

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO SUBMETIDO À COMPRESSÃO, CONSIDERANDO DIFERENTES COMBINAÇÕES DE AÇÕES.

Giovanne de Lana Santana¹ (IC), André L. R. Brandão¹ (PQ), Washington B. Vieira¹ (PQ).

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Colunas. Confiabilidade. Método FORM

Introdução

A segurança de colunas de aço formadas a frio depende não apenas de ações gravitacionais, mas também do vento, relevante em estruturas com alta relação resistência/massa. Esses perfis oferecem leveza e fácil fabricação, mas apresentam desafios de estabilidade. O método FOSM (First Order Second Moment) é amplamente usado pela simplicidade, embora limitado pela suposição de linearidade e uso apenas da média e variância, o que pode gerar imprecisões. O FORM (First Order Reliability Method) surge como alternativa mais robusta, pois lineariza a função de desempenho no ponto mais provável de falha, incorporando variáveis como modelo, geometria, resistência do material e carregamentos.

O Método da Resistência Direta (MRD) utiliza curvas calibradas para estimar a resistência de barras submetidas à compressão e/ou flexão, considerando modos local, distorcional, global e suas interações (Schafer, 2018 [1]). Validado por ensaios e simulações, está presente em normas brasileira (ABNT NBR 14762:2010 [2]), americana (SDI AISI-S100-24 [3]) e australiana (AS/NZS4600:2005 [4]). Neste trabalho, o MRD avalia o desempenho das colunas com combinações de ações segundo ASCE-05, ASCE-22 e NBR 8681. A comparação entre normas permite verificar o alinhamento aos índices de confiabilidade do LRFD, contribuindo para aprimorar práticas e recomendações de projeto em perfis formados a frio.

Metodologia

A segurança estrutural é quantificada pela probabilidade de falha (Pf), definida a partir da função de falha $G(.) = R - S$, onde ocorre falha quando a resistência é menor ou igual à sollicitação ($G \leq 0$). Assim, $P_f = P(G \leq 0)$, enquanto a confiabilidade é seu complemento, $C = 1 - P_f$.

A confiabilidade também pode ser expressa pelo índice β , cujo valor mínimo aceitável (índice

alvo) corresponde a um limite máximo de Pf, definido em função das consequências da falha e dos custos para aumentar a confiabilidade. A relação matemática entre β e Pf é dada pela equação 1.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (1)$$

Onde Φ^{-1} é a inversa da função de distribuição acumulada da normal padrão Φ ;

O FORM avalia a confiabilidade no espaço das variáveis reduzidas e independentes, mensurando a menor distância da função de falha até a origem. O método envolve a transformação das variáveis para o espaço normal padrão e a determinação do ponto de projeto por meio de otimização, geralmente com o algoritmo HLRF (Hasofer e Lind, 1974; Rackwitz e Fiessler, 1978).

A função de falha $G(.)$ pode ser reescrita em termos da resistência nominal (R_n), valores nominais do peso próprio (D_n) e da sobrecarga (L_n) e vento (W_n), além das variáveis aleatórias normalizadas adimensionais $\mathbf{R} = R/R_n$, $\mathbf{D} = D/D_n$ e $\mathbf{L} = L/L_n$, $\mathbf{W} = W/W_n$. Para não comprometer a precisão dos resultados ao utilizar uma única variável R na análise de confiabilidade adota-se $\mathbf{R} = \mathbf{MFP}$. Por conveniência, as variáveis aleatórias normalizadas são apresentadas em negrito. Na Equação 2, a variável R depende de incertezas das propriedades do material, da geometria da seção transversal e do erro do modelo representados pelas variáveis normalizadas adimensionais \mathbf{M} (fator material), \mathbf{F} (fator fabricação) e \mathbf{P} (fator profissional), respectivamente.

$$G(.) = R_n \mathbf{MFP} - (D_n \mathbf{D} + L_n \mathbf{L} + W_n \mathbf{W}) \quad (2)$$

Os critérios normativos de dimensionamento pelo método dos estados limites podem ser expressos pela Equação 3, quando o componente estrutural está sujeito a uma combinação de cargas gravitacionais ($D + L$).

$$\phi R_n \geq \gamma_D D_n + \gamma_L L_n + \gamma_W W_n \quad (3)$$

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Onde:

ϕ = coeficiente de ponderação da resistência;

γ_D = coeficiente de ponderação do peso próprio;

γ_L = coeficiente de ponderação da sobrecarga;

γ_W = coeficiente de ponderação da carga de vento.

A definição da função de falha $G(\cdot)$ para um componente de resistência nominal (R_n) conhecida, aplicação ϕ , γ_D e γ_L que transforme a equação normativa de estado limite numa igualdade. D_n e L_n são obtidos pela equação 4 e pela definição das razões de carregamento $\rho = L_n/D_n$ e $\alpha = W_n/D_n$.

$$D_n = \frac{\phi R_n}{\gamma_D + \rho \gamma_L + \alpha \gamma_W} \quad (4)$$

Ressalta-se que no formato de norma brasileira, substitui-se o coeficiente de ponderação da resistência ϕ por γ maior que a unidade. Os coeficientes de ponderação da resistência, para o estado limite de compressão são $\phi=0.85$ (AISI) e $\gamma=1.2$ (NBR).

Dentre as ações atuantes em uma estrutura, a ação do vento é uma das cargas que provoca grande impacto no dimensionamento, principalmente para estruturas constituídas por perfis leves. No Brasil, os critérios necessários para o cálculo dessa carga estão apresentados na NBR 6123:2023. Esta norma, que estava sem revisão desde 1988, foi atualizada trazendo consigo uma série de mudanças significativas. Entretanto, não foi obtido consenso no Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE) em relação a alterações para o mapa de isopletras (linhas de contorno que representam valores constantes da velocidade do vento).

A NBR 6123:2023 estabelece que os valores característicos das ações variáveis são definidos por consenso em normas específicas e correspondem a valores que possuem uma probabilidade de 25% a 35% de serem excedidos em 50 anos, no sentido desfavorável.

No contexto norte americano, engenheiros que estavam acostumados às velocidades do vento no ASCE 7-05 perceberam que as velocidades do vento ASCE 7-10 eram substancialmente mais altas. No ASCE 7-05, o mapa de velocidade do vento foi elaborado considerando um período de retorno (T) de 50 anos. Esse valor era aplicado universalmente a todas as construções, independentemente da sua categoria de importância ou risco. A principal mudança após a revisão desta norma foi a separação dos mapas de vento por categorias de risco, eliminando a necessidade do fator de importância. Com base nessa abordagem, um edifício típico passou de uma carga de vento de projeto de 50 anos (ASCE 7-05) para

uma carga de vento de projeto de 700 anos (ASCE 7-10). Entretanto, o coeficiente de ponderação da ação de vento passou de 1,6 (ASCE 7-05) para 1,0 (ASCE 7-10). A carga de vento é uma função da velocidade do vento ao quadrado, então efetivamente um fator de 1,6 na carga de vento é cerca de 1,26 na velocidade do vento. Se você multiplicar isso pelo mapa de velocidade do vento do ASCE 7-05, obterá velocidades aproximadamente iguais às do mapa do ASCE 7-10. Portanto, realizar os cálculos por meio do ASCE 7-05 e da versão mais atual resulta mudança pouco significativo no dimensionamento, dependendo da intensidade da carga de vento em comparação com as demais cargas atuantes na estrutura.

Na última atualização, o ASCE/SEI 7-22 refinou os mapas de vento para considerar eventos climáticos extremos e sua maior frequência, especialmente em regiões costeiras. Foram feitos ajustes nos coeficientes aerodinâmicos e na influência da topografia sobre a velocidade do vento.

O histórico de aplicação de métodos de confiabilidade para fins de calibração de normas mostrou que, para a maioria das situações de projeto, são suficientes as três combinações de carga [Ravindra e Galambos, 1978] mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. coeficientes de ponderação da resistência e coeficientes de ponderação das ações

#	Comb.	NBR 8681:2003	ASCE 7-22
1	D + L	1,25D + 1,5L	1,2D + 1,6L
2	D + L + W	1,25D + 1,5L + 0,84W ^a	1,2D + 1,6W + 1,0L ^c
		1,25D + 0,75L + 1,4W ^b	1,2D + 1,6W + 1,0L ^d

A NBR 8681 (2003) especifica os coeficientes de combinação Ψ para ações variáveis, que são utilizados para reduzir a carga nominal com base na probabilidade de que seu valor máximo não ocorra simultaneamente com outras ações. Em outras palavras, Ψ deve reduzir o valor extremo de uma determinada ação ao seu valor “em um instante arbitrário”, ou similar. Esses coeficientes refletem a variabilidade temporal das cargas e a baixa correlação estatística entre diferentes tipos de carregamento, como vento, sobrecarga de uso, entre outros. Assim, em combinações de ações, a carga variável principal é considerada em seu valor nominal ponderado, enquanto as demais ações variáveis são reduzidas por Ψ para representar a menor probabilidade de ocorrência conjunta de seus valores extremos. Em particular, adota-se a expressão $\gamma \Psi L$ para representar a carga variável reduzida em combinações de ações. Essa formulação pode ser escrita como “ $\gamma_{apt} \cdot L_{apt}$ ”, onde o subscrito “apt” indica um valor da carga variável em um instante

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

arbitrário no tempo, ressaltando a natureza estocástica dessas ações. Essa abordagem é essencial para evitar projetos excessivamente conservadores, garantindo segurança estrutural com realismo probabilístico.

A regra de Turkstra (Melchers & Beck, 2018) é o modelo de combinação de cargas mais simples e prático, e como tal serve de base para as combinações do LRFD. A regra de Turkstra assume que quando uma carga atinge seu valor máximo durante a vida útil de projeto de uma estrutura ou membro estrutural (geralmente 50 anos para a maioria dos tipos de ocupação), outras cargas devem estar em seus valores de ponto arbitrário no tempo (às vezes também referidos como valores instantâneos ou sustentados).

Os dados estatísticos referentes às variáveis aleatórias normalizadas associadas às cargas (D , L_{apt} , L_{50} e W_{max}) à resistência (M , F , P) e, que contribuem para a função desempenho, como seus tipos de distribuição, médias (μ) e coeficientes de variação (δ), estão disponíveis na literatura existente e são resumidos nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Dados estatísticos das variáveis aleatórias normalizadas para colunas.

Ação	μ	δ	FDP	Referência
D	1,05 D_n	0,10	Normal	Ellingwood et al. (1980)
L_{apt}	0,25 L_n	0,55	Gamma	Ellingwood et al. (1980)
L₅₀	1,00 L_n	0,25	Gumbel	Ellingwood et al. (1980)
W₁	0,33 W_n	0,59	Gumbel	Ellingwood et al. (1980)
W₅₀	0,78 W_n	0,37	Gumbel	Ellingwood et al. (1980)
W₇₀₀	0,47 W_n	0,47	Gumbel	McAllister, Wang, Ellingwood (2018)

Tabela 3. Dados estatísticos das variáveis M, F, P.

Variável	μ	δ	FDP	Referência
M	Lognormal	1.10	0.10	Ellingwood et al. (1980)
F	Lognormal	1.00	0.05	Ellingwood et al. (1980)
P	Lognormal	1.06	0.15	Freitas et al. (2013)

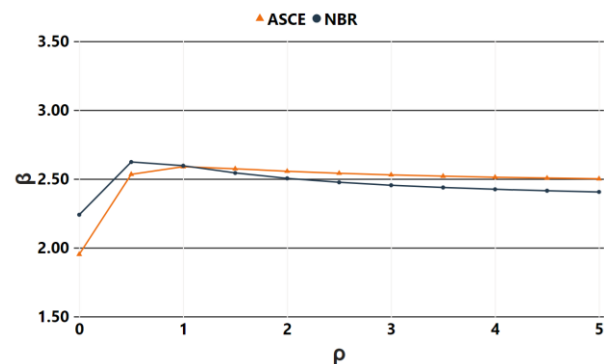
Resultados e discussão

Conforme apresentado na Fig. 1, observa-se que ambas as curvas de confiabilidade apresentam grande proximidade ao longo de toda a faixa de valores de ρ analisada, o que evidencia consistência entre os critérios de segurança adotados pelas duas normas, apesar das diferenças existentes nos fatores parciais de segurança aplicados às ações permanentes e variáveis.

Outro aspecto digno de nota refere-se ao fato de

que ambas as curvas permanecem acima do índice de confiabilidade-alvo ($\beta_0=2,5$). A curva da AISI [3]/ASCE [5][6] mantém-se acima desse limiar em toda a faixa de variação de ρ , ao passo que a curva da NBR [7] o faz apenas até aproximadamente $\rho = 2$. Tal comportamento evidencia a maior sensibilidade da formulação da NBR [7] às variações de ρ , sobretudo em cenários em que a ação variável apresenta caráter dominante.

Figura 1 – Variação do índice de confiabilidade de perfis formados a frio para as normas NBR e AISI para a combinação N.º 1 (D+L).



As Figuras 2 e 3 apresentam a variação do índice de confiabilidade β em função da razão $\rho=L_n/D_n$, considerando diferentes valores da razão $\alpha=W_n/D_n$, conforme indicado na legenda. Na Fig. 2, são comparadas as combinações de ações estabelecidas nas normas ASCE 7-05 (curvas em azul) e ASCE 7-22 (curvas em laranja), já na Fig. 3 as combinações da NBR 8681:2003 com L como ação principal (curvas em verde) e com W como ação principal (curvas em vermelho). Observa-se que, para os casos das normas da ASCE, os feixes de curvas apresentam baixa amplitude entre as mesmas, indicando uniformidade dos valores de β ao longo das variações de ρ e α . Essa uniformidade é desejável do ponto de vista da confiabilidade estrutural, pois sugere que a variação da razão entre ações não implica em flutuações críticas do desempenho. Além disso, a maioria das curvas se mantém acima do limiar de $\beta_0=2,5$ (alvo). Na comparação entre ASCE 7-05 e ASCE 7-22, nota-se que ambas as normas apresentam desempenho semelhante, com a ASCE 7-22 exibindo um leve aumento nos valores médios de β , especialmente para α maior que 2. Isso sugere um leve ganho de segurança com a adoção da nova combinação da ASCE 7-22.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Figura 2 – Variação do índice de confiabilidade de perfis formados a frio para as normas AISI para a combinação N.º 2 (D+L+W). β em função de ρ para ASCE7-5 e ASCE7-22

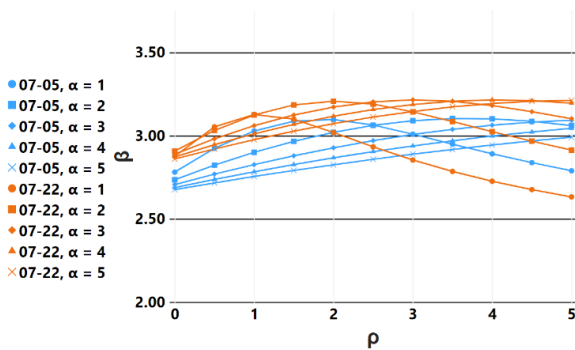
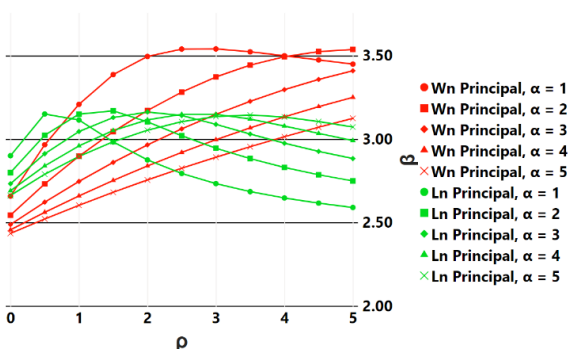


Figura 2 – Variação do índice de confiabilidade de perfis formados a frio para a NBR para a combinação N.º 2 (D+L+W). β em função de ρ para NBR 8681



Conclusões

Tanto NBR quanto ASCE fornecem níveis adequados de confiabilidade, mas a NBR mostrou maior sensibilidade às variações de carregamentos, sobretudo com o vento como ação principal. As combinações da ASCE se destacaram pela maior estabilidade de β e pelo desempenho consistente acima do alvo. Entre as versões, a ASCE 7-22 apresentou ganhos discretos em relação à 7-05, em parte pelo ajuste do coeficiente de ponderação do vento. Os resultados sugerem que a NBR pode ser aprimorada com modelos estatísticos mais atualizados e critérios de projeto baseados em confiabilidade, aproximando-se das práticas internacionais.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio de bolsa de iniciação científica do Programa

Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

Referências

- [1] SCHAFER, B. W. CUFSM 5.01 - Finite Strip Buckling Analysis of Thin-Walled Members. Department of Civil Engineering, Johns Hopkins University, Baltimore, USA, 2018.
- [2] NBR 14762 - Design of Cold-Formed Steel Structures (in Portuguese), ABNT, Rio de Janeiro, Brazil, 2010.
- [3] ANSI/SDI AISI-S100-2024, North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Washington, D.C: American National Standards Institute/Steel Deck Institute, 2024.
- [4] AS/NZS 4600:2005, Cold-Formed Steel Structures. Standards Australia/Standards New Zealand, 2005.
- [5] ASCE/SEI 7, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. USA: American Society of Civil Engineers, 2022.
- [6] NBR 8681 - Actions and safety of structures – procedure, ABNT, Rio de Janeiro, Brazil, 2003.
- [7] Hasofer, A. M., Lind, N. C. (1974). “Exact and Invariant First Order Reliability Format.” Journal of Engineering Mechanics Division 100:111–21.
- [8] Rackwitz, R., Fessler, B. (1978). “Structural Reliability under Combined Random Load Sequences.” Computers and Structures 9 (5): 489–94.
- [9] NBR 6123. NBR 6123 - Wind Loads in Buildings, ABNT, Rio de Janeiro, Brazil, 2023.
- [10] ASCE/SEI 7, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. USA: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [11] ASCE/SEI 7, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. USA: American Society of Civil Engineers, 2005.
- [12] Melchers, R.E., Beck, A.T. (2018) Structural Reliability Analysis and Prediction, 3rd edition, John Wiley and Sons.
- [13] Ellingwood, B., Galambos, T.V., MacGregor, J. G. and Cornell, C. A. (1980). Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58. NBS Special Publication 577. Washington, DC: U.S. Department of Commerce.
- [14] Freitas, M. S. R.; Brandão, A. L. R.; Freitas, A. R. (2013). Resistance Factor Calibration for Cold-Formed Steel Compression Members. REM International Engineering Journal, 66: 233-238, doi: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672013000200015>.
- [16] McAllister, T. P., Wang, N., & Ellingwood, B. R. (2018). Risk-informed mean recurrence intervals for updated wind maps in ASCE 7-16. Journal of Structural Engineering, 144(5), 06018001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002011](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002011)