálicas, vigas.

#### Abstract

This paper presents a study on the safety of steel beams designed in accordance with Brazilian code NBR 8800:2008. The work is based on reliability theory, which allows an explicit representation of the uncertainties involved in terms of resistances and actions. Regarding the resistances, this study considers beams with two structural steel, eighteen rolled steel sections and eighteen welded steel sections. In terms of actions, this work considers seven ratios between live and dead loads ( $q_n/g_n$ ), and seven ratios between wind and dead loads ( $w_n/g_n$ ). Results show that higher ratios between loads tend to reduce the level of safety of beams.

**Keywords:** Safety, reliability, steel structures, beams.

\* autor correspondente

## 1 Introdução

Todo projeto estrutural envolve incertezas relacionadas com a capacidade resistente da estrutura e com as ações que atuarão sobre ela durante e após a sua construção. As principais normas de projeto, brasileiras e estrangeiras, consideram essas incertezas através do método dos estados limites, que propõe fronteiras entre comportamentos estruturais desejáveis e indesejáveis.

A NBR 8800 (2008), que baliza o dimensionamento de estruturas de aço no Brasil, prescreve coeficientes parciais de segurança que visam controlar o risco contra falha. Esses coeficientes majoram as ações e minoram a resistência dos elementos estruturais, de modo a criar uma margem de segurança em relação às principais incertezas.

Acontece que os coeficientes parciais de segurança da NBR 8800 (2008) não derivam de um processo de calibração alinhado com a realidade do país, o que evidencia a necessidade de estudos que avaliem de maneira probabilística o nível de segurança das estruturas de aço brasileiras.

Uma primeira calibração dos coeficientes indicados na NBR 8800 (2008) foi endereçada por Souza Junior (2009); e, mais recentemente, uma outra mais completa foi procedida por Santiago (2019), ambas no âmbito do departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Esses e outros estudos reforçam não apenas a importância da calibração dos coeficientes atualmente recomendados na NBR 8800 (2008), mas também a de análises de confiabilidade que sinalizem o panorama da segurança das estruturas de aço projetadas e construídas no Brasil.

Desta forma, este trabalho objetiva a realização de um amplo estudo acerca da segurança de vigas de aço dimensionadas em conformidade com as prescrições da NBR 8800 (2008). Estando ele fundamentado na teoria de confiabilidade estrutural, que permite uma estimativa da segurança através do índice de confiabilidade ( $\beta$ ).

## 2 Confiabilidade Estrutural

A confiabilidade estrutural está relacionada com o grau de confiança que uma estrutura tem em cumprir propósitos estabelecidos em projeto por um determinado período de referência (Thoft-Christensen e Murotsu, 1986).

Em função das inúmeras incertezas presentes em um projeto estrutural, é comum que exista discrepância entre o comportamento real e teórico de uma estrutura. Neste contexto, o principal propósito de uma análise de confiabilidade é quantificar a segurança de um problema de engenharia a partir da consideração das incertezas intrínsecas à estrutura.

Entre os métodos mais utilizados em análises de confiabilidade, ganha destaque o método de confiabilidade de primeira ordem ou FORM – *First Order Reliability Method* (Hasofer e Lind, 1974). Apesar de não ser novo, ainda hoje este método se mostra adequado justamente por sua rapidez e precisão ao tratar de problemas que não apresentam grandes não-linearidades.

O FORM parte da construção de uma função conjunta de distribuição de probabilidades baseada nas distribuições de probabilidades de todas as variáveis aleatórias envolvidas no problema. Este método ainda envolve a transformação do vetor de variáveis aleatórias  $\mathbf{X}$ , com distribuição qualquer, em um conjunto  $\mathbf{Y}$  de variáveis aleatórias normais com média nula e desvio-padrão unitário (Beck, 2019).

A função conjunta de distribuição de probabilidades no espaço normal padrão, também chamada de distribuição normal padrão multi-variável ou multi-dimensional, permite o encontro do índice de confiabilidade que corresponde ao ponto sobre o domínio de falha com maior probabilidade de ocorrência.

Portanto, a solução costuma ser encontrada através da resolução de um problema de otimização por métodos numéricos baseados em algoritmos como o de Hasofer, Lind, Rackwitz e Fiessler (HLRF), haja vista que o índice de confiabilidade corresponde à menor distância entre a equação de estado limite e a origem do espaço normal padrão.

Através dos coeficientes de sensibilidade ( $\alpha$ ), o FORM ainda permite a avaliação da importância relativa de cada uma das variáveis aleatórias integrantes do problema. Esses coeficientes, que nada mais são do que os cossenos diretores do hiper-plano, correspondem à razão entre o vetor gradiente e o seu próprio módulo.

### **3 Metodologia**

O trabalho está dividido em duas grandes etapas: a primeira envolve o levantamento das estatísticas relacionadas com os materiais, as ações e os modelos de cálculo das vigas de aço brasileiras, enquanto a segunda consiste em aferir a segurança propriamente dita dessas vigas.

Na primeira etapa do estudo, são determinadas as propriedades estatísticas das principais variáveis aleatórias de resistência e solicitação. É justamente nela que são ajustadas as distribuições que representam o comportamento das variáveis consideradas no problema.

Na segunda etapa do trabalho, por sua vez, são encontrados os índices de confiabilidade para diferentes situações de projeto de vigas de aço dimensionadas e construídas no Brasil.

### **4 Variáveis Aleatórias**

Nesta seção são apresentadas as principais variáveis aleatórias de resistência e solicitação associadas com as vigas de aço brasileiras, sendo que as distribuições daquelas não disponíveis na literatura foram ajustadas a partir de testes de aderência (Chi-Quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling), após a eliminação prévia dos dados não pertencentes ao grupo (*outliers*).

#### **4.1 Variáveis de resistência**

A Tabela 1 apresenta um apanhado dos resultados das principais variáveis aleatórias de resistência vinculadas com vigas de aço montadas no Brasil: resistência ao escoamento de perfis e chapas para uso estrutural ( $f_y$ ), módulo resistente plástico ( $Z$ ), módulo resistente elástico ( $W$ ), altura ( $d$ ), espessura da alma ( $t_w$ ) e erro de modelo de resistência ( $E_{m,r}$ ). Cabe salientar que as médias estão escritas em função dos respectivos valores característicos ou nominais.

**Tabela 1 - Variáveis aleatórias de resistência.**

| Variável Aleatória | Distribuição   | Média  | C.V.          | Fonte                 |   |
|--------------------|----------------|--------|---------------|-----------------------|---|
| $f_y$              | ASTM A36       | Normal | $1,34.f_{yk}$ | 0,09                  | Santiago (2019)                                 |
|                    | ASTM A572 GR50 | Normal | $1,22.f_{yk}$ | 0,08                  | Santiago (2019)                                 |
|                    | Z              | Normal | $Z_n$         | 0,04                  | JCSS (2001)                                     |
|                    | W              | Normal | $W_n$         | 0,04                  | JCSS (2001)                                     |
| $E_{m,r}$          | d              | Normal | $d_n$         | $3,0\text{mm}/d_n$    | JCSS (2001), NBR 15980 (2011) e NBR 5884 (2013) |
|                    | $t_w$          | Normal | $t_{wn}$      | $0,5\text{mm}/t_{wn}$ | JCSS (2001), NBR 15980 (2011) e NBR 5884 (2013) |
|                    | Flexão         | Normal | 1,02          | 0,10                  | Ellingwood <i>et al.</i> (1980)                 |
|                    | Cisalhamento   | Normal | 1,03          | 0,11                  | Ellingwood <i>et al.</i> (1980)                 |
|                    |                |        |               |                       |   |

A variável  $f_y$  foi construída com base em mais de 1,1 mil resultados de ensaios de resistência à tração procedidos em perfis e chapas de aço com função estrutural provenientes de diferentes lotes produzidos no Brasil e na China entre os anos de 2012 e 2016; tendo os dados sido fornecidos pela fabricante ArcelorMittal Brasil, bem como pelas empresas brasileiras de montagem SIDERTEC e Aço Vertical.

A impossibilidade de realização de um estudo experimental fez com que neste trabalho fossem adotadas para as variáveis Z, W, d e  $t_w$  as distribuições propostas pelo JCSS (2001), devidamente associadas com as prescrições das normas NBR 15980 (2011) e NBR 5884 (2013).

Como os modelos de dimensionamento de vigas metálicas são similares no Brasil e nos Estados Unidos da América; então foram empregados para a variável  $E_{m,r}$  os resultados propostos por Ellingwood *et al.* (1980). Porém, cabe destacar que tais resultados foram obtidos na época da primeira calibração AISC em estados limites para perfis laminados.

#### 4.2 Variáveis de solicitação

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados das principais variáveis aleatórias de solicitação associadas com vigas de aço edificadas no Brasil: ação permanente (g), ação acidental em um ponto arbitrário do tempo ( $q_{apt}$ ), ação acidental máxima de 50 anos ( $q_{50}$ ), ação do vento máximo anual ( $w_1$ ), ação do vento máximo de 50 anos ( $w_{50}$ ) e erro de modelo de solicitação ( $E_{m,s}$ ). Cabe destacar que as médias estão escritas em função dos respectivos valores nominais.

**Tabela 2 - Variáveis aleatórias de solicitação.**

| Variável Aleatória | Distribuição | Média      | C.V. | Fonte                  |
|--------------------|--------------|------------|------|------------------------|
| $g$                | Normal       | $1,06.g_n$ | 0,12 | Santiago (2019)        |
| $q_{apt}$          | Gamma        | $0,25.q_n$ | 0,55 | Santiago (2019)        |
| $q_{50}$           | Gumbel       | $0,90.q_n$ | 0,28 | Este Trabalho          |
| $w_1$              | Gumbel       | $0,33.w_n$ | 0,47 | Beck e Souza Jr (2010) |
| $w_{50}$           | Gumbel       | $0,90.w_n$ | 0,34 | Beck e Souza Jr (2010) |
| $E_{m,s}$          | Flexão       | 1,00       | 0,10 | JCSS (2001)            |
|                    | Cisalhamento | 1,00       | 0,10 | JCSS (2001)            |

Para a variável  $g$ , que corresponde às cargas que atuam de forma praticamente constante no horizonte da vida útil da estrutura, foi considerado o resultado proposto por Santiago (2019); haja vista que ele foi obtido a partir da modelagem de um mesmo edifício de múltiplos pavimentos por doze renomados engenheiros calculistas que atuam em diferentes estados do país.

Para as variáveis  $q_{apt}$  e  $q_{50}$ , que compreendem as cargas que apresentam grande variação em uma estrutura ao longo da sua vida útil, foram adotados resultados adaptados de Santiago (2019); uma vez que foi considerado um período de retorno de 140 anos para que os resultados se alinhassem com as premissas da NBR 6120 (2019).

Para as variáveis  $w_1$  e  $w_{50}$ , que correspondem à pressão exercida pelo vento no horizonte da vida útil da estrutura, foram considerados os resultados estabelecido por Beck e Souza Jr (2010); isso porque eles derivam de ajustes feitos a partir de séries históricas da velocidade do vento em diferentes estações de medições no país.

Para a variável  $E_{m,s}$ , que está relacionada com as incertezas na determinação das ações atuantes em um projeto, foi adotada a prescrição do JCSS (2001); vide que há hoje uma escassez de trabalhos sobre esse tema.

## 5 Análise de confiabilidade

Nesta seção são apresentados os casos considerados na análise de confiabilidade: vigas de aço dimensionadas para resistir esforços de flexão e de cisalhamento com dois tipos de aços estruturais, dezoito perfis laminados, dezoito perfis soldados, sete razões

entre carregamentos acidental e permanente ( $q_n/g_n$ ), e sete razões entre carregamentos do vento e permanente ( $w_n/g_n$ ).

Visando avaliar a influência do tipo de aço na capacidade resistente de vigas, foram considerados um representante de aço-carbono (ASTM A36) e outro de aço de baixa liga e alta resistência mecânica (ASTM A572 GR50).

Com a máxima de analisar o impacto de diferentes perfis laminados, foram consideradas as seguintes bitolas: W 150 x 13, W 150 x 29,8, W 200 x 15, W 200 x 46,1, W 250 x 17,9, W 250 x 73, W 310 x 21, W 310 x 70, W 360 x 32,9, W 360 x 91, W 410 x 38,8, W 410 x 75, W 460 x 52, W 460 x 89, W 530 x 66, W 530x 92, W 610 x 101 e W 610 x 174.

Objetivando aferir a influência de diferentes perfis soldados, foram consideradas as seguintes bitolas: VS 400 x 68, VS 450 x 71, VS 500 x 86, VS 550 x 88, VS 600 x 125, VS 650 x 128, VS 700 x 137, VS 750 x 140, VS 800 x 143, VS 850 x 155, VS 900 x 159, VS 950 x 162, VS 1000 x 180, VS 1100 x 199, VS 1200 x 244, VS 1300 x 281, VS 1400 x 309, VS 1500 x 319.

Com a métrica de averiguar o impacto de diferentes proporções entre carregamentos, foram considerados sete razões entre carregamentos acidental e permanente ( $q_n/g_n=0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0$  e  $5,0$ ), e sete razões entre carregamentos do vento e permanente ( $w_n/g_n=0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0$  e  $5,0$ ).

A partir da seleção do tipo de aço, do perfil e das razões entre carregamentos, foi possível encontrar a ação permanente nominal ( $g_n$ ) atuante na viga (Equação 1). Na sequência, foi possível encontrar a ação acidental nominal ( $q_n$ ) e a ação do vento nominal ( $w_n$ ). Cabe destacar que foram adotados  $\gamma_g=1,4$ ,  $\gamma_q=1,5$ ,  $\gamma_w=1,4$ ,  $\psi_q=0,5/0,7/0,8$  e  $\psi_w=0,6$ .

$$g_n = \begin{cases} \frac{R_D}{\gamma_g + \gamma_q \cdot (q_n/g_n) + \gamma_w \cdot \psi_w \cdot (w_n/g_n)} \\ \frac{R_D}{\gamma_g + \gamma_w \cdot (w_n/g_n) + \gamma_q \cdot \psi_q \cdot (q_n/g_n)} \end{cases} \quad (1)$$

Sendo  $R_D$  o carregamento máximo admitido, tendo ele sido encontrado em função das prescrições das normas que balizam o dimensionamento de vigas de aço no território brasileiro.

As equações de estados limites utilizadas na determinação dos índices de confiabilidade durante todo o estudo estão expressas na Equação 2, estando elas fundamentadas na regra de Turkstra (1970).

$$\begin{cases} g_1(X) = E_{m,r} \cdot R(f_y, Z, \dots) - E_{m,s} \cdot S(g + q_{50} + w_1) = 0 \\ g_2(X) = E_{m,r}^R \cdot R(f_y, Z, \dots) - E_{m,s} \cdot S(g + q_{apt} + w_{50}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Sendo  $R(\cdot)$  uma função de resistência e  $S(\cdot)$  uma função de solicitação; cabendo destacar que essas duas equações foram usadas por serem válidas para as cinco combinações de carregamento que derivam da equação de combinações utilizada no dimensionamento de estruturas no Brasil, vide a NBR 8681 (2003).

Por fim, toda a análise foi feita através do método de confiabilidade de primeira ordem (FORM) disponível no programa StRANd – *Structural Reliability Analysis and Design* – desenvolvido junto ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos por Beck (2007).

### 5.1 Vigas sujeitas à flexão

A Equação 3 ilustra a função de resistência considerada nas equações de estados limites associadas com as vigas de aço fletidas em relação ao maior eixo de momento de inércia.

$$R = \begin{cases} \frac{Z \cdot f_y}{\gamma_{a1}} & (\text{se } \lambda \leq \lambda_p) \\ \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \cdot \left[ Z \cdot f_y - (Z \cdot f_y - M_r) \cdot \left( \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] & (\text{se } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r) \\ \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} & (\text{se } \lambda > \lambda_r) \end{cases} \quad (3)$$

Sendo  $C_b$  o fator modificador do diagrama de momento fletor,  $M_r$  o momento elástico,  $M_{cr}$  o momento crítico,  $\lambda$  o parâmetro de esbeltez do elemento considerado,  $\lambda_p$  o parâmetro de esbeltez de plastificação e  $\lambda_r$  o parâmetro de esbeltez elástico.

Portanto, a capacidade resistente de cada uma das vigas de aço analisadas correspondeu ao menor dos valores encontrados entre os seguintes estados limites de instabilidade: flambagem local da alma (FLA) e flambagem local da mesa (FLM), ambos com  $\gamma_{a1}=1,1$ . Neste estudo não foi considerada a flambagem lateral por torção (FLT) por ter sido assumido que as vigas estavam contidas lateralmente.

Para o estado limite de flambagem local da alma (FLA), a Equação 4 expressa as formulações usadas na determinação dos momentos elástico e crítico, enquanto a Equação 5 apresenta as expressões empregadas na determinação dos parâmetros de esbeltez.

$$\text{Momentos resistentes} = \begin{cases} M_r = W \cdot f_y \\ M_{cr} \rightarrow N/A \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Parâmetros de esbeltez} = \begin{cases} \lambda = \frac{d}{t_w} \\ \lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \lambda_r = 5,70 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases} \quad (5)$$

Para o estado limite de flambagem local da mesa (FLM), a Equação 6 ilustra as formulações usadas na determinação dos momentos elástico e crítico, enquanto a Equação 7 apresenta as expressões empregadas na determinação dos parâmetros de esbeltez.

$$\text{Momentos resistentes} = \begin{cases} M_r = W \cdot 0,7 \cdot f_y \\ M_{cr} = \frac{0,69 \cdot E \cdot W}{\lambda^2} \quad (\text{perfis laminados}) \\ M_{cr} = \frac{4}{\sqrt{\frac{d}{t_w}}} \cdot \frac{0,90 \cdot E \cdot W}{\lambda^2} \quad (\text{perfis soldados}) \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Parâmetros de esbeltez} = \begin{cases} \lambda = \frac{b_f}{2 \cdot t_f} \\ \lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \lambda_r = 0,83 \cdot \sqrt{\frac{E}{0,7 \cdot f_y}} \quad (\text{perfis laminados}) \\ \lambda_r = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{4}{\sqrt{\frac{d}{t_w}}}} \cdot \sqrt{\frac{E}{0,7 \cdot f_y}} \quad (\text{perfis soldados}) \end{cases} \quad (7)$$

Sendo  $b_f$  a largura da mesa,  $t_f$  a espessura da mesa e  $E$  o módulo de elasticidade; cabendo salientar que tanto para o aço ASTM A36 como para o aço ASTM A572 GR50 foi adotado  $E$  igual a 200.000 GPa, conforme prescrição da NBR 8800 (2008).

Para os dois estados limites considerados, o coeficiente  $C_b$  empregado foi igual a 1,0, isso porque tal coeficiente só assume algum valor diferente deste no estado limite de flambagem lateral por torção (FLT).

## 5.2 Vigas sujeitas ao cisalhamento

A Equação 8 expressa a função de resistência considerada nas equações de estados limites associadas com as vigas de aço dimensionadas para resistir esforços decorrentes do cisalhamento com  $\varphi_{a1}=1,1$ .

$$R = \begin{cases} \frac{0,60 \cdot d \cdot t_w \cdot f_y}{\varphi_{a1}} & (\text{se } \lambda \leq \lambda_p) \\ \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right) \cdot \frac{0,60 \cdot d \cdot t_w \cdot f_y}{\varphi_{a1}} & (\text{se } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r) \\ 1,24 \cdot \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2 \cdot \frac{0,60 \cdot d \cdot t_w \cdot f_y}{\varphi_{a1}} & (\text{se } \lambda > \lambda_r) \end{cases} \quad (8)$$

Como neste trabalho foram consideradas vigas fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma, os parâmetros de esbeltez foram encontrados conforme a Equação 9.

$$\text{Parâmetros de esbeltez} = \begin{cases} \lambda = \frac{d}{t_w} \\ \lambda_p = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} \\ \lambda_r = 1,37 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} \end{cases} \quad (9)$$

sendo  $k_v$  o coeficiente que modifica os valores de  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$  em função da existência ou não de enrijecedores ao longo do comprimento da viga; cabendo destacar que foi adotado  $k_v$  igual a 5,0, haja vista que foram consideradas vigas cujas almas não contavam com enrijecedores transversais.

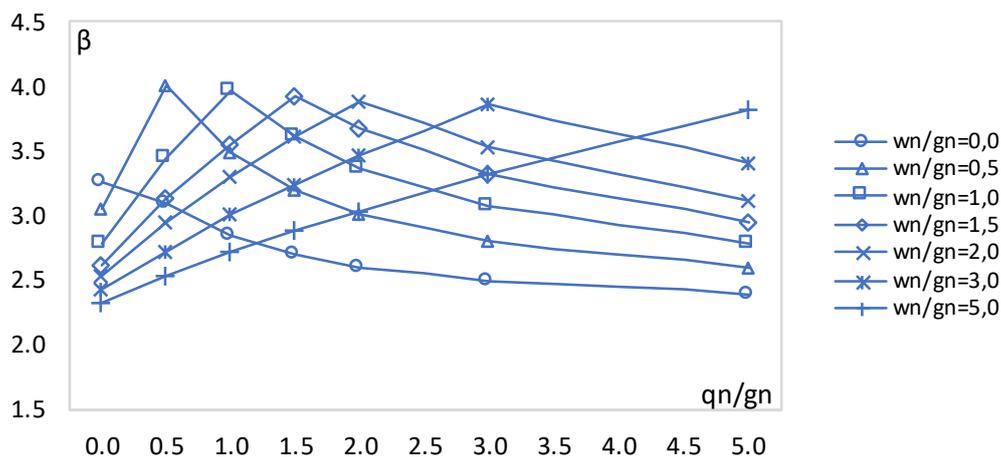
No mais, assim como no caso das vigas fletidas, o módulo de elasticidade (E) foi considerado igual a 200.000 GPa tanto para o aço ASTM A36 como para o aço ASTM A572 GR50.

## 6 Resultados

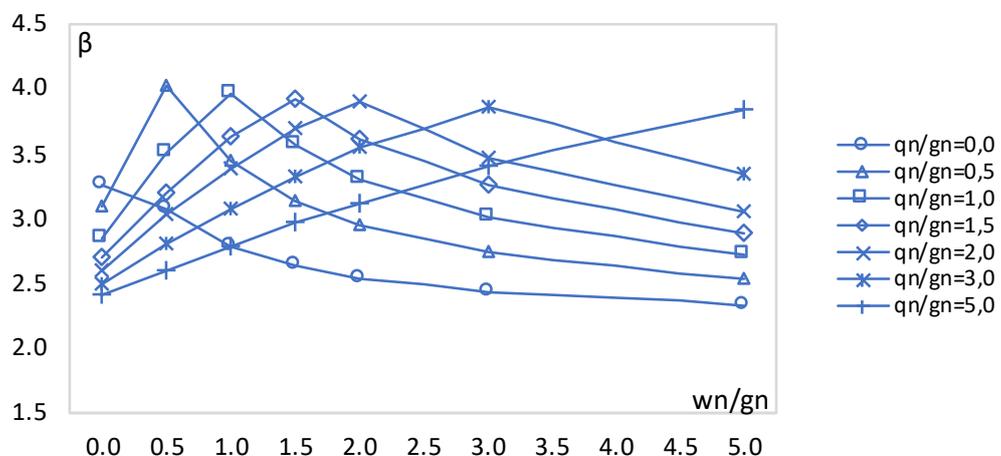
Nesta seção são apresentados os resultados oriundos da análise de confiabilidade propriamente dita, estando eles devidamente categorizados para permitir uma melhor compreensão do assunto.

### 6.1 Vigas sujeitas à flexão

A Figura 1 apresenta os índices de confiabilidade determinados para uma viga dimensionada para resistir esforços de flexão com aço estrutural ASTM A36, perfil W 610 x 174 e  $\psi_q$  de 0,5.



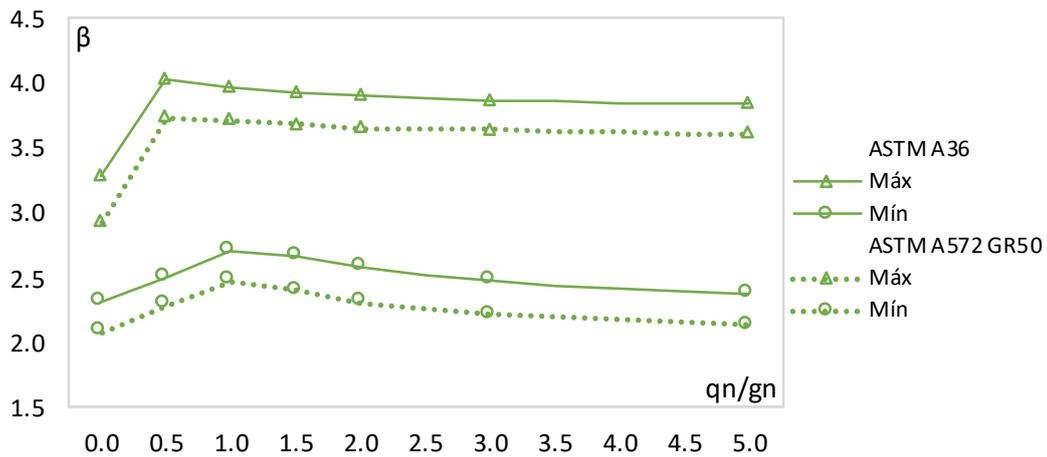
a) Índices de confiabilidade em função da razão entre ações acidental e permanente.



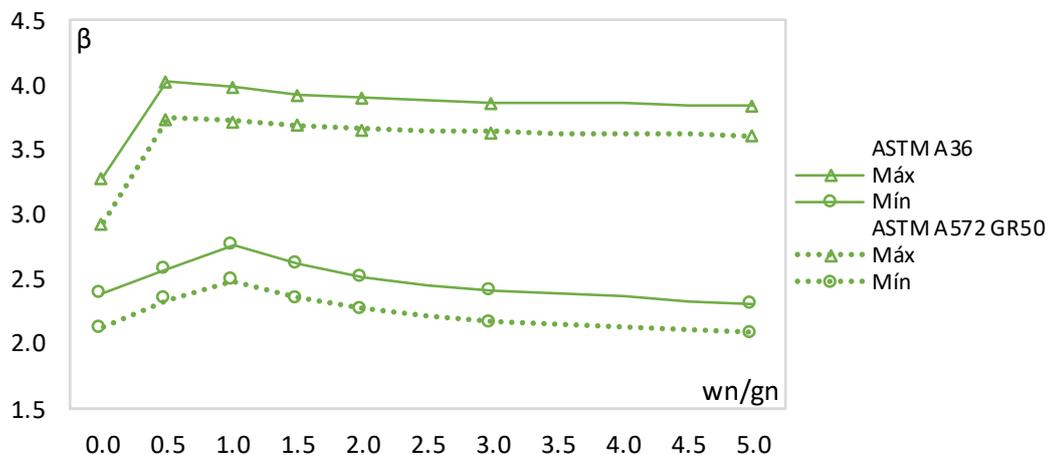
b) Índices de confiabilidade em função da razão entre ações do vento e permanente.

Figura 1 – Índices de confiabilidade para um exemplo de viga de aço submetida à flexão.

Extrapolando para as demais configurações de vigas consideradas, a Figura 2 ilustra os limites superior e inferior dos índices de confiabilidade em função do tipo de aço. Esta figura evidencia que as vigas projetadas com aço ASTM A36 tendem a apresentar maiores índices de confiabilidade que aquelas projetadas com aço ASTM A572 GR50. Esse resultado decorre do fato da variável  $f_y$  apresentar uma maior média relativa à resistência característica de escoamento no caso do aço ASTM A36.



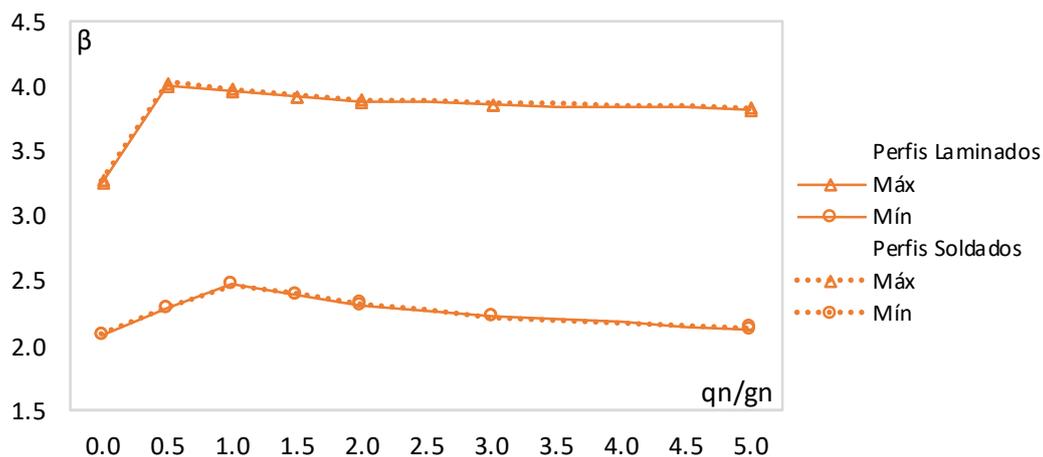
a) Limites em função da razão entre ações acidental e permanente.



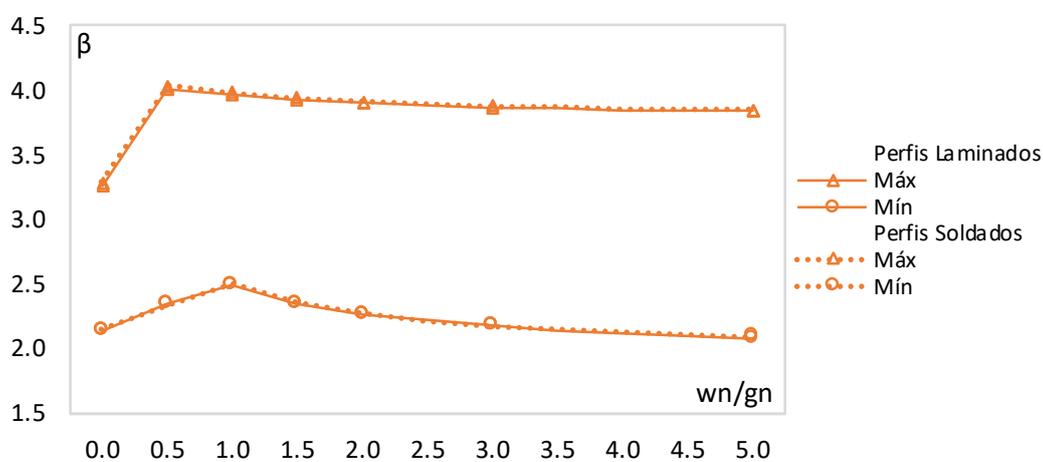
b) Limites em função da razão entre ações do vento e permanente.

**Figura 2 – Variações limites dos índices de confiabilidade de acordo com o tipo de aço para vigas submetidas à flexão.**

A Figura 3, por sua vez, denota os limites superior e inferior dos índices de confiabilidade em relação ao tipo de perfil. Esta figura demonstra que não há maiores diferenças entre os resultados para perfis soldados e laminados, ainda que a norma NBR 8800 (2008) prescreva equações diferentes para  $M_{cr}$  e  $\lambda_r$  no caso dos perfis soldados.



a) Limites em função da razão entre ações acidental e permanente.



b) Limites em função da razão entre ações do vento e permanente.

**Figura 3 – Variações limites dos índices de confiabilidade de acordo com o tipo de perfil para vigas submetidas à flexão.**

Os índices de confiabilidade encontrados variaram entre 2,08 e 4,03, sendo eles maiores que aqueles divulgados por Freitas *et al.* (2007) e Santiago *et al.* (2020). É interessante observar que no primeiro trabalho foram consideradas variáveis disponíveis na literatura que não necessariamente estavam alinhadas com a realidade dos materiais e ações no Brasil, enquanto no segundo a variável aleatória  $q_{50}$  compreendeu um período de retorno diferente.

Por fim, a Figura 4 apresenta os coeficientes de sensibilidade das variáveis aleatórias relacionadas com uma viga de aço estrutural ASTM A36, perfil W 610 x 174,  $\psi_q$  de 0,5 e razão entre ações acidental e permanente de 2,0. Esta figura mostra que as variáveis  $q_{50}$  e  $w_{50}$  exercem uma maior influência no problema, ainda que as variáveis  $E_{m,r}$ ,  $E_{m,s}$  e  $f_y$  também tenham certa importância.

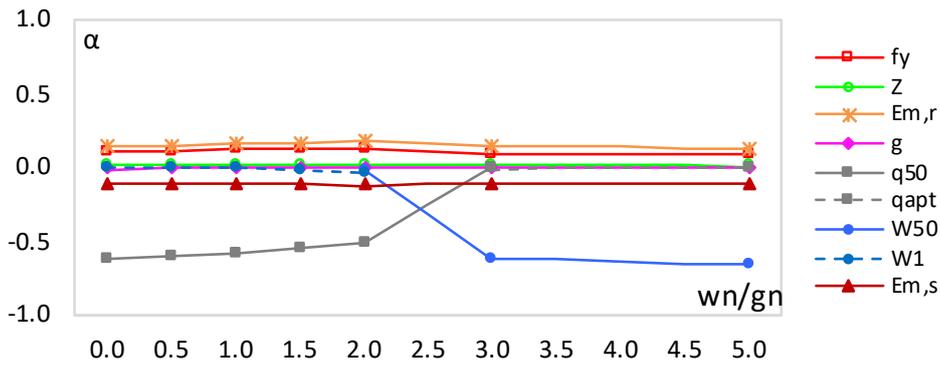
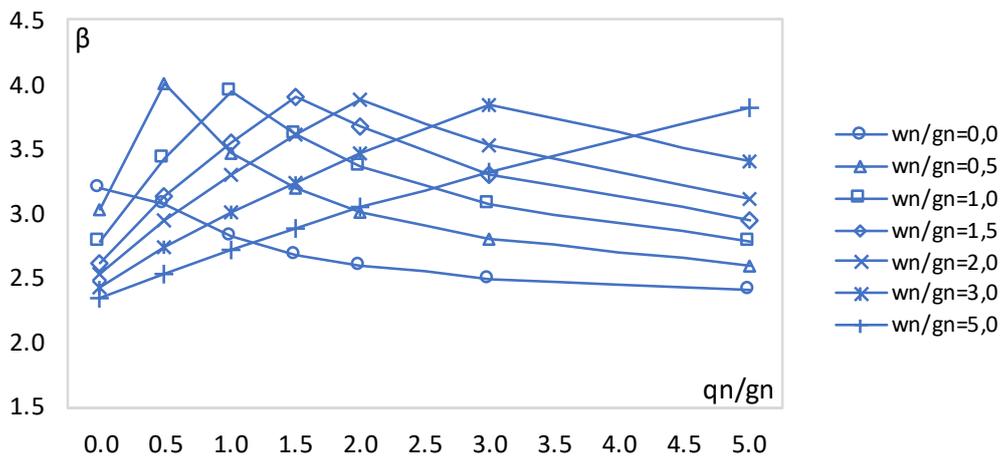


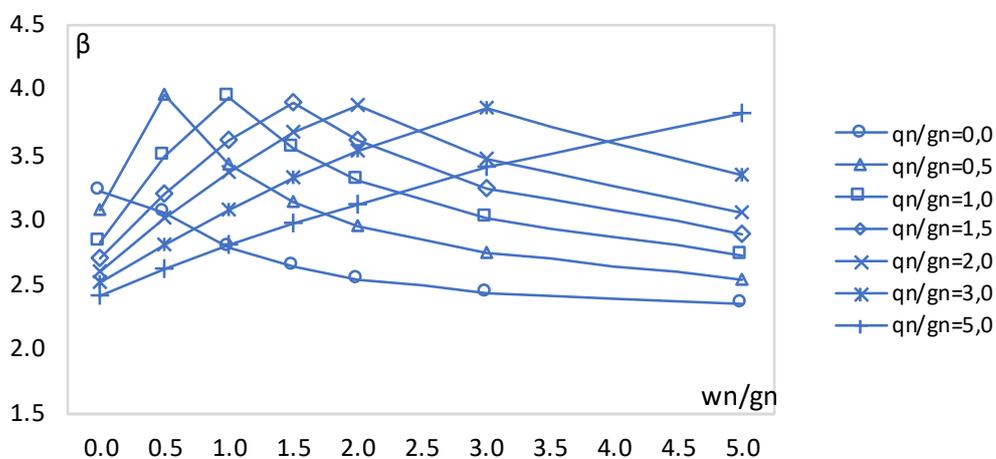
Figura 4 – Coeficientes de sensibilidade para um exemplo de viga de aço sujeita à flexão.

## 6.2 Vigas sujeitas ao cisalhamento

A Figura 5 ilustra os índices de confiabilidade determinados para uma viga dimensionada para resistir esforços de cisalhamento com aço estrutural ASTM A36, perfil W 610 x 174 e  $\psi_q$  de 0,5.



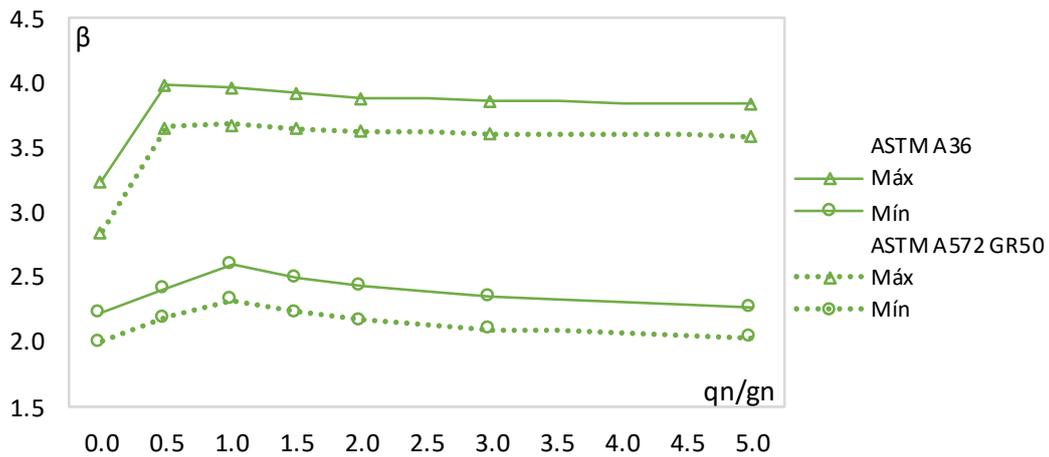
a) Índices de confiabilidade em função da razão entre ações acidental e permanente.



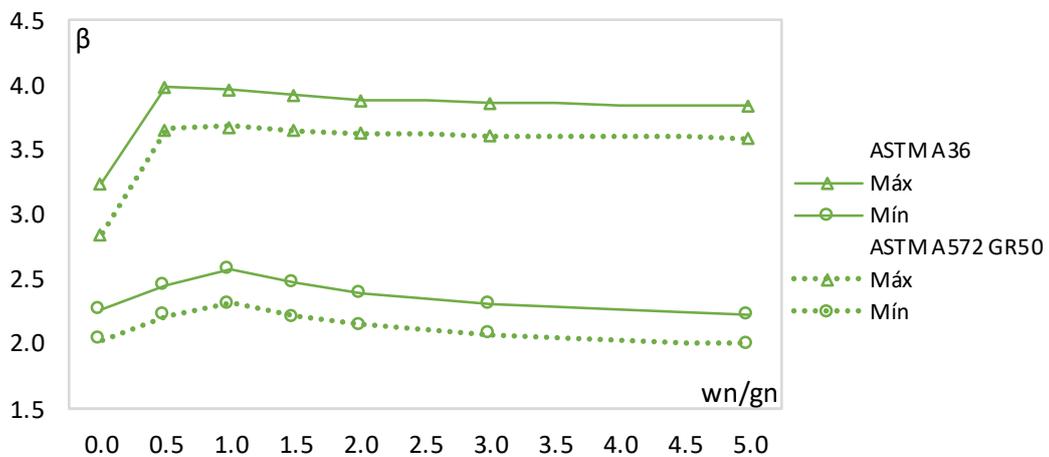
b) Índices de confiabilidade em função da razão entre ações do vento e permanente.

Figura 5 – Índices de confiabilidade para um exemplo de viga de aço sujeita ao cisalhamento.

Extrapolando para as demais configurações de vigas consideradas, a Figura 6 ilustra os limites superior e inferior dos índices de confiabilidade em função do tipo de aço. Esta figura demonstra que as vigas projetadas com aço ASTM A572 GR50 tendem a apresentar menores índices de confiabilidade que aquelas projetadas com aço ASTM A36. Esse resultado decorre do fato da variável  $f_y$  apresentar uma menor média relativa à resistência característica de escoamento no caso do aço ASTM A572 GR50.



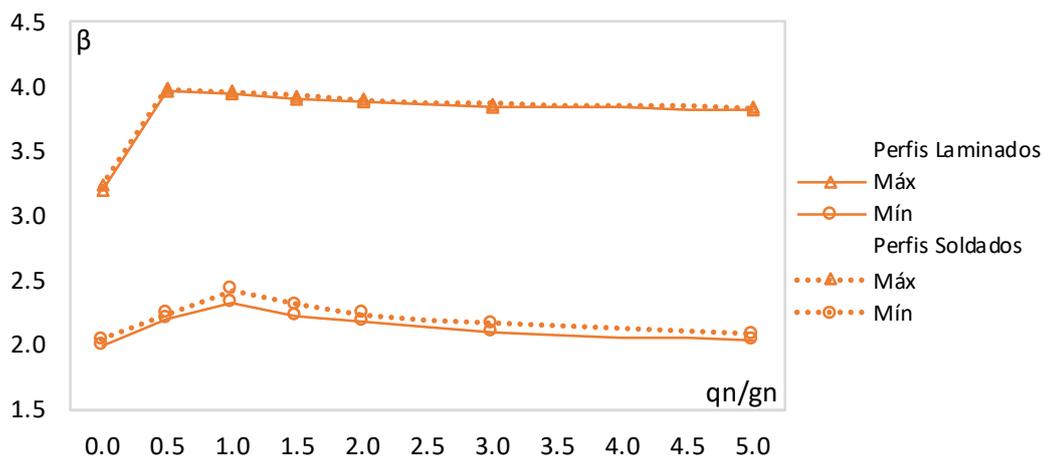
a) Limites em função da razão entre ações acidental e permanente.



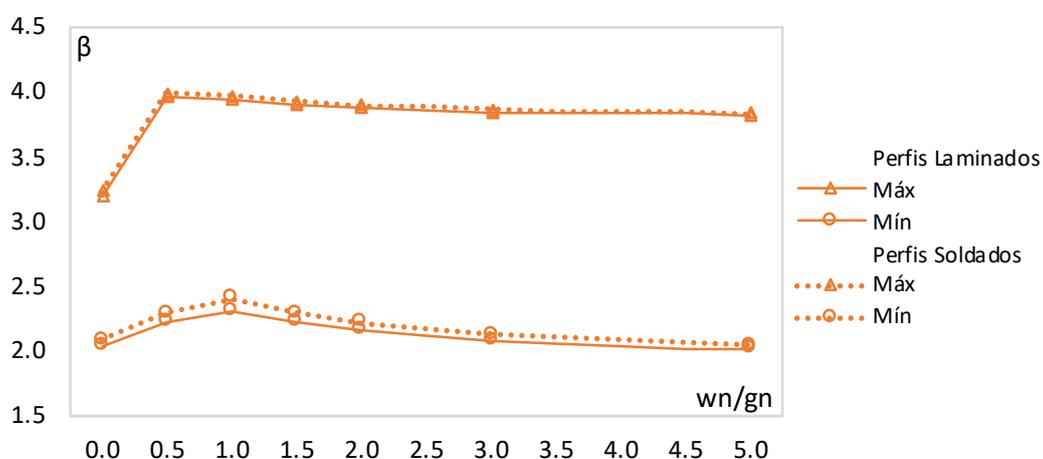
b) Limites em função da razão entre ações do vento e permanente.

**Figura 6 – Variações limites dos índices de confiabilidade de acordo com o tipo de aço para vigas submetidas ao cisalhamento.**

A Figura 7, por conseguinte, denota os limites superior e inferior dos índices de confiabilidade em relação ao tipo de perfil. Esta figura evidencia que as vigas com perfis soldados tendem a apresentar índices de confiabilidade um pouco maiores. Esse resultado deriva do fato da norma NBR 8800 (2008) prescrever equações que variam conforme a esbeltez dos perfis, sendo os perfis soldados normalmente mais esbeltos.



a) Limites em função da razão entre ações acidental e permanente.

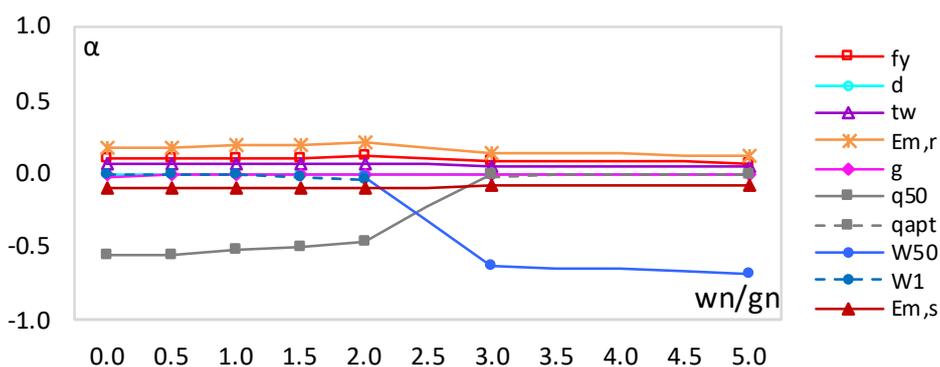


b) Limites em função da razão entre ações do vento e permanente.

**Figura 7 – Variações limites dos índices de confiabilidade de acordo com o tipo de perfil para vigas submetidas ao cisalhamento.**

Os índices de confiabilidade encontrados variaram entre 2,01 e 3,98, não diferindo de maneira significativa dos resultados encontrados para as vigas fletidas, ainda que sejam ligeiramente menores que aqueles obtidos para o estado limite último relacionado com flexão.

Finalmente, a Figura 8 apresenta os coeficientes de sensibilidade das variáveis aleatórias relacionadas com uma viga de aço estrutural ASTM A36, perfil W 610 x 174,  $\psi_q$  de 0,5 e razão entre ações acidental e permanente de 2,0. Esta figura mostra que as variáveis  $q_{50}$  e  $w_{50}$  exercem uma maior influência no problema, ainda que as variáveis  $E_{m,r}$ ,  $E_{m,s}$ ,  $f_y$  e  $t_w$  também tenham certa importância.



**Figura 8 – Coeficientes de sensibilidade para um exemplo de viga de aço sujeita ao cisalhamento.**

### 6.3 Considerações adicionais

Embora o nível de segurança associado a uma viga varie de projeto para projeto, este estudo evidencia que vigas projetadas para resistir maiores razões de carregamentos tendem a apresentar menores valores de índices de confiabilidade. Isto não é muito difícil de entender, uma vez que as variáveis  $q_{50}$  e  $w_{50}$  apresentam maior influência no problema.

Os resultados apresentados neste trabalho reforçam a importância da calibração dos coeficientes parciais de segurança atualmente utilizados no dimensionamento de estruturas metálicas no país. Beck e Souza Jr (2010), Santiago (2019) e Santiago *et al.* (2020), por exemplo, já apresentaram coeficientes calibrados capazes de conduzir a projetos mais seguros de estruturas metálicas.

## 7 Conclusões

Este estudo apresentou uma análise de confiabilidade de vigas metálicas dimensionadas para resistir esforços de flexão e de cisalhamento com dois tipos de aços estruturais, dezoito perfis laminados, dezoito perfis soldados, sete razões entre carregamentos acidental e permanente, e sete razões entre carregamentos do vento e permanente.

O trabalho demonstrou que as vigas projetadas com aço ASTM A36 tendem a apresentar maiores índices de confiabilidade, uma vez que a variável  $f_y$  apresenta uma menor média relativa à resistência característica de escoamento no caso deste tipo de aço estrutural.

O estudo também mostrou que as vigas projetadas com perfis soldados costumam apresentar índices de confiabilidade ligeiramente maiores, haja vista que as prescrições da NBR 8800 (2008) variam conforme a esbeltez e o tipo de perfil.

De uma forma geral, o trabalho evidencia que vigas submetidas a maiores razões de carregamentos tendem a apresentar menores níveis de segurança. Isto é preocupante na medida que os avanços computacionais permitem a realização de projetos de estruturas cada vez mais esbeltas e leves.

Diante deste cenário, este estudo reforça a importância da realização de pesquisas orientadas para uma calibração baseada em confiabilidade dos coeficientes parciais de segurança indicados nas principais normas brasileiras usadas no dimensionamento de estruturas metálicas.

## 8 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pelo suporte financeiro que viabilizou as análises de confiabilidade objeto deste trabalho, bem como aos revisores pelas valiosas colaborações que resultaram no enriquecimento do artigo.

## 9 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**. Ações e Segurança nas Estruturas — Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15980**. Perfis laminados de aço para uso estrutural — Dimensões e tolerâncias. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5884**. Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico — Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11888**. Bobinas e chapas finas a frio e a quente de aço-carbono e de aço de alta resistência e baixa liga — Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**. Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

BECK, A.T. **StRAnD: Manual do usuário**. Escola de Engenharia de São Carlos — Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

BECK, A.T.; SOUZA JR, A.C. **A first attempt towards reliability-based calibration of Brazilian structural design codes**. Journal of the Braz. Soc of Mech. Sci & Eng. V.32, p. 119-127, 2010.

- BECK, A.T. **Confiabilidade e Segurança das Estruturas**, Elsevier, 448 páginas, 2019.
- ELLINGWOOD, B.; GALAMBOS, T.V.; MACGREGOR, J.G.; CORNELL, C.A. **Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58**. Us National Bureau of Standard A58, Special Publication 577. Washington, D.C, 1980.
- FREITAS, M.S.R.; CASTANHEIRAS, A.M.; FREIRAS, A.M.S. **Confiabilidade de vigas metálicas dimensionadas pela norma brasileira NBR 8800**. Revista Escola de Minas, V. 60, n. 2, p. 261-269, 2007.
- HASOFER, A.M.; LIND, N.C. **Exact and invariant second moment code format**. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, V. 100, n. EM1, p. 111-121, 1974.
- JCSS, 2001. **Probabilistic Model Code**, Joint Committee on Structural Safety, disponível em <https://www.jcss-lc.org/jcss-probabilistic-model-code>, acessado em 19/01/2020.
- SANTIAGO, W.C. **Calibração baseada em confiabilidade dos coeficientes parciais de segurança das principais normas brasileiras de projeto estrutural**, tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2019.
- SANTIAGO, W.C.; KROETZ, H.M.; BECK, A.T. **Reliability-based calibration of Brazilian structural design codes used in the design of concrete structures**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, V. 12, n. 6, p. 1288-1304, 2019.
- SANTIAGO, W.C.; KROETZ, H.M.; SANTOS, S.H.C.; STUCCHI, F.R.; BECK, A.T. **Reliability-based calibration of main Brazilian structural design codes**. *Latin American Journal of Solids and Structures*, Rio de Janeiro, V. 17, n. 1, p. 1-28, 2020.
- SOUZA JR, A.C. **Aplicação de confiabilidade na calibração de coeficientes parciais de segurança de normas brasileiras de projeto estrutural**, dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- THOFT-CHRISTENSEN, P.; MUROTSU, Y. **Application of structural systems reliability theory**. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- TURKSTRA, C.J. **Theory of Structural Design Decisions, Study No. 2**, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, 1970.