

SEGURANÇA ESTRUTURAL DE BARRAS EM PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO SUBMETIDAS A CARGA AXIAL DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO.

Giovanne de Lana Santana¹ (EG), André Luis Riqueira Brandão (PQ)¹, Washington Batista Viera (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá - Campus Theodomiro Carneiro Santiago

Palavras-chave: Confiabilidade. FORM. Tração. Compressão.

Introdução

Confiabilidade estrutural é o campo da engenharia que estuda a capacidade de uma estrutura em desempenhar sua função ao longo do tempo, sob condições de carga e ambiente previstas, sem falha. Envolve a análise de incertezas relacionadas a materiais, geometrias, ações e modelos de comportamento, utilizando métodos probabilísticos para avaliar o risco de falha. O objetivo é garantir que uma estrutura tenha uma probabilidade aceitavelmente baixa de falhar, mantendo a segurança e a funcionalidade durante sua vida útil projetada. Este trabalho se propõe a aplicar o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) para a avaliação da segurança estrutural de barras de perfis de aço formados a frio dimensionadas pelo Método da Resistência Direta (MRD) (ABNT NBR 14762:2010, AISI S100:2016), juntamente com a comparação entre os níveis de confiabilidade estrutural obtidos nas combinações das normas brasileira e americana. A análise é realizada considerando as diretrizes estabelecidas nas normas brasileira (ABNT NBR 8681:2003) e americana (ASCE 7-22), comparando os níveis de segurança obtidos para diferentes combinações de ações. Os parâmetros estatísticos das variáveis, como resistência dos materiais e ações aplicadas, são obtidos de fontes específicas para cada contexto normativo, permitindo uma avaliação detalhada da adequação dos fatores de segurança estabelecidos nos códigos.

Metodologia

Para atingir os objetivos da pesquisa foram analisadas as combinações de ações de cada norma. Foram selecionadas três combinações distintas, suficientes para maioria das situações de projeto, presentes na Tabela 1.

Tabela 1 - Combinações de ações para as normas ABNT NBR 8681:2003 e ASCE 7-22.

N.º	NBR	ASCE7-22
1	$1,25D_n + 1,5L_n$	$1,2D_n + 1,6L_n$
2*	$1,0D_n - 1,4W$	$0,9D_n - 1W_n$
3	$1,25D_n + 0,75L_n + 1,4W_n$	$1,2D_n + 0,5L_n + 1,0W_n$

*Nessa combinação a barra é tracionada, uma vez que a ação do vento é predominante em sentido contrário à gravidade.

Onde D é a representação de ‘dead load’ (peso próprio), L é ‘live load’ (sobrecarga) e W ‘wind load’ (ação de vento). O subscrito ‘n’ indica valores nominais. As combinações seguem o formato usual para equações de estado limite, onde γ são os coeficientes de ponderação da resistência, ϕ e R_n são o ‘Fator de resistência’ e Resistência nominal, respectivamente. Na NBR, em vez de ϕ , adota-se γ ($\gamma = 1/\phi$). Na Tabela 2 apresentam-se ϕ e γ das respectivas normas, para cada tipo de carga axial.

Tabela 2 - Fatores de resistência conforme estado limite para as normas ABNT NBR 8681:2003 e ASCE 7-22.

Estado Limite	NBR (γ)	ASCE7-22 (ϕ)
Compressão	1,20	0,85
Tração	1,10	0,90

A segurança estrutural é geralmente avaliada pela sua probabilidade de falha P_f , que é a chance dos efeitos das ações Q superarem a resistência R . Isso pode ser expresso como $P_f = P(R \leq Q)$. Usando a função de estado limite $G = R - Q$, a probabilidade de falha se torna $P_f = P(G \leq 0)$ onde $G \leq 0$ representa o domínio de falha. O índice de confiabilidade $\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f)$, com Φ^{-1} sendo a inversa da distribuição normal padrão. Normalizando a função de estado limite por D_n para facilitação da análise de confiabilidade e cálculos estatísticos, de modo que:

$$\frac{G}{D_n} = \frac{R_n}{D_n} \mathbf{X}_r^* - \frac{Q}{D_n} = \hat{G} \quad (1)$$

Para conveniência, letras maiúsculas com sobrescrito (*) são usadas para indicar variáveis aleatórias ao longo deste resumo. Normalizando assim a equação, sendo $\mathbf{X}_r^* = R/R_n$, uma associação às variáveis aleatórias relacionadas aos membros estruturais, e considerando o escopo deste estudo Q pode ser representado como uma combinação de processos aleatórios associados às ações D , L e W . Dessa forma é possível descrever a equação da seguinte maneira:

$$\hat{G} = \frac{R_n}{D_n} \mathbf{X}_r^* - \frac{(D + L + W)}{D_n} \quad (2)$$

Essas ações possuem diferentes características estatísticas de acordo com o tempo e espaço por ela presente, sendo assim muito complexa a aplicação. Para isso surgiu a regra de Turkstra que assume que quando uma das ações assumem seu valor máximo no tempo de vida da estrutura ou de um membro da estrutura (max), todas outras estarão no seu ponto arbitrário no tempo (apt), que diz respeito ao valor presente dessa ação, mas devido à baixa variabilidade inerente ao peso próprio, assume-se que a tanto no ponto arbitrário como no máximo são iguais, de modo que $D_{max} = D_{apt} = D$. Para simplificação, também se assume que a força de vento de ponto arbitrário no tempo é desprezível, uma vez que seu valor esperado é próximo de zero, de modo que $W_{apt} = 0$. Aplicando essas suposições e as normalizando, a Eq. simplifica para:

$$\frac{Q}{D_n} = \max \left[\begin{array}{c} \mathbf{X}_D^* + \frac{L_n}{D_n} \mathbf{X}_{L_{apt}}^* \\ \mathbf{X}_D^* + \frac{L_n}{D_n} \mathbf{X}_{L_{max}}^* \\ \mathbf{X}_D^* + \frac{L_n}{D_n} \mathbf{X}_{L_{apt}}^* + \frac{W_n}{D_n} \mathbf{X}_{W_{max}}^* \end{array} \right] \quad (3)$$

Onde \mathbf{X}_D^* é igual a D / D_n , $\mathbf{X}_{L_{apt}}^*$ é igual a L_{apt} / D_n , $\mathbf{X}_{L_{max}}^*$ é igual a L_{max} / D_n e $\mathbf{X}_{W_{max}}^*$ é igual a W_{max} / D_n , são as variáveis aleatórias normalizadas por D_n . Com a utilização do LRFD, a estrutura é projetada para o valor de Resistência R ser igual ao efeito de carga Q sob o estado limite de capacidade. Isso implica que a resistência dever ser igualada ao efeito das ações, por isso:

$$\frac{R_n}{\gamma_r} = R_n \phi = \sum_i \gamma_i Q_{n_i} \quad (4)$$

Normalizando a Eq. 4 e aplicando em ambas as normas, é encontrado os valores de R_n / D_n obtido pela

normalização e Q / D_n obtido na Eq. 3, então substituindo os valores na Eq. 1, é possível encontrar as seguintes equações:

$$\hat{G}_{NBR} = \gamma_r \max \left[\begin{array}{c} 1.25 + 1.5 \frac{L_n}{D_n} \\ 1.0 - 1.4 \frac{W_n}{D_n} \\ 1.25 + 0.75 \frac{L_n}{D_n} + 1.4 \frac{W_n}{D_n} \end{array} \right] \mathbf{X}_r^* - \max \left[\begin{array}{c} \mathbf{X}_D^* + \frac{L_n}{D_n} \mathbf{X}_{L_{apt}}^* \\ \mathbf{X}_D^* + \frac{L_n}{D_n} \mathbf{X}_{L_{max}}^* \\ \mathbf{X}_D^* + \frac{L_n}{D_n} \mathbf{X}_{L_{apt}}^* + \frac{W_n}{D_n} \mathbf{X}_{W_{max}}^* \end{array} \right] \quad (5)$$

$$\hat{G}_{AISI} = \frac{1}{\phi} \max \left[\begin{array}{c} 1.2 + 1.6 \frac{L_n}{D_n} \\ 0.9 - 1.0 \frac{W_n}{D_n} \\ 1.2 + 0.5 \frac{L_n}{D_n} + 1.0 \frac{W_n}{D_n} \end{array} \right] \mathbf{X}_r^* - \max \left[\begin{array}{c} \mathbf{X}_D^* + \frac{L_n}{D_n} \mathbf{X}_{L_{apt}}^* \\ \mathbf{X}_D^* + \frac{L_n}{D_n} \mathbf{X}_{L_{max}}^* \\ \mathbf{X}_D^* + \frac{L_n}{D_n} \mathbf{X}_{L_{apt}}^* + \frac{W_n}{D_n} \mathbf{X}_{W_{max}}^* \end{array} \right] \quad (6)$$

Assim chegando na formulação final para os cálculos, as variáveis aleatórias expressas acima como \mathbf{X}^* são baseadas em literaturas especializadas, e foram utilizados os valores encontrados na Tabela 3 e Tabela 4

Tabela 3 – Variáveis aleatórias das ações.

Ação	Distribuição	NBR14762:2010		ASCE 7-22	
		Bias(μ)	COV	Bias(μ)	COV
D^1	Normal	1,05	0,10	1,05	0,10
L_{apt}^1	Gamma	0,25	0,55	0,25	0,55
L_{50}^1	Gumbel	1,00	0,25	1,00	0,25
W_1^1	Gumbel	³ 0,33	³ 0,47	¹ 0,33	¹ 0,59
$W_{50}^{3,1}$	Gumbel	³ 0,90	³ 0,34	¹ 0,78	¹ 0,37
W_{700}^2	Gumbel	-	-	0,47	0,35

Tabela 4 – Variáveis aleatórias da resistência*.

Variáveis	Distribuição	Bias(μ)	COV
M ¹	Lognormal	1,10	0,10
F ¹	Lognormal	1,00	0,05
P ⁴	Lognormal	1,043	0,155

¹Ellingwood et al. (1980). ²McAllister, Wang, Ellingwood (2018).

³Beck (2020). ⁴Brandão (2012).

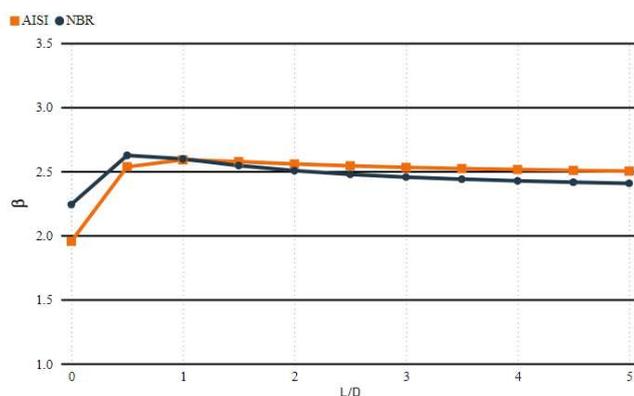
*Os valores de M, F e P não possuem diferença entre os países e suas respectivas normas.

Os coeficientes M, F e P dizem respeito as variáveis estatísticas do Material, Fabricação e o Erro do Modelo, respectivamente, que afetam diretamente a resistência da estrutura ou membro estrutural. Utilizando os dados estatísticos e fórmulas apresentadas no trabalho até então, e com a ajuda de planilha eletrônica é possível calcular β .

Resultados e discussão

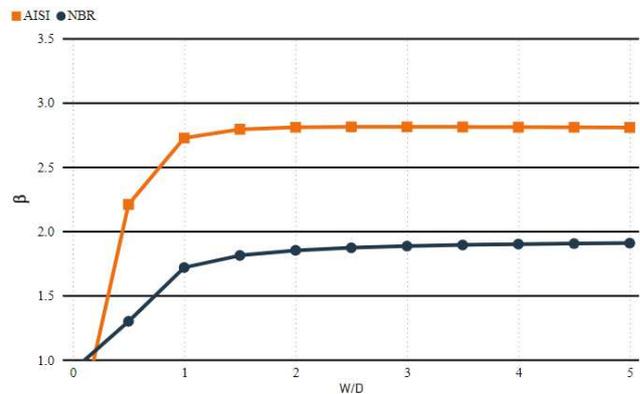
Os valores de β foram obtidos por meio do FORM, e para validação foi utilizado SMC (Simulação de Monte Carlo), ambos realizados em planilha eletrônica.

Figura 2 – Índice de confiabilidade em função de L_n/D_n para as normas NBR e AISI para a comb. 1.



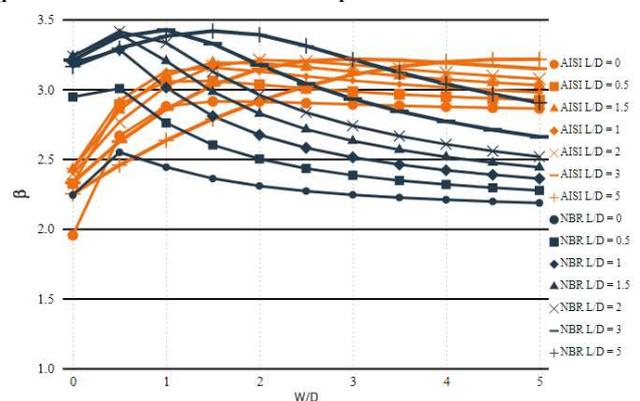
Na Figura 2 pode-se observar que os índices de confiabilidade das normas é muito próximo. Isso se dá pela baixa diferença das combinações e pela utilização dos mesmos valores para as variáveis estatísticas de D e L_{max} . Nota-se também que o índice de confiabilidade varia pouco em relação à razão L_n/D_n , Considerando que o índice de confiabilidade alvo é $\beta_0 = 2,5$, a norma AISI satisfaz a essa exigência para qualquer razão $L_n/D_n > 0,5$, enquanto a norma brasileira atende ao requisito para razões L_n/D_n entre 0,5 e 2,0, ficando com β ligeiramente inferior a β_0 para $L_n/D_n > 2,0$.

Figura 3 – Índice de confiabilidade em função de W_n/D_n para as normas NBR e AISI para comb. 2.



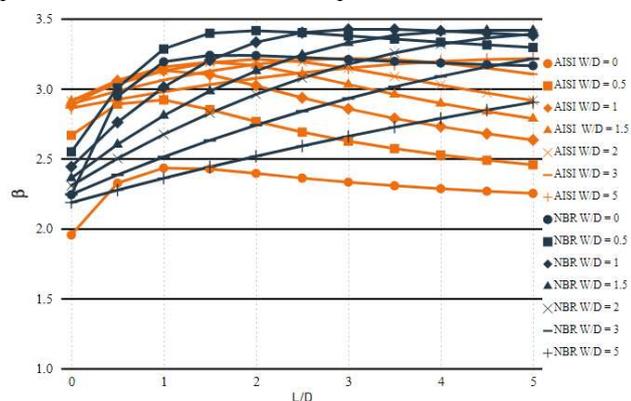
Para a comb. 2 apresentada na Figura 3 onde ocorre um caso de sucção ocasionada pela ação do vento, uma ação contrária a gravidade. Ellingwood et al. (1980) prevê um $\beta_0 = 2,0$ assumindo valores entre 2 e 5 para W_n/D_n , onde toda a curva da AISI se encontra acima do alvo no intervalo assumido, a curva da NBR ainda no mesmo intervalo não supera ou se iguala o alvo em nenhuma das razões, demonstrando uma AISI mais conservadora e uma NBR com valores apesar de próximos, abaixo do β_0 .

Figura 4 – Índice de confiabilidade em função de W_n/D_n para as normas NBR e AISI para comb. 3.



Na Figura 4 é possível visualizar que os β da NBR diminuem com o aumento da razão W_n/D_n já na AISI o inverso se faz presente, e com as curvas de L_n/D_n mais próximas por todo o eixo W_n/D_n , a NBR por outro lado encontra curvas mais afastadas entre si. A comb. 3 possui um $\beta_0 = 2,5$ podemos ver que a AISI a partir de valores de $W_n/D_n > 0,5$ superaram o alvo, alcançando valores superiores a 3, onde à uma estabilização em volta desse valor, aparentando conservadorismo, por outro lado a NBR quanto maior W_n/D_n e menor L_n/D_n maior a distância ao alvo, somente os valores de L_n/D_n acima de 2 se mantiveram acima do β_0 por todo o eixo de estudo.

Figura 5 – Índice de confiabilidade em função de L_n/D_n para as normas NBR e AISI para comb. 3.



Ainda analisando a comb. 3 com o eixo horizontal agora sendo L_n/D_n , podemos ver maiores distâncias entre as curvas da AISI, apesar de todas com exceção da curva de $W_n/D_n=0$ estão em sua maioria acima do β_0 por todo o intervalo, a citada curva ao contrário não esteve acima do alvo em nenhum momento do estudo, a NBR por outro lado durante o intervalo de $L_n/D_n \geq 2$, possui valores maiores que o alvo valores esses que ficaram mais próximos de $\beta = 3$, o que pode parecer conservadorismo por parte da NBR.

Conclusões

Na comb. 1 o β da AISI em sua maioria ultrapassa o β_0 . No caso da comb. 2 aplicada a NBR os resultados foram inferiores a β_0 durante toda razão W_n/D_n . No conjunto de curvas da comb. 3 é possível observar que o AISI possui menor área entre as curvas mínima e máxima para toda a faixa W_n/D_n , em comparação com a NBR. Sugere-se para NBR desenvolver uma análise de confiabilidade que inclua otimização com objetivo dos valores de β apresentarem maior uniformidade para ampla faixa de variação das razões de carregamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Unifei por disponibilizar a estrutura para suporte ao desenvolvimento deste trabalho, e a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Referências

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **AISI S100**: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. AISI, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE 7-**

22: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. Virginia, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681:2003**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

Beck. A.T. **Reliability-based calibration of main Brazilian structural design codes**. Latin American Journal of Solids and Structures, 2020.

Brandão, A. L. R. **Calibração do coeficiente de ponderação da resistência em barras e ligações de perfis formados a frio**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2012.

Ellingwood, B., Galambos, T.V., MacGregor, J.G., Cornell, C.A. **Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58**. U.S. National Bureau of Standard Special Publication 577. Washington, DC, 1980.

Hasofer, A. M.; Lind, N. C. **Exact and Invariant Second-Moment Code Format**. Journal of the Engineering Mechanics Division – ASCE, 100: 111-121, 1974.

McAllister, T. Wang, N. Ellingwood, B.R. **Risk-informed mean recurrence intervals for updated wind maps in ASCE 7-16**, J. Struct. Eng. 144 (5), 2018.

Rackwitz, R.; Fiessler, B. **Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences**. Computers and Structures, 9(5): 489-494, 1978.