[REEC] Revista Eletrônica de Engenharia Civil
Volume 21, N° 1, 2026 142 – 157
https://revistas.ufg.br/reec

MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA EM VIGAS COMPOSTAS DE PERFIS FORMADOS A FRIO: ANÁLISE DE CONFIABILIDADE EM DIFERENTES COMBINAÇÕES NORMATIVAS DE AÇÕES

Direct Strength Method in Built-Up Cold-Formed Steel Beams: Reliability Analysis Under Different Code-Specified Load Combinations

Marcelo Borges Pereira [1], André Luis Riqueira Brandão[2], Marcílio Sousa da Rocha Freitas[3]

PALAVRAS CHAVE:

Confiabilidade estrutural;
Perfis formados a frio;
Barras compostas;
Flexão;
Método da resistência direta.

KEYWORDS:

Structural reliability;
Cold-formed steel;
Built-up beams;
Bending;
Direct Strength Method.

RESUMO: Nas estruturas de aço formado a frio, a aplicação de vigas compostas (built-up) tem aumentado, sobretudo as de seções U. A crescente demanda por soluções econômicas levou ao desenvolvimento de barras compostas com maior capacidade de carga. Este artigo propõe a avaliação da confiabilidade de barras compostas dimensionadas pelo Método da Resistência Direta (MRD). Foi estabelecido um banco de dados abrangente, incluindo seções abertas e fechadas. Utilizando esse banco de dados, foi realizada uma análise estatística da variável "erro do modelo" e, posteriormente, foram conduzidas análises do índice de confiabilidade (β) para avaliar os níveis de segurança do MRD. A abordagem considerou um modelo em faixas finitas, que enfatiza a ação composta dos elementos que constituem a seção. Na análise de confiabilidade foram aplicadas as combinações de ações estabelecidas pelas normas AISI S100 (AISI, 2016) e NBR 14762 (ABNT, 2010). Além disso, foi realizada uma calibração dos coeficientes de ponderação da resistência, ϕ (AISI, 2016) e γ (ABNT, 2010), para cada índice-alvo de confiabilidade normativo. Os resultados evidenciaram a necessidade de ajustes nos coeficientes de ponderação da resistência atualmente adotados. Com base na análise realizada, valores mais apropriados seriam aproximadamente: $\phi_{LRFD} \approx 0{,}85$, $\phi_{LSD} \approx 0{,}70$ e $\gamma_{NBR} \approx 1{,}25$. Esses ajustes podem contribuir para um dimensionamento mais preciso e alinhado com as exigências de segurança e desempenho estrutural.

ABSTRACT: *In cold-formed steel structures, the use of built-up beams, particularly U-sections, has been increasing. The growing demand for cost-effective solutions has led to the development of built-up members with enhanced load-carrying capacity. This paper proposes a reliability assessment of built-up members by applying the Direct Strength Method (DSM). A comprehensive database was established, including both open and closed cross-sections. Using this database, a statistical analysis of the "model error" variable was performed, followed by reliability index (β) evaluations to assess the safety levels of DSM. The approach considered a finite strip model that emphasizes the composite action of the elements forming the section. In the reliability analysis, the load combinations prescribed by the AISI S100 (AISI, 2016) and NBR 14762 (ABNT, 2010) standards were applied. Furthermore, a calibration of the resistance factors, ϕ (AISI, 2016) and γ (ABNT, 2010), was conducted for each target reliability index specified in the codes. The results highlighted the need for adjustments to the currently adopted resistance factors. Based on the conducted analysis, more appropriate values would be approximately: ϕLRFD ≈ 0.85, ϕLSD ≈ 0.70, and γNBR ≈ 1.25. These adjustments can contribute to a more accurate design approach, better aligned with safety and structural performance requirements.*

*** Contato com os autores :**

[1] **e-mail: marcelo.borges@aluno.ufop.edu.br (M. B. Pereira)**
Engenheiro Civil, Mestre, Universidade Federal de Ouro Preto.

[2] **e-mail: andreriqueira@unifei.edu.br_ (A. L. R. Brandão)**
Engenheiro Civil, Doutor, Professor, Universidade Federal de Itajubá.

[3] **e-mail: marcilio@ufop.edu.br (M. S. R. Freitas)**
Engenheiro Civil, Doutor, Professor, Universidade Federal de Ouro Preto.

Publicado em 29 de junho de 2026.

ISSN: 2179-0612 DOI: 10.5216/reec.V21i1.81740

© 2026 REEC - Todos os direitos reservados.

1. INTRODUÇÃO

O uso de perfis de aço formados a frio na engenharia estrutural está aumentando devido à sua elevada eficiência estrutural, expressa pela relação entre resistência e peso, maior flexibilidade de fabricação e rapidez de instalação. Além dos benefícios das seções de perfil formado a frio, sua versatilidade garante a possibilidade de combinar várias seções individuais, formando barras compostas com maior rigidez torcional. Nessa configuração, os parafusos de fixação intermediários, distribuídos em pontos discretos ao longo do comprimento, impedem que os perfis individuais sofram flambagem de forma independente. Segundo Anbarasu (2019), devido à ação composta, o momento resistente das barras compostas é maior do que o soma das capacidades individuais.

Apesar destes benefícios, existem poucas diretrizes específicas em normas como a NBR 14762 (ABNT, 2010) e AISI S100 (AISI, 2016), principalmente sobre um método de dimensionamento das seções compostas. Nesse sentido, para o dimensionamento destas seções, geralmente, adota-se a soma das capacidades dos perfis individuais, o que resulta em uma abordagem excessivamente conservadora por parte dos engenheiros ao projetar barras compostas em perfis formados a frio com base apenas em sua experiência e julgamento (Georgieva et al., 2012).

O método de dimensionamento de perfis formados a frio adotado tanto na NBR 14762 (ABNT, 2010) quanto na AISI S100 (AISI, 2016) é o Método da Resistência Direta (MRD). De acordo Moen e Schafer (2011) este método é o mais abrangente e preciso para determinar a resistência de elementos em perfis formados a frio, pois permite que o projetista preveja a capacidade resistente de qualquer tipo de seção transversal.

Nesse sentido, estudos têm sido feitos para incorporar ao MRD o dimensionamento dessas seções de forma correta. Andrade (2023) conduziu uma pesquisa sobre o dimensionamento de barras compostas à compressão, usando o MRD. Seu trabalho descreve de forma detalhada, um procedimento para modelar os pontos de conexão entre os perfis que constituem uma barra composta, utilizando o software CUFSM (Schafer, 2018). Kumar, Anbarasu e Ganesh (2024) investigaram o comportamento estrutural e o dimensionamento de barras fletidas de aço formado a frio com seção I composta, com afastamento, utilizando modelos numéricos de elementos finitos e comparando com o MRD. Os resultados mostraram que o método é não conservador, e sugeriram equações modificadas do MRD para prever a capacidade à flexão dessas vigas considerando a obtenção do momento crítico de flambagem elástico por um método similar ao de Andrade (2023).

Pereira, Brandão e Freitas (2024) analisaram a confiabilidade de vigas compostas de perfis formados a frio submetidas à flexão, utilizando os métodos FOSM (First-Order Second-Moment Method), FORM (First-Order Reliability Method) e Simulação de Monte Carlo (SMC) para avaliar os índices de segurança com base nas combinações de ações LRFD (Load and Resistance Factor Design) e LSD (Limit States Design) da AISI S100 (AISI, 2016) e a combinação de ações da NBR (ABNT, 2010). A segurança estrutural das seções foi verificada utilizando o MRD, considerando uma base de dados experimentais com 35 protótipos. Os resultados mostraram que as seções abertas tiveram índices de confiabilidade superiores às fechadas e apenas a combinação LRFD atingiu o índice de confiabilidade alvo (β_0). Além disso, o MRD se mostrou adequado para essa configuração de projeto e o banco de dados reduzido.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento estrutural e a confiabilidade de seções compostas formadas a frio submetidas à flexão, com ênfase na adaptabilidade do MRD para estas barras e no desempenho das combinações de ações LRFD e LSD para a AISI S100 (AISI, 2016) e NBR 14762

(ABNT, 2010). Para alcançar esse objetivo, foi utilizado o banco de dados de Pereira (2025) e os momentos resistentes teóricos foram calculados e comparados aos resultados experimentais. Grupos de dados foram definidos a partir do tipo de seções e modo de flambagem, o erro de modelo (P) foi analisado estatisticamente e os índices β foram determinados utilizando os métodos FOSM, FORM e SMC. Além disso, os coeficientes de ponderação da resistência, foram calibrados para atender índices-alvo de confiabilidade de 2,5 (LRFD e NBR) e 3,0 (LSD).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

A segurança ou falha de uma estrutura tem sido tradicionalmente quantificada por meio de sua probabilidade de falha P_f, ou seja, a probabilidade de os efeitos das cargas S excederem a resistência estrutural R ou atingirem um determinado estado limite. Essa probabilidade pode ser expressa como $P_f = P(R \leq S)$. Ao introduzir a função de estado limite G(.) = R−S, tem-se que $P_f = P(g \leq 0)$, pois g ≤ 0 define o domínio de falha.

Uma das formas de determinar a probabilidade de falha é por meio da amostragem aleatória das variáveis da função de estado limite e do cálculo da probabilidade utilizando técnicas diretas de simulação de Monte Carlo. No entanto, esse método exige um número elevado de simulações para capturar com precisão a cauda inferior da função densidade de probabilidade. Por essa razão, ao longo das últimas décadas, foram desenvolvidas metodologias alternativas, incluindo os métodos analíticos de primeira ordem FOSM e o FORM. Uma vez que estes métodos permitem avaliar o índice de confiabilidade β e o método de simulação estima a probabilidade de falha, as relações matemáticas entre P_f e β são definidas pelas Equações 1 e 2.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) \quad \text{Eq. [1]}$$

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad \text{Eq. [2]}$$

Em que:

Φ = função de distribuição acumulada da normal padrão;

Φ^{-1} = inversa de Φ;

O método FOSM é uma abordagem simplificada que utiliza aproximações de primeira ordem e momentos estatísticos de segunda ordem (média e variância) para estimar a confiabilidade (Cornell, 1969; Ellingwood et al., 1980). O β pode ser avaliado então pela razão entre a média e o desvio padrão de G(.), conforme a Equação 3, ou ainda, em termos de distribuições lognormais, conforme a Equação 4.

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad \text{Eq. [3]}$$

$$\beta = \frac{ln\left(\frac{\mu_R}{\mu_S}\right)}{\sqrt{\delta_R^2 + \delta_S^2}} \quad \text{Eq. [4]}$$

Em que:

μ_G = média da função de estado limite;

σ_G = desvio padrão da função de estado limite;
μ_R = resistência média;
μ_S = solicitação média;
δ_R = coeficiente de variação da resistência;
δ_S = coeficiente de variação da solicitação.

O FORM é um aprimoramento do FOSM que considera a linearização da função de estado limite no ponto de projeto (X*) no espaço normal padrão. Na Transformação para espaço normal, as variáveis X são transformadas em variáveis normais padrão X'. O ponto de projeto no espaço reduzido (X'*) é o ponto na superfície de falha mais próximo da origem. Com a obtenção do ponto de projeto X'*, por meio de um problema de otimização, determina-se o β, que é a distância deste ponto até a origem, calculada pela Equação 5. Segundo Haldar e Mahadevan (2000) este método representa a probabilidade de falha de forma eficiente e aproximada.

$$\beta = |X'^*| \quad \text{Eq. [5]}$$

O método da Simulação de Monte Carlo (SMC) consiste em realizar amostras de variáveis básicas de acordo com suas características probabilísticas e então aplicá-las em uma função de falha (Ayyub e McCuen, 2011). A SMC é essencialmente um processo iterativo que gera soluções determinísticas para um problema, onde cada solução está associada a um conjunto específico de valores determinísticos de variáveis aleatórias subjacentes (Ang e Tang, 1984). A Equação 6 apresenta a função para determinação da probabilidade de falha. A precisão do método aumenta com o número de amostras, mas o custo computacional também cresce proporcionalmente.

$$P_f = \frac{n[G(X)\leq 0]}{N} \quad \text{Eq. [6]}$$

Em que:
N = quantidade de simulações feitas.

4. METODOLOGIA

4.1 MOMENTO RESISTENTE TEÓRICO

O cálculo do momento resistente teórico M_{Rk}, foi feito pelo MRD, onde M_{Rk} é o menor valor entre: o momento resistente à flambagem global M_{Re}, o momento resistente à flambagem local M_{Rl} e o momento resistente à flambagem distorcional M_{Rdist}. As Equações de 7 a 12 apresentam a formulação do MRD, conforme descrita na NBR 1762 (ABNT, 2010).

$$M_{Re} = \begin{cases} Wf_y & \text{para } \lambda_0 \leq 0,6 \\ 1,11\left(1-0,278\lambda_0^{\,2}\right)Wf_y & \text{para } 0,6 < \lambda_0 < 1,336 \\ \frac{Wf_y}{\lambda_0^{\,2}} & \text{para } \lambda_0 \geq 1,336 \end{cases} \quad \text{Eq. [7]}$$

Sendo:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Wf_y}{M_e}} \quad \text{Eq. [8]}$$

$$M_{Rl} = \begin{cases} M_{Re} & \text{para } \lambda_l \leq 0{,}776 \\ \left(1 - \frac{0{,}15}{\lambda_l^{0{,}8}}\right) \frac{M_{Re}}{\lambda_l^{0{,}8}} & \text{para } \lambda_l > 0{,}776 \end{cases} \quad \text{Eq. [9]}$$

Em que:,

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{Re}}{M_l}} \quad \text{Eq. [10]}$$

$$M_{Rdist} = \begin{cases} Wf_y & \text{para } \lambda_{dist} \leq 0{,}673 \\ \left(1 - \frac{0{,}22}{\lambda_{dist}}\right) \frac{Wf_y}{\lambda_{dist}} & \text{para } \lambda_{dist} > 0{,}673 \end{cases} \quad \text{Eq. [11]}$$

Sendo:

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{Wf_y}{M_{dist}}} \quad \text{Eq. [12]}$$

Em que:

M_e = momento fletor de flambagem elástica para o modo global;
M_{Rl} = momento fletor de flambagem elástica para o modo local;
M_{Rdist} = momento fletor de flambagem elástica para o modo distorcional;
λ_0 = índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global;
λ_l = índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local;
λ_{dist} = índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional;
W = módulo de resistência elástico da seção;
f_y = tensão de escoamento do aço.

Para a análise de estabilidade elástica, foi utilizado o programa CUFSM v5.01 ® (Schafer, 2018) para encontrar os esforços críticos de flambagem local e distorcional. As conexões entre as seções simples foram modeladas conforme sugerido por Andrade (2023). Para considerar a ação composta da seção, Andrade (2023) utilizou o programa CUFSM com modelagem por faixas finitas. As barras individuais foram conectadas por meio de vínculos entre nós correspondentes, inseridos no campo "General Constraints". Especificamente, foram impostas restrições para que determinados nós compartilhassem os mesmos graus de liberdade, permitindo que os perfis atuassem conjuntamente. Esse procedimento gera um modelo numérico mais eficiente em relação à consideração isolada de cada barra. Os valores de M_e foram calculados analiticamente (ABNT, 2010; AISI, 2016).

4.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE CONFIABILIDADE

A formulação do problema de confiabilidade, começa com a construção básica da função de estado limite, descrita na Equação 13, sendo R e S variáveis aleatórias.

$$G(.) = R - S \quad \text{Eq. [13]}$$

Em que:

G(.) = função de desempenho;
R = capacidade resistente;
S = solicitação (efeito das ações).

Reescrevendo a Equação 13 em termos de ações gravitacionais, tem-se a Equação 14.

$$G(.) = R - (D + L) \quad \text{Eq. [14]}$$

Em que:

D = peso próprio (dead load);

L = sobrecarga (live load).

Reorganizando a Equação 14, a função de desempenho pode ser reescrita em termos da resistência nominal (R_n), valores nominais do peso próprio (D_n) e da sobrecarga (L_n), conforme a Equação 15, além das variáveis aleatórias normalizadas **R** = R/R_n, **D** = D/D_n e **L** = L/L_n. Por conveniência, as variáveis aleatórias normalizadas são apresentadas em negrito.

$$G(.) = R_n \frac{R}{R_n} - (D_n \frac{D}{D_n} + L_n \frac{L}{L_n}) \quad \text{Eq. [15]}$$

A Equação 15 pode ser redefinida em função das variáveis aleatórias normalizadas, conforme a Equação 16.

$$G(.) = R_n \boldsymbol{R} - (D_n \boldsymbol{D} + L_n \boldsymbol{L}) \quad \text{Eq. [16]}$$

Na Equação 16, a variável R depende de incertezas das propriedades do material, da geometria da seção transversal e do erro do modelo representados pelas variáveis M (fator material), F (fator fabricação) e P (fator profissional), respectivamente. Assim, essa equação simplificada não permite uma análise isolada de uma única variável, o que pode comprometer a precisão dos resultados ao utilizar a variável R na análise de confiabilidade. Para superar essa limitação, adota-se **R** = **MFP**, conforme descrito na Equação 17.

$$G(.) = R_n \boldsymbol{MFP} - (D_n \boldsymbol{D} + L_n \boldsymbol{L}) \quad \text{Eq. [17]}$$

Os critérios de dimensionamento pelo método dos estados limites podem ser expressos pela Equação 18.

$$\phi R_n \geq c \sum_i \gamma_i S_{ni} \quad \text{Eq. [18]}$$

Em que:

$\boldsymbol{\phi}$ = coeficiente de ponderação da resistência;

$\boldsymbol{\gamma_i}$ = coeficientes de ponderação das ações que correspondem às combinações de ações normativas;

$\boldsymbol{S_{ni}}$ = ações nominais aplicadas em um componente estrutural;

c = fator de conversão proveniente da análise estrutural que converte as ações nominais aplicadas em efeitos de carga (cisalhamento, momento, etc.).

Para o estudo com as ações gravitacionais, peso próprio e sobrecarga, tem-se a Equação 19

$$\phi R_n \geq \gamma_D D_n + \gamma_L L_n \quad \text{Eq. [19]}$$

Em que:

$\boldsymbol{\gamma_D}$ = coeficiente de ponderação do peso próprio;

$\boldsymbol{\gamma_L}$ = coeficiente de ponderação da sobrecarga.

Na Equação 19, o lado esquerdo da desigualdade é a resistência de cálculo R_d, enquanto o lado direito é a solicitação de cálculo S_d de um elemento estrutural. A Equação 20 permite a obtenção da condição de igualdade, ou seja, $R_d = S_d$, desejável em um dimensionamento.

$$D_n = \frac{\phi R_n}{\gamma_D + \rho\gamma_L} \quad \text{Eq. [20]}$$

Em que:

ρ = razão entre as solicitações L_n/D_n.

Ressalta-se que no formato da norma NBR 14762 (ABNT, 2010), R_d é obtida por meio do coeficiente de ponderação aplicado como um divisor, sendo $R_d = R_n/\gamma$. A Tabela 1 apresenta os coeficientes de ponderação da resistência, em termos de ϕ e γ, os coeficientes de ponderação das ações normativas e a razão de carregamento entre as solicitações usuais em estudos de confiabilidade de perfis formados a frio. Vale ressaltar que como a NBR 14762 (ABNT, 2010) não preconiza um valor de ρ para sua calibração, foi adotado neste trabalho ρ = 5, especificado pela AISI S100 (AISI, 2016) na filosofia de projeto LRFD.

TABELA 1: Dados de entrada das combinações de ações.

Norma	$\phi(\gamma)$	γ_D	γ_L	ρ	β_0
AISI S100 (LRFD)	0,90 (1,11)	1,20	1,60	5,0	2,5
AISI S100 (LSD)	0,90 (1,11)	1,25	1,50	3,0	3,0
NBR 14762	0,91 (1,10)	1,25	1,50	5,0	2,5

FONTE: Autoria Própria.

4.3 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

4.3.1 Estatísticas do erro do modelo

Foram mapeados trabalhos na literatura para compor o banco de dados para a obtenção dos valores do momento resistente experimental M_{exp} e as características geométricas e mecânicas dos protótipos. Para isso, foram priorizados trabalhos relevantes, com variabilidade nas medidas do protótipo, seções compostas a partir de outras do tipo U simples e U enrijecido, duplamente simétricas e que tivesse os dados necessários para modelar as seções no programa CUFSM v5.01® (Schafer, 2018) e calcular o M_{Rk}. Desse modo, após a aplicação dos critérios de seleção, o banco de dados foi finalizado com 9 trabalhos, totalizando 148 protótipos de barras submetidas à flexão. Destes, 87 eram de seções abertas e 61 de seções fechadas. A Tabela 2 apresenta um resumo das características dos trabalhos incluídos no banco de dados de Pereira (2025).

TABELA 2: Resumo das características de cada trabalho do banco de dados.

Trabalho	Número por seções		Tipo de ligações	Geometria da seção
	Abertas	Fechadas		
Chen *et al.* (2021)	2		parafuso	
Roy *et al.* (2021)	12		parafuso	
Yao *et al.* (2020)	15		parafuso	
Zhou e Shi (2011)	9		solda	
Ye *et al.* (2019)	6		parafuso	
Chea (2017)		20	parafuso	
Laím, Rodrigues e Silva (2013)	3	3	parafuso	
Wang e Young (2015)	22	21	parafuso	
Wang e Young (2018)	18	17	parafuso	

FONTE: Autoria Própria.

A Figura 1 ilustra os gráficos com os valores de M_{exp} dos protótipos e a curva que representa os valores dos momentos resistentes teóricos para o modo de flambagem local, distorcional e global considerando as seções abertas e fechadas. O eixo vertical é normalizado pelo momento de escoamento M_y e o eixo horizontal é o índice de esbeltez λ dos protótipos.

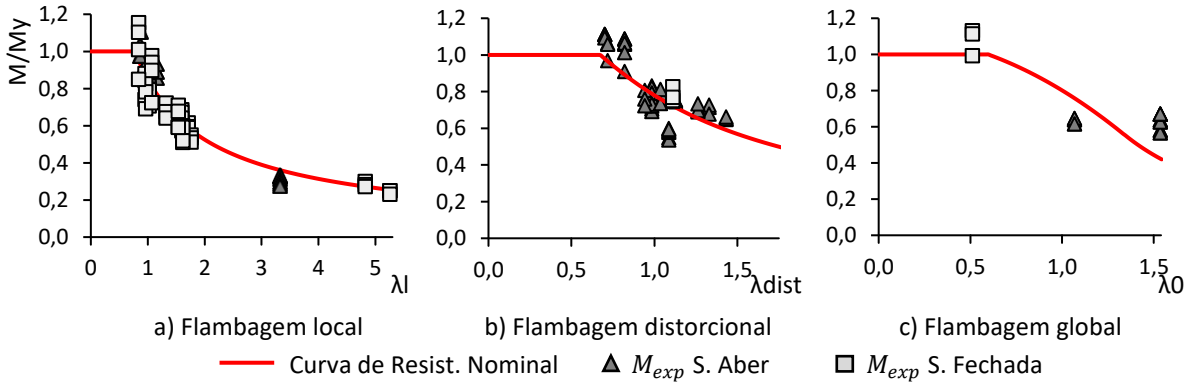

FIGURA 1: Comparação dos resultados experimentais dos protótipos de cada modo de flambagem com os valores nominais

FONTE: Autoria própria

De forma geral, a previsão para os modos de falha seguiu o padrão esperado, com a maioria das seções abertas falhando pelo modo distorcional e as seções fechadas iniciando a falha pelo modo local de flambagem. A posição das conexões dos tipos de seções explica este resultado, já que para o caso das seções abertas a conexão na alma facilita o modo distorcional nas mesas e a conexão nas mesas, para as seções fechadas, dificultam este modo, fazendo com que falhem pelo modo local de flambagem. Uma quantidade pequena dos protótipos falhou pelo modo de flambagem global, já que haviam poucos protótipos com comprimento longo.

Para os modos de flambagem local e distorcional, os momentos experimentais se adequam bem à tendência da curva de resistência nominal, especialmente para o modo local. Ainda assim, as seções fechadas estiveram, em sua maioria, acima da curva, o que indica resultados ligeiramente conservadores. Além disso, os momentos experimentais no modo distorcional concentraram-se no início do regime elástico da curva, indicando uma baixa variabilidade nos valores de λ.

Nesse sentido de comparação entre resultados teóricos com observações experimentais, nasce o conceito da variável estatística P (fator profissional), também denominada erro do modelo. No contexto deste estudo, fator profissional pode ser definido como a razão entre o momento fletor obtido experimentalmente e o momento fletor resistente.

A partir da configuração dos gráficos da Figura 1, os grupos de dados para o estudo da variável P foram definidos, dividindo o banco de dados em grupos a partir da quantidade de dados considerando a divisão por tipo de seções e depois por modos de falha. Portanto, foi criado um grupo com todos os dados, chamado de “Todos” e outro grupo com todas as seções abertas, chamado de “Abertas”. Entre as seções abertas, criou-se os grupos “A-Local”, “A-Dist.” e “A-Global”, com os protótipos que iniciaram a falha pelo modo local, distorcional e global, respectivamente. Criou-se ainda, o grupo “F-Local”, composto por protótipos de seções fechadas que apresentaram falha por flambagem local.

A variável P foi então tratada, a partir de cada agrupamento escolhido, como uma variável aleatória. Utilizando o programa MINITAB 19 ® (MINITAB LLC, 2019), foi selecionada, por meio do teste de aderência de Anderson-Darling, a distribuição de probabilidade que melhor representa os dados da variável aleatória. Para isso, foram consideradas as seguintes funções densidade de probabilidade (FDP): Normal, Lognormal, Gumbel de mínimo, Weibull e Gama. A Tabela 3 apresenta os dados estatísticos de P para cada grupo de dados.

TABELA 3: Estatísticas do coeficiente profissional dos grupos de dados

Grupo de dados	Nº	μ	σ	δ	FDP ajustada
Todos	148	1,018	0,133	0,131	Normal
Abertas	87	1,036	0,153	0,148	Weibull
A-Local	23	1,034	0,143	0,138	Weibull
A-Dist.	55	1,023	0,115	0,113	Weibull
A-Global	9	1,204	0,293	0,244	Normal
F-Local	54	0,983	0,092	0,093	Lognormal

FONTE: Autoria Própria.

De modo geral, os valores médios de P para cada grupo de dados estão próximos de 1,0 com variação de, no máximo, 0,04 para mais e menos, com exceção do grupo A-Global. Além disso, os outros grupos apresentam baixos valores de δ, o que indica baixa dispersão nos resultados em torno da média. Isso pode contribuir para menores valores de probabilidade de falha, a depender também da FDP, e confirma que o MRD se ajusta razoavelmente bem para esse banco de dados.

4.3.2 Estatísticas das demais variáveis

Na Tabela 4 são mostrados os dados estatísticos das variáveis do problema, ou seja, média μ, desvio padrão σ, coeficiente de variação δ e FDP das variáveis normalizadas **M**, **F**, **D** e **L**. Os valores destas variáveis foram sugeridos por Ellingwood et al. (1980).

TABELA 4: Dados estatísticos das variáveis aleatórias normalizadas.

Variável	M	M*	F	D	L
μ	1,10	1,00	1,00	1,05	1,00
σ	0,11	0,06	0,05	0,10	0,25
δ	0,10	0,06	0,05	0,10	0,25
FDP	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Normal	Gumbel de máximo

***Específico para o caso de vigas sujeitas à flambagem lateral com torção (flambagem global)**

FONTE: Autoria Própria.

4.4 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

De forma resumida, da definição da função de desempenho à aplicação dos métodos de confiabilidade, os seguintes passos foram realizados:

– Definir os dados de entrada ϕ (ou γ), γ_D, γ_L e ρ;

– Atribuir um valor para a R_n e calcular Ln e Dn utilizando a Equação 20;

– Definir os dados de entrada das variáveis normalizadas. As estatísticas de M, F, D e L são obtidas da literatura enquanto a variável P vem do estudo estatístico;

– Montar a função G(.) como mostra a (Equação 17);

– Implementar os métodos de confiabilidade FOSM, FORM, SMC, usando no programa Microsoft Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2016).

O índice de confiabilidade de acordo com o método FOSM foi inicialmente apresentado em termos de média e coeficiente de variação da resistência e da solicitação (Equação 4). Como R pode ser escrito em função de M, F e P, e S em função de D e L, a formulação do índice de confiabilidade pode ser reescrita em termos da média e variância destas variáveis coeficiente de variação das variáveis:

$$\beta = \frac{ln\left(\frac{\frac{\gamma_D+\rho\gamma_L}{\mu_D+\rho\mu_L}(\mu_M\mu_F\mu_P)}{\emptyset}\right)}{\sqrt{\delta_M^2+\delta_F^2+\delta_P^2+\left(\frac{\sqrt{\left(\frac{\mu_D}{\rho}\delta_D\right)^2+(\mu_L\delta_L)^2}}{\left(\frac{\mu_D}{\rho}+\mu_L\right)}\right)^2}} \quad \text{Eq. [21]}$$

Em que:

μ_D = média do peso próprio;

μ_L = média da sobrecarga;

μ_M = média do fator material;

μ_F = média do fator fabricação;

μ_P = média do fator profissional;

δ_M = coeficiente de variação do fator material;

δ_F = coeficiente de variação do fator fabricação;

δ_P = coeficiente de variação do fator profissional;

δ_D = coeficiente de variação do peso próprio;

δ_L = coeficiente de variação da sobrecarga.

O FORM é uma abordagem amplamente utilizada para avaliar a confiabilidade estrutural, determinando o índice de confiabilidade a partir da aproximação de primeira ordem da função de desempenho. As etapas do método são: (a) definição da função de desempenho (Equação 17) formulada com base na equação de estado limite; (b) escolha do ponto de projeto inicial, a partir das médias das variáveis aleatórias; (c) cálculo da média e desvio padrão equivalentes das variáveis não normais (transformação para o espaço normal); (d) cálculo das derivadas parciais da função de desempenho em relação às variáveis, obtidas no ponto de projeto e ajustadas para o espaço normal padrão; (e) o ponto de projeto é ajustado iterativamente para se aproximar do estado mais provável de falha; (f) o critério de convergência do FORM foi atendido com 5 iterações, pois o erro entre dois valores consecutivos do índice de confiabilidade permaneceu sempre menor que 10^{-5} (tolerância definida neste trabalho).

A SMC é um método probabilístico utilizado para estimar a confiabilidade estrutural por meio da geração de amostras aleatórias das variáveis envolvidas. A partir dessas amostras, calcula-se a função de falha do sistema e determina-se a probabilidade de falha pela razão entre o número de simulações que resultam em falha e o total de simulações realizadas. A Simulação de Monte Carlo foi implementada no Excel com 500 mil iterações, representadas por linhas da planilha, garantindo boa precisão e eficiência do método. Para cada linha, as variáveis aleatórias foram geradas conforme suas distribuições, e uma fórmula identificou as falhas ao avaliar a função de desempenho. A função inversa da distribuição normal padrão acumulada, disponível no Excel foi usada para obtenção do índice de confiabilidade.

Também foi realizada a calibração dos coeficientes de ponderação da resistência utilizando os métodos de confiabilidade implementados. Nesse processo, os coeficientes são obtidos ao se estabelecer um. A função "Atingir Meta", disponível no Excel, permite a definição de uma meta (βo) e calcula automaticamente um dos valores de entrada (ϕ ou γ), necessário para atingi-la.

5. RESULTADOS

5.1 ÍNDICE DE CONFIABILIDADE

A Figura 2 apresenta os gráficos com os valores de β. Cada grupo de barras nos gráficos representa uma combinação das normas e os valores de β_0 estão marcados com uma linha em vermelho para a combinação LSD e em amarelo paras as combinações LRFD e NBR.

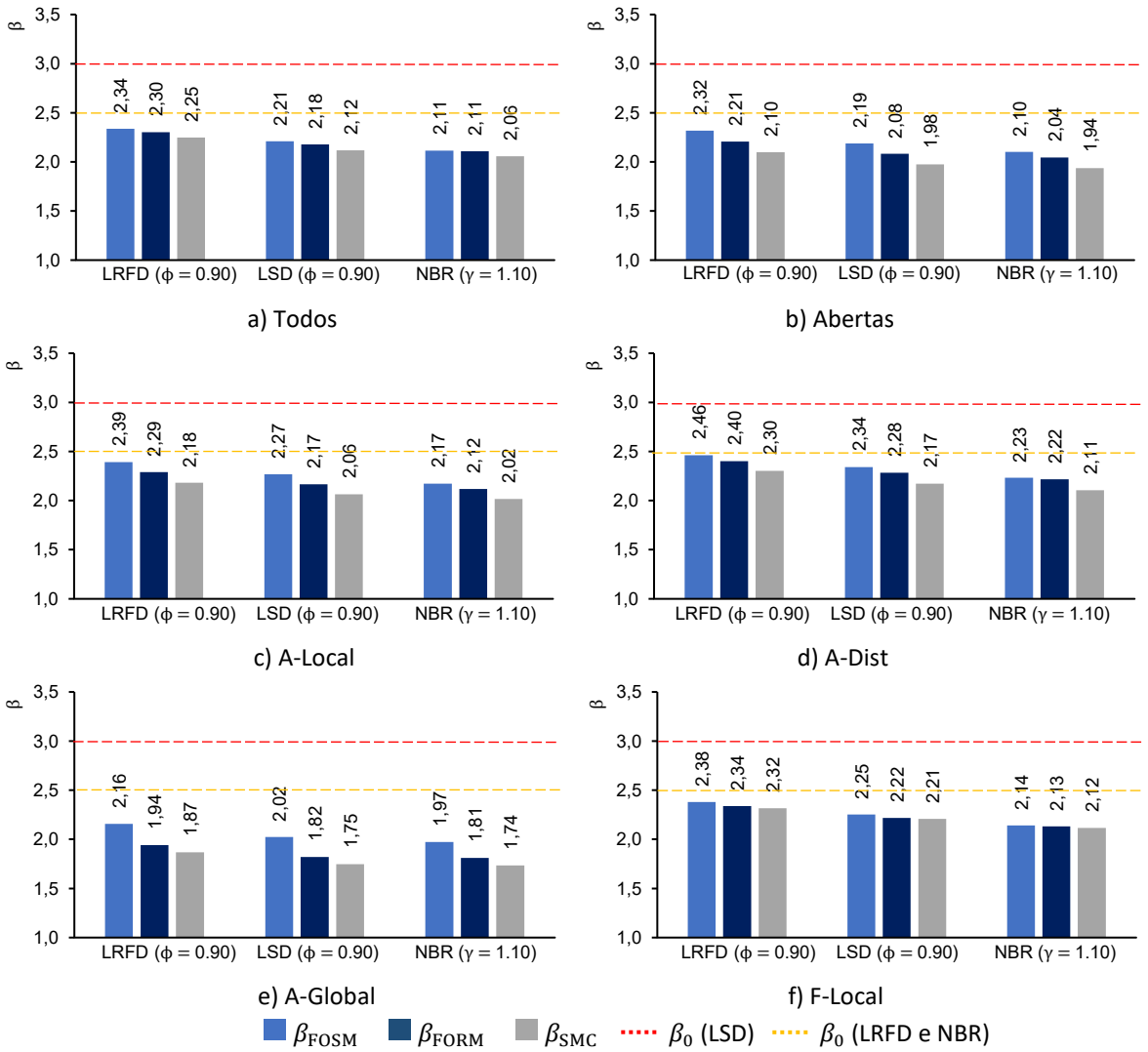

FIGURA 2: Índices de confiabilidade pelos métodos FOSM, FORM e SMC de cada grupo todos para as três combinações estudadas

FONTE: Autoria própria

Como esperado, os índices de confiabilidade obtidos pelo método FORM se mostraram mais próximos aos obtidos via SMC na maioria dos grupos, em comparação com o FOSM, conforme também verificou Toledo, Freitas e Brandão (2021). Esse comportamento é observado especialmente no grupo F-Local. Isso acontece porque o FORM considera todos os dados estatísticos das variáveis aleatórias, faz a transformação das variáveis aleatórias em normais padrão, além de incorporar o conceito do ponto mais provável de falha.

De modo geral, o grupo de dados que apresentou valores de β mais próximos aos seus alvos para as três combinações de norma consideradas foi o "A-Dist.". Por outro lado, o grupo com os valores de β mais distantes dos seus alvos para essas combinações foi o "A-Global". O desempenho deste grupo pode ter sido comprometido pela baixa quantidade de dados experimentais, reduzindo a precisão dos resultados e o problema da quantidade limitada de dados está relacionado às estimativas imprecisas de μ e σ, afetando β.

Destaca-se também que a combinação de norma com os maiores valores de β em todos os grupos de dados foi a LRFD e a combinação com os menores valores de β foi a NBR. No entanto, nenhuma combinação de norma alcançou seu β_0, embora a LRFD (β_0 = 2,5) chegou mais perto, especialmente no grupo de dados "A-Dist.". A combinação LSD (β_0 = 3,0) esteve consideravelmente longe para todos os grupos de dados e a filosofia de projeto da NBR ocupou um lugar intermediário.

5.2 COEFICIENTE DE PONDERAÇÃO DA RESISTÊNCIA

A Tabela 5 apresenta os coeficientes de ponderação da resistência calibrados. No geral, os coeficientes mais próximos dos adotados nas normativas consideradas foram os da combinação LRFD e os mais longes foram os da combinação LSD, como esperado. O grupo "A-Global" foi o que obteve os coeficientes de ponderação da resistência mais distantes do seu alvo, chegando a 0,44 na combinação de ações LSD para o FORM, na norma americana (AISI, 2016). Já para a norma brasileira (ABNT, 2010) o valor calibrado de γ foi de 1,57, também para o FORM. Este resultado reflete tanto o estudo da variável P, onde este grupo obteve as médias mais distantes de 1 e maiores δ, quanto nos índices de confiabilidade, que obtiveram os menores valores de β, em comparação com os outros grupos.

TABELA 5: Coeficientes de ponderação da resistência calibrados.

Grupo de Dados	Método	Combinações		
		LRFD	LSD	NBR
Todos	FOSM	ϕ = 0,86	ϕ = 0,74	γ = 1,22 (ϕ = 0,82)
	FORM	ϕ = 0,85	ϕ = 0,70	γ = 1,24 (ϕ = 0,80)
Abertas	FOSM	ϕ = 0,86	ϕ = 0,73	γ = 1,23 (ϕ = 0,81)
	FORM	ϕ = 0,81	ϕ = 0,63	γ = 1,31 (ϕ = 0,77)
A-Local	FOSM	ϕ = 0,87	ϕ = 0,74	γ = 1,20 (ϕ = 0,83)
	FORM	ϕ = 0,83	ϕ = 0,66	γ = 1,26 (ϕ = 0,79)
A-Dist.	FOSM	ϕ = 0,89	ϕ = 0,77	γ = 1,18 (ϕ = 0,85)
	FORM	ϕ = 0,87	ϕ = 0,71	γ = 1,21 (ϕ = 0,83)
A-Global	FOSM	ϕ = 0,80	ϕ = 0,66	γ = 1,31 (ϕ = 0,76)
	FORM	ϕ = 0,67	ϕ = 0,44	γ = 1,57 (ϕ = 0,64)
F-Local	FOSM	ϕ = 0,87	ϕ = 0,75	γ = 1,20 (ϕ = 0,83)
	FORM	ϕ = 0,86	ϕ = 0,72	γ = 1,23 (ϕ = 0,81)

FONTE: Autoria Própria.

Embora os valores de ϕ para a combinação de ações no método LRFD estejam próximos ao adotado na norma AISI S100, ao considerar o projeto de barras submetidas à flexão com seções compostas de perfis formados a frio pelo método MRD, o valor especificado na AISI S100 (ϕ = 0,90) está inseguro. A favor da segurança, seria necessário reduzir ϕ para um valor de 0,81 nesta combinação de ações, se for desconsiderado o grupo "A-Global".

Para a combinação LSD, o valor de ϕ precisaria ser reduzido consideravelmente para que os índices de confiabilidade alcançassem o alvo estabelecido pela AISI S100. Para que esta combinação se torne segura para os grupos além do "A-Global", o ϕ precisaria ser reduzido de 0,90 para 0,63. Para a norma brasileira, o γ adotado também está inseguro para o projeto de barras fletidas em seções compostas de perfis formados a frio. No entanto, a mudança no valor de γ é menos brusca que para a LSD, sendo um aumento de 1,10 para 1,31, a favor da segurança, se for desconsiderado o grupo "A-Global".

O grupo com resultados de coeficiente de ponderação da resistência que necessitariam de menores ajustes naqueles adotados pelas normativas consideradas é o "A-Dist.". Os valores de ϕ para este caso precisariam ser reduzidos de 0,90 para 0,87 e 0,71 para o LRFD e LSD, respectivamente, e o γ precisaria aumentar de 1,10 para 1,21, todos considerando a calibração pelo método FORM. Este resultado já era esperado, já que este grupo também apresentou bom desempenho nas outras análises, devido seu baixo coeficiente de variação.

Os novos valores dos coeficientes de ponderação da resistência foram sugeridos considerando o FORM porque, além de apresentar maior precisão que o método FOSM, conforme observado anteriormente, ele tem sido amplamente aceito devido a sua eficiência, recomendado pela JCSS (Joint Committee on

Structural Safety) (Yang, Li e Cheng, 2006). Assim, embora a maioria dos coeficientes de ponderação da resistência calibrados pelo método FOSM sejam mais próximos daqueles adotados pelas recomendações estudadas, os valores de ϕ e γ foram calibrados pelo método FORM.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo investigar o comportamento estrutural e a confiabilidade de vigas compostas de perfis formados a frio, com ênfase na avaliação do MRD e no desempenho das diferentes combinações de ações. Para isso, a partir de um banco de dados, os momentos nominais foram comparados aos experimentais no estudo do erro de modelo, valores de β foram calculados pelos métodos FOSM, FORM e SMC e os coeficientes de ponderação da resistência foram calibrados para o β_0 de cada combinação de norma. Assim, as principais conclusões são:

- O MRD se adapta bem a essa configuração de projeto, sem grandes diferenças entre os valores de M_{Rk} e M_{exp} e a variável P corroborou essa análise, com a maioria dos grupos apresentando baixa dispersão, indicando boa confiabilidade nos resultados;
- O método FORM demonstrou maior precisão que o FOSM, aproximando-se mais dos valores obtidos pelo SMC;
- O grupo "A-Global" apresentou valores de β mais distantes do seu alvo, provavelmente, devido a baixa quantidade de dados. No entanto, mais estudos precisam ser realizados para avaliar o comportamento para o modo global a partir de um maior banco de dados;
- O β de nenhuma combinação de ações atingiu seu alvo, mas o β da LRFD foi a mais próxima para seções compostas de perfis formados a frio, enquanto a LSD foi a mais distante, confirmando os resultados da literatura;
- Com base na análise realizada, valores mais adequados seriam aproximadamente: $\phi_{LRFD} \approx 0{,}85$, $\phi_{LSD} \approx 0{,}70$ e $\gamma_{NBR} \approx 1{,}25$. Esses ajustes podem aprimorar a precisão do dimensionamento, garantindo uma melhor conformidade com os requisitos de segurança e desempenho estrutural.

7. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

ANBARASU, M. **Simulation of flexural behaviour and design of cold-formed steel closed built-up beams composed of two sigma sections for local buckling**. Engineering Structures, 2019, p. 549-562.

ANDRADE, C. P. **Resistência e Segurança de Barras de Seções Compostas (Built-Up) de Perfis Formados a Frio Submetidas à Força Axial de Compressão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

ANG, A. H. S.; TANG, W. H. **Probability Concepts in Engineering Planning and Design**. John Wiley & Sons, v. 2, 1984.

AYYUB, B. M.; MCCUEN, R. H. **Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists**. 3. ed. College Park, USA: Taylor & Francis Group, LLC, 2011.

CHEA, B. **Experimental and Numerical Study on Cold-formed Steel Built-up Box Beams**. Dissertação (Mestrado) – Sirindhorn International Institute of Technology, Surabaya, Indonésia, 2017.

CHEN, B.; ROY, K.; FANG, Z.; UZZAMAN, A.; RAFTERY, G.; LIM, J. B. P. **Moment capacity of back-to-back cold-formed steel channels with edge-stiffened holes, un-stiffened holes, and plain webs**. Engineering Structures, Auckland, 2021.

CORNELL, C. A. **A Probability-Based Structural Code**. Journal of the American Concrete Institute, 1969, p. 974–985.

ELLINGWOOD, B.; GALAMBOS, T. V.; MACGREGOR, J. G.; CORNELL, C. A. **Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58: Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures**. National Bureau of Standards, Washington, DC, 1980.

GEORGIEVA, I. B.; SCHUEREMANS, L.; PYL, L.; VANDEWALLE, L. **Experimental investigation of built-up double-Z members in bending and compression**. Thin-Walled Structures, 2012, p. 48-57.

HALDAR, A.; MAHADEVAN, S. **Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design**. New York, NY: [s.n.], 2000.

KUMAR, S. K.; ANBARASU, M.; GANESH, G. M. **Flexural behaviour and design of hybrid cold-formed steel built-up I-section beams**. Structures, 2024.

LAÍM, L.; RODRIGUES, J. P. C.; SILVA, L. S. **Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams**. Thin-Walled Structures, Coimbra, 2013.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Excel 2016**. 2016.

MINITAB LLC. **Minitab 19**. 2019.

MOEN, C. D.; SCHAFER, B. W. **Direct Strength Method for Design of Cold-Formed Steel Columns with Holes**. Journal of Structural Engineering, 2011, p. 559-570.

PEREIRA, M. B.; BRANDÃO, A. L. R.; FREITAS, M. S. R. **Reliability of built-up cold-formed beams subjected to bending**. XLV Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Maceió, Brazil, 2024.

PEREIRA, M. B. **Confiabilidade de barras compostas (built-up) de perfis formados a frio submetidas à flexão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.

ROY, K.; LAU, H. H.; TING, T. C. H.; CHEN, B.; LIM, J. B. P. **Flexural behaviour of back-to-back built-up cold-formed steel channel beams: Experiments and finite element modelling**. Structures, Auckland, New Zealand, 2021, p. 235-253.

SCHAFER, B. W. **CUFSM 5.01–Finite Strip Buckling Analysis of Thin-Walled Members**. Department of Civil Engineering, Johns Hopkins University, Baltimore, USA, 2018.

TOLEDO, F. F. A.; FREITAS, M. S. R.; BRANDÃO, A. L. R. **Reliability assessment of cold-formed steel beams by the FORM method**. REM - International Engineering, 2021, p. 183–188.

WANG, L.; YOUNG, B. **Beam tests of cold-formed steel built-up sections with web perforations**. Journal of Constructional Steel Research, Hong Kong, 2015, p. 18-33.

WANG, L.; YOUNG, B. **Behaviour and design of cold-formed steel built-up section beams with different screw arrangements**. Thin-Walled Structures, Hong Kong, 2018, p. 16-32.

YANG, D.; LI, G.; CHENG, G. **Convergence analysis of first order reliability method using chaos theory**. Computers & Structures, 2006, p. 563-571.

YAO, X.; ZHOU, X.; SHI, Y.; GUAN, Y.; ZOU, Y. **Simplified calculation method for flexural moment capacity of cold-formed steel built-up section beams**. Advances in Structural Engineering, 2020, p. 2155–2168.

YE, J.; MEZA, F. J.; HAJIRASOULIHA, I.; BECQUE, J.; SHEPHERD, P.; PILAKOUTAS, K. **Experimental Investigation of Cross-Sectional Bending Capacity of Cold-Formed Steel Channels Subject to Local-Distortional Buckling Interaction**. Journal of Structural Engineering, 2019.

ZHOU, X.-H.; SHI, Y. **Flexural Strength Evaluation for Cold-Formed Steel Lip-Reinforced Built-Up I-Beams**. Advances in Structural Engineering, Lanzhou, China, 2011.