



Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2025**  
10º Congresso Latino-americano da Construção Metálica  
09 de Setembro de 2025, São Paulo - SP, Brasil

Tema: Construções leves estruturadas em aço: projeto, dimensionamento, fabricação e montagem

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE PERFIS FORMADOS A FRIO SOB  
COMPRESSÃO AXIAL PROPOSTO NA REVISÃO DA NORMA ABNT NBR 14762**

Rafael Vieira de Oliveira<sup>1</sup>  
Eduardo de Miranda Batista<sup>2</sup>

**Resumo**

Perfis de aço Formados a Frio (PFFs) com paredes finas têm a resistência fortemente influenciada pela flambagem, seja ela desenvolvida com modos isolados (Local (L), Distorcional (D) e Global (G)) ou com modos combinados (LG, LD, DG ou LDG). Apesar de resultados experimentais prévios indicarem a relevância da interação LD, a NBR 14762:2010 considera o Método da Resistência Direta (MRD) e o Método das Seções Efetivas (MSE) para o cálculo da resistência à compressão axial dos PFFs, incluindo apenas os modos L, D e LG. Com o objetivo de aprimorar a estimativa de resistência desses elementos, a revisão da NBR 14762 que está sendo realizada em Comissão de Estudos ABNT, está considerando a inclusão de procedimentos de cálculo desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE (LABEST), que considera os modos L, D, G e as interações entre modos de flambagem LD, LG, DG e LDG. Com isso, o principal objetivo deste trabalho consiste em verificar a efetividade dessa solução proposta pelo referido grupo de pesquisa, tomando por base o conjunto de seções U enrijecidas relacionadas na NBR 6355. O estudo baseia-se em análises numéricas utilizando o método dos elementos finitos e investiga o comportamento dos PFFs nas regiões sensíveis quanto às interações LD e LDG.

**Palavras-chave:** interação entre modos de flambagem; perfis de aço formados a frio; compressão axial; modo de flambagem LD; modo de flambagem LDG.

## EVALUATION OF THE PROPOSED DESIGN METHOD FOR COLD-FORMED MEMBERS UNDER AXIAL COMPRESSION IN THE CONTEXT OF THE REVISION OF THE CODE ABNT NBR 14762

### Abstract

The strength of thin-walled cold-formed steel (CFS) members is strongly influenced by buckling, whether it occurs in isolated modes (Local (L), Distortional (D) and Global (G)) or in combined modes (LG, LD, DG or LDG). Despite previous experimental results indicating the relevance of the LD interaction, the NBR 14762:2010 considers the Direct Strength Method (DSM) and the Effective Section Method (ESM) for estimating the compressive strength of CFS members, which only includes the L, D and LG modes. To improve the strength estimation of such members, the revision of the Brazilian code NBR 14762, which is currently being carried out by the ABNT Study Commission, is considering the design procedures developed by the research group of the COPPE's Structures and Materials Laboratory (LABEST), which takes into account the buckling modes L, D, G and the buckling interactions LD, LG, DG and LDG. In this context, the main aspect of this work is to verify the effectiveness of the proposed solution by the aforementioned research group, based on the lipped-channel members presented in the Brazilian code ABNT NBR 6355. The study is based on numerical analyses using finite element method and investigates the behavior of CFS members in sensitive regions in terms of LD and LDG interactions.

**Keywords:** buckling modes interaction; cold-formed steel members; axial compression; LD buckling mode; LDG buckling mode.

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Engenharia Civil da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Professor colaborador voluntário, Titular, aposentado, Programa de Engenharia Civil da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A norma brasileira de dimensionamento de estruturas de aço constituídas por Perfis Formados a Frio (PFFs), NBR 14762 [17], encontra-se atualmente defasada em relação aos avanços das pesquisas no que diz respeito ao cálculo da resistência à compressão axial. A última revisão desta norma, realizada no ano de 2010, considera na compressão axial os modos isolados Local (L), Distorcional (D), Global (G) e apenas o modo de interação LG, negligenciando os efeitos dos demais modos de interação, a saber, LD, DG e LDG. O modelo de cálculo presente nessa norma é baseado no Método da Resistência Direta (MRD) [7] e no Método das Seções Efetivas (MSE) [8], métodos amplamente aceitos pela comunidade acadêmica, mas que apenas consideram os efeitos da interação LG.

Nesse contexto, Batista *et al.* [9], motivados por estudos que mostram a relevância dos modos LD e LDG (Matsubara *et al.* [12] e Matsubara [14]), desenvolveram uma metodologia “*all-in-one*” que considera todos os modos de flambagem no cálculo da resistência à compressão axial de PFFs. Essa metodologia baseia-se no MRD, sendo construída sobre as equações do tipo Winter e da resistência para o modo G [20], e aplica-se às seções U enrijecido (Ue), Z enrijecido (Ze), Hat e Rack. Por expandir a abrangência do MRD para os demais modos de flambagem, essa proposta é nomeada por Método da Resistência Direta Generalizado (MRDG).

O MRDG será o foco deste artigo. Neste trabalho será investigada a acurácia e precisão deste método na estimativa da resistência de colunas de PFF com seções Ue comerciais, conforme padronização da NBR 6355 [18]. Para isso, utiliza-se a análise de confiabilidade, em termos do coeficiente de ponderação da resistência  $\gamma$  presente na NBR 14762 [17], onde se utiliza como parâmetro de comparação os resultados de resistência obtidos através de análise das colunas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Ao fim desta avaliação, chega-se a um conjunto de dados abrangente que permite entender a relevância do MRDG e, portanto, a sua viabilidade para ser adotado na próxima revisão da NBR 14762 [17] que se encontra em andamento.

## 2 MÉTODO PROPOSTO PARA DIMENSIONAMENTO DE BARRAS COMPRIMIDAS AXIALMENTE

A NBR 14762:2010 indica o MRD e MSE para o cálculo da resistência última de PFFs sob compressão axial. Essa versão da norma estabelece que a resistência última  $N_{CR}$  é igual ao menor valor entre as resistências para os modos de flambagem LG e D (respectivamente,  $N_{CRLG}$  e  $N_{CRD}$ ) que são calculadas pelas Equações 1 e 2.

$$N_{CRLG} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_{LG}^{0,8}}\right) \frac{\chi N_y}{\lambda_{LG}^{0,8}} \quad \text{com } N_{CRLG} \leq \chi N_y \quad (1)$$

$$N_{CRD} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_D^{1,2}}\right) \frac{N_y}{\lambda_D^{1,2}} \quad \text{com } N_{CRD} \leq N_y \quad (2)$$

Nessas equações  $N_y = f_y A$  é a resistência axial ao escoamento,  $f_y$  é a tensão de escoamento,  $A$  é a área da seção transversal, e  $\chi$  é o fator de resistência para flambagem global definido pela Equação 3.  $\lambda_{LG} = (\chi N_y / N_L)^{0,5}$ ,  $\lambda_D = (N_y / N_D)^{0,5}$  e  $\lambda_G = (N_y / N_G)^{0,5}$  são os índices de esbeltez para, respectivamente, flambagem LG, D e G.

$$\chi = \begin{cases} 0,658\lambda_G^2, & \lambda_G \leq 1,50 \\ \frac{0,877}{\lambda_G^2}, & \lambda_G > 1,50 \end{cases} \quad (3)$$

A nova versão da NBR 14762, conforme proposta de revisão da Comissão de Estudo da ABNT [21], o MRDG e o MSE serão indicados para o cálculo da resistência última de PFFs sob compressão axial. O método de cálculo prevê que a resistência última  $N_{CR}$  engloba os casos de instabilidade com modos individuais — L, D e G — e os casos de interação — LD, LG, DG e LDG — conforme apresentado na Equação 4, em conjunto com as Equações 5 a 12. Nessas equações  $R_{\lambda DL}$  se refere à razão  $\lambda_D / \lambda_L$ , em que  $\lambda_L = (N_y / N_L)^{0,5}$  é o índice de esbeltez para a flambagem L.

$$N_{CRLDG} = \left(1 - \frac{a}{\lambda_{LDG}^b}\right) \frac{\chi_m N_y}{\lambda_{LDG}^b} \quad \text{com } N_{CRLDG} \leq \chi N_y \quad (4)$$

Em que:

$$\lambda_{LDG} = \sqrt{\frac{\chi_m N_y}{\min.\{N_L; N_D\}}} \quad (5)$$

$$\chi_m = \begin{cases} c\lambda_G^d & \text{para } \lambda_G \leq 1,5 \\ \frac{e}{\lambda_G^f} & \text{para } \lambda_G > 1,5 \end{cases} \quad \text{com } \lambda_G = \sqrt{\frac{N_y}{N_G}} \quad (6)$$

$$a = \begin{cases} 0,15, & R_{\lambda DL} < 0,80 \\ 0,4R_{\lambda DL} - 0,17, & 0,80 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05 \\ 0,25, & R_{\lambda DL} > 1,05 \end{cases} \quad (7)$$

$$b = \begin{cases} 0,80, & R_{\lambda DL} < 0,45 \\ -2,26R_{\lambda DL}^2 + 4,06R_{\lambda DL} - 0,57, & 0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05 \\ 1,20, & R_{\lambda DL} > 1,05 \end{cases} \quad (8)$$

$$c = \begin{cases} 0,66, & R_{\lambda DL} < 0,45 \\ 0,20R_{\lambda DL} + 0,57, & 0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,65 \\ 0,90, & R_{\lambda DL} > 1,65 \end{cases} \quad (9)$$

$$d = \begin{cases} 2,00, & R_{\lambda DL} < 0,45 \\ 0,20R_{\lambda DL} + 1,91, & 0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,65 \\ 2,24, & R_{\lambda DL} > 1,65 \end{cases} \quad (10)$$

$$e = \begin{cases} 0,88, & R_{\lambda DL} < 0,45 \\ 0,35R_{\lambda DL} + 0,72, & 0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,65 \\ 1,30, & R_{\lambda DL} > 1,65 \end{cases} \quad (11)$$

$$f = \begin{cases} 2,00, & R_{\lambda DL} < 0,55 \\ -0,59R_{\lambda DL} + 2,32, & 0,55 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,65 \\ 1,35, & R_{\lambda DL} > 1,65 \end{cases} \quad (12)$$

O método proposto, o MRDG, se baseia na formulação original do MRD, sendo introduzidos os parâmetros  $a - f$  e o fator de resistência para flambagem global modificado  $\chi_m$ . Os parâmetros  $a$  e  $b$  são referentes aos modos L, D e LD. Conforme investigação de Matsubara e Batista [13], a interação LD pode ser considerada para  $R_{\lambda DL}$  variando entre 0,45 e 1,05. Fora desse intervalo, se o modo L é dominante ( $R_{\lambda DL} < 0,45$ )  $a$  e  $b$  são iguais aos parâmetros do MRD para o modo L — respectivamente, 0,15 e 0,8 — e se, por outro lado, o modo D for dominante ( $R_{\lambda DL} > 1,05$ ),  $a$  e  $b$  são iguais aos parâmetros do MRD para o modo D — respectivamente, 0,25 e 1,2. Até esse ponto a novidade em relação ao tradicional MRD é a consideração da interação LD. Neste caso  $a$  e  $b$  assumem valores distintos daqueles para os modos L e D do MRD de forma a ajustar a solução para a interação LD.

O fator  $\chi_m$  depende dos parâmetros  $c - f$ , inclui a influência do modo global, referente às interações LG, DG e LDG. Desse modo, se o modo L é dominante,  $\chi_m$  converge para  $\chi$ , representando o modo LG. Se, por outro lado, o modo D é dominante, os parâmetros  $c - f$  são ajustados para que  $\chi_m$  represente o modo DG. Por fim, para o caso de LD, o parâmetro de flambagem global representa o modo de tripla interação – LDG.

No dimensionamento à compressão axial, seja utilizando o MRD tradicional ou o MRDG, é necessário obter as forças críticas de flambagem L, D e G (respectivamente,  $N_L$ ,  $N_D$  e  $N_G$ ). Para o cálculo de  $N_L$  é utilizado, quando aplicável, o MSE preconizado na norma NBR 14762:2010. Para os casos não aplicáveis ao MSE, a carga crítica local é obtida através de análise de flambagem (neste trabalho realizada com modos isolados utilizando a Teoria Generalizada de Vigas por meio do software GBTUL [3]), assim como é feito para a obtenção de  $N_D$ . Para o modo global, por sua vez,  $N_G$  pode ser calculado utilizando as equações da teoria de estabilidade elástica.

### 3 APLICAÇÃO DO MRDG PROPOSTA PARA A REVISÃO DA NBR 14762

Em linha com o objetivo do trabalho, um grupo de barras estruturais de aço formadas a frio foi escolhido na NBR 6355:2012 e submetido a compressão axial. Os resultados obtidos da resistência estrutural são avaliados com base nas seguintes metodologias: i) MRD e MSE preconizados na NBR 14762:2010; ii) MRDG; e iii) método dos elementos finitos com o software ANSYS [1].

Os resultados obtidos em (i) e (ii) foram avaliados com base na comparação com os resultados numéricos pelo MEF (iii). Estes resultados têm a confiabilidade aferida utilizando-se o coeficiente de ponderação da resistência ( $\gamma$ ) conforme sugerido na NBR 14762 (equivalente ao método LRFD (*Load and*

*Resistance Factor Design*) preconizado na norma norte americana para projetos de estruturas de perfis de aço formados a frio, AISI-S100-16 [19]).

### 3.1 Grupo de barras estudadas na compressão axial

A Tabela 3 do anexo apresenta as características geométricas das barras com seção U enrijecido analisadas na compressão axial consideradas para o presente estudo.  $b_w$ ,  $b_f$ ,  $b_s$  e  $t$  são as dimensões da seção pela linha média do perfil conforme mostra a Figura 1,  $A$  é área da seção e  $l$  é o comprimento da barra. Esses perfis foram extraídos do grupo de perfis estruturais de aço formados a frio de séries comerciais apresentados na NBR 6355:2021.

Foi considerado aço de padrão corrente (ASTM A 572 grau 50) com módulo de elasticidade  $E = 200$  GPa, coeficiente de poisson  $\nu = 0,3$  e tensão de escoamento  $f_y = 345$  MPa para todas as barras avaliadas na compressão axial.

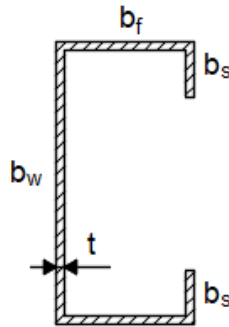


Figura 1. Nomenclatura das dimensões da seção transversal  $U_e$ : dimensões pela linha média

O grupo de PFFs para estudo é estabelecido focando-se nos casos de interação LD e LDG. Dessa forma, para o grupo LD os comprimentos dos elementos são definidos entre  $l_{mínLD} = 2b_w$  e  $l_{máxLD}$  limitado a  $R_{\lambda GDL} \leq 0,4$  (com  $R_{\lambda GDL} = \lambda_G / \lambda_{máxLD}$ ), com incrementos de comprimento iguais a  $b_w$ . O critério de comprimento máximo tem o propósito de evitar a influência do modo global nas análises, conforme destacado por Matsubara e Batista [13], enquanto o comprimento mínimo garante o desenvolvimento isolado do modo L. Para o grupo LDG os comprimentos dos elementos são definidos entre  $l_{mínLDG}$  (onde  $R_{\lambda GDL} = \lambda_G / \lambda_{máxLD} = 0,8$ ) e  $l_{máxLDG}$  (onde  $R_{\lambda GDL} = \lambda_G / \lambda_{máxLD} = 1,0$  ou o índice de esbeltez da barra —  $Kl/r$ , em que  $Kl$  é o comprimento efetivo de flambagem global e  $r$  é o raio de giração da seção — é igual a 200, aquele que gerar o menor valor de  $l_{máxLDG}$ ). Os incrementos de comprimento são iguais a  $b_w$ . Esses critérios garantem que as barras em estudo se situem na região suscetível à tripla interação LDG, conforme observado por Matsubara [14], e não excedam o limite de esbeltez de barras comprimidas definido na NBR 14762.

De maneira gráfica, a Figura 2 apresenta os limites que governam a definição dos comprimentos das colunas consideradas neste trabalho. As colunas definidas a partir desses critérios são divididas em dois grupos em função de sua condição de extremidade: (a) ambas as extremidades parcialmente engastadas, de forma a prevenir rotações, flexão de placa e empenamento e permitir apenas deslocamento na direção axial da coluna; e (b) ambos os extremos simplesmente apoiados, de forma a impedir apenas a translação transversal, sendo o empenamento livre. Esses dois grupos, por

simplicidade, são referidos ao longo do texto e nas tabelas por, respectivamente, FF e SS (abreviação de Fixo-Fixo e Simples-Simples). A Tabela 3 no anexo apresenta todos os casos gerados a partir dos critérios de comprimento e de condição de extremidade aqui apresentados.

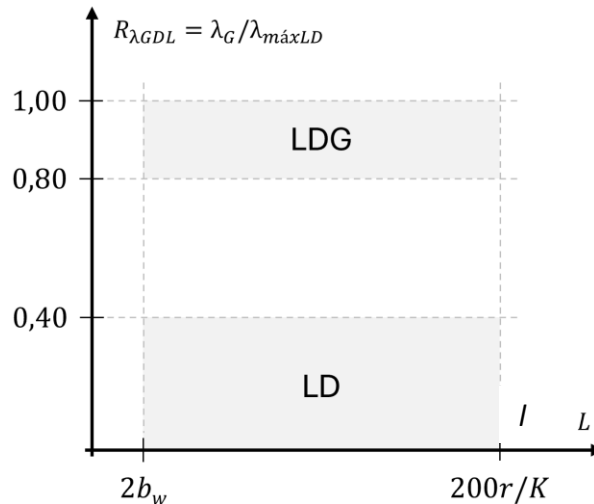


Figura 2. Domínio considerado para a definição dos comprimentos dos elementos de estudo para interação LD e LDG

### 3.1 Investigação via MEF

A análise numérica pelo MEF foi realizada com o software ANSYS [1]. Considerou-se na análise o aço com comportamento bilinear, tendo patamar horizontal de escoamento igual à tensão de escoamento  $f_y$  e sem considerar a fase do encruamento do material. Os cantos das peças foram modelados sem apresentar a curva de dobramento da chapa, não foi considerado o aumento da tensão de escoamento causado pelo trabalho a frio nas regiões vizinhas aos cantos dobrados, assim como não foi considerado o efeito das tensões residuais. Estas premissas foram testadas anteriormente por Matsubara e Batista [13] e concluiu-se que não implicam em efeitos significativos nos resultados das análises pelo MEF.

#### 3.1.1 Modelo de elementos finitos

Os modelos numéricos das barras na compressão axial foram elaborados utilizando o elemento de casca quadrilateral *shell* 181 do ANSYS [1], com dimensões não maiores do que 5mm para colunas com comprimento de no máximo 3,0 m e não maiores do que 10 mm para colunas com comprimento maior do que 3,0 m. A opção de malha de 5 mm foi considerada satisfatória e adequada por Matsubara *et al.* [8] e a condição de malha de 10 mm para colunas com comprimento maior do que 3,0 m foi considerada satisfatória por Oliveira [22] para o tipo de análise presente nesta pesquisa.

Foram aplicadas duas forças axiais nas extremidades da coluna, localizadas no centroide da peça em sentidos opostos, de forma a comprimi-la. O valor absoluto da força aplicada (máximo) corresponde à carga de plastificação do aço,  $N_y = Af_y$ . Dois tipos distintos de condição de extremidade são considerados: SS - todos os deslocamentos no plano da seção transversal impedidos e rotações e

deslocamento axial liberados (ver Figura 3); e FF- todos os deslocamentos no plano da seção transversal impedidos, rotações dos nós da extremidade em relação ao centroide da seção impedidos em todas as direções e deslocamento axial liberado. Nesse último caso as restrições de deslocamento são aplicadas ao nó do centroide — nó *master* — que, através de contato rígido, as transfere para os nós da extremidade da seção (ver Figura 4). Adicionalmente, o deslocamento axial do nó localizado a meio comprimento do perfil ( $l/2$ ) e no centro de sua alma ( $b_w/2$ ) é restringido, conforme mostram as Figuras 3 e 4.

Na análise não linear, utiliza-se o método Newton-Raphson com a estratégia de controle de comprimento de arco disponível no ANSYS. A imperfeição inicial adotada para o início da análise não linear incremental-iterativa depende do grupo de PFF estudado: para o grupo LD a imperfeição inicial possui amplitude máxima igual a 10% da espessura do perfil e forma igual ao autovetor do primeiro modo de flambagem, seja ele L ou D. Para os PFFs do grupo LDG a imperfeição inicial possui amplitude máxima igual a  $l/1000$  (imperfeição típica para o modo G) e forma igual ao autovetor do primeiro modo de flambagem G. Ambos os procedimentos concernentes à imperfeição inicial, para LD e LDG, atendem à necessidade de produzir resultados compatíveis com os registros experimentais disponíveis na literatura (Matsubara *et al.* [12]; Matsubara [14]). Para os PFFs do grupo de estudo LDG nem sempre o primeiro modo de flambagem é do tipo G, sendo necessário, nesses casos, recorrer-se à estratégia de aumentar a espessura da parede do perfil a fim de alcançar o modo de flambagem G e, então, extrair o autovetor a ser utilizado como referência para a imperfeição inicial na análise não linear (que será realizada com o perfil com a espessura de parede original).

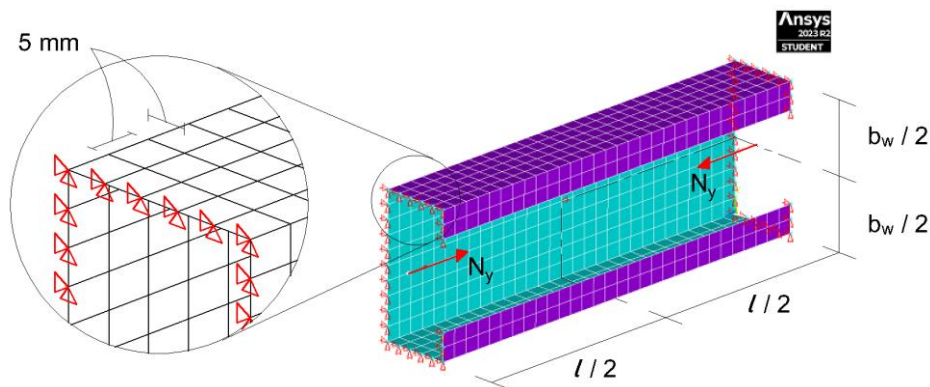


Figura 3. Condições de contorno para análise SS aplicadas ao modelo de PFF - exemplo para seção Ue com comprimento menor ou igual a 3000 mm

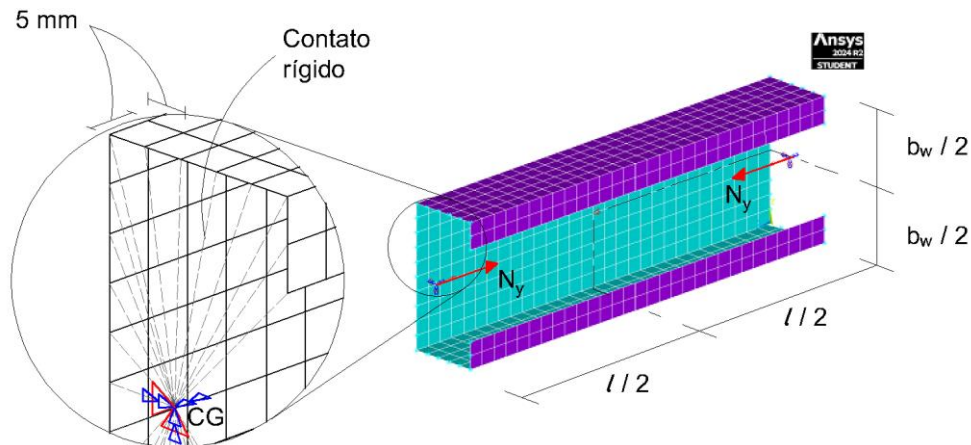


Figura 4. Condições de contorno para análise FF aplicadas ao modelo de PFF - exemplo para seção Ue com comprimento menor ou igual a 3000 mm

### 3.1.2 Validação do modelo numérico

A fim de atestar o desempenho adequado do modelo numérico frente a resultados de ensaios experimentais, foi realizada a validação utilizando os ensaios experimentais na compressão axial apresentados nas Tabelas 4 e 5 do anexo. Esses ensaios são reproduzidos no modelo numérico e as cargas axiais últimas são comparadas. As Figuras 5 e 6 apresentam a comparação gráfica entre os resultados experimentais da literatura e os resultados numéricos. A primeira para o modo LD e a segunda para o modo LDG. A média e o desvio padrão da razão  $N_{uMEF}/N_{uEXP}$  obtidos para o grupo de análise de validação LD são, respectivamente, iguais a 1,07 e 0,10 e para o grupo de análise de validação LDG são, respectivamente, 0,97 e 0,07. Com isso, o modelo aqui descrito é considerado adequado para a realização dos estudos a que se propõe esta pesquisa.

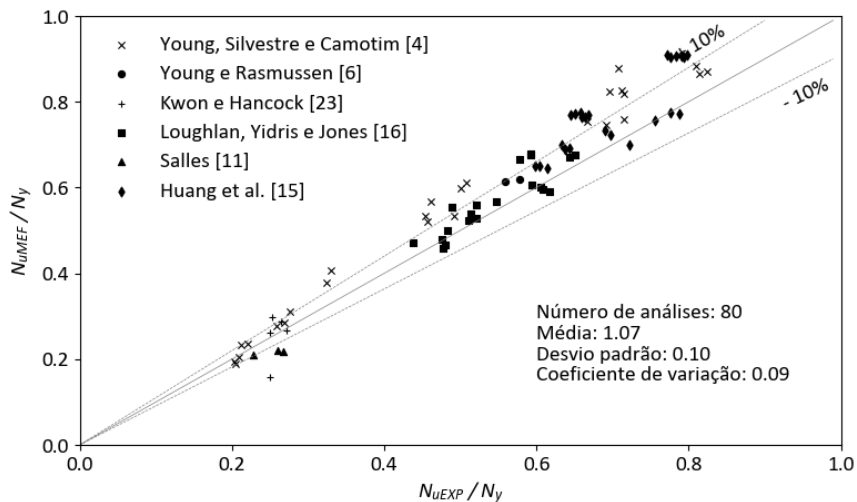


Figura 5. Comparação entre valores numéricos e experimentais dos casos listados na

Tabela 4 para validação do modelo numérico para o grupo de estudo LD

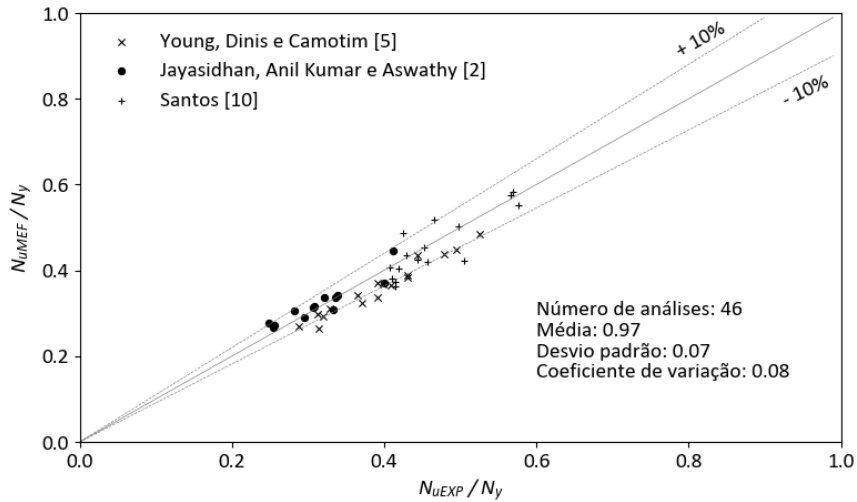


Figura 6. Comparação entre valores numéricos e experimentais dos casos listados na Tabela 5 para validação do modelo numérico para o grupo de estudo LDG

### 3.2 Análise da confiabilidade

Para a análise de confiabilidade é utilizado o coeficiente de ponderação da resistência  $\gamma$  presente na NBR 14762:2010. Para a obtenção da resistência através de ensaios (no presente estudo, resultados numéricos obtidos pelo MEF), a referida norma brasileira define o fator de resistência  $\gamma$  conforme a Equação 13, em que  $M_m$  e  $V_M$  são, respectivamente, fator e coeficiente de variação relativo ao material (1,10 e 0,10);  $F_m$  e  $V_F$  são, respectivamente, fator e coeficiente de variação relativos à fabricação (1,00 e 0,05);  $\beta_0$  é a confiabilidade alvo e  $V_Q$  é o coeficiente de variação devido aos efeitos de carregamentos, definidos, respectivamente, como 2,5 e 0,21. Por sua vez,  $P_m$ ,  $V_P$  e  $C_p$  são, respectivamente: média, coeficiente de variação e fator de correção da razão entre os resultados obtidos numericamente e os resultados analíticos. O fator de correção ( $C_p$ ) depende do número de amostras  $n$  e é calculado conforme a Equação 14.

Por fim,  $C_\phi$  é o coeficiente de calibração definido na NBR 14762:2010 como 1,52. Porém, esse valor está condicionado à premissa de que a combinação de carregamentos solicitando o elemento é da forma  $1,2F_G + 1,6F_Q$  — sendo  $F_G$  o carregamento permanente e  $F_Q$  o carregamento variável — e que a relação  $F_G/F_Q$  é igual a 1/5. Essas premissas foram herdadas da norma americana AISI S100-16 (2020) [19], mas, conforme previsto na revisão da NBR 14762 (2025) [21], é mais adequado utilizar a combinação de cargas corrente no Brasil,  $1,25F_G + 1,5F_Q$ . Dessa forma, o coeficiente de calibração  $C_\phi$  é atualizado para 1,45, sendo esse o valor adotado neste trabalho.

$$\gamma = 1 / \left[ C_\phi M_m F_m P_m e^{-\beta_0 \sqrt{V_M^2 + V_F^2 + C_p V_P^2 + V_Q^2}} \right] \quad (13)$$

$$C_p = \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \frac{n-1}{n-3} \quad \text{para } n \geq 4 \quad (14)$$

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do grupo de PFFs apresentado em 3.1 e selecionado para este estudo, foram obtidos os resultados de resistência através do MEF, MRD e MRDG para os casos nas regiões suscetível às interações LD e LDG e para as condições de extremidade SS e FF. Com isso, os resultados oriundos do MRD e MRDG foram submetidos a análise de confiabilidade tomando-se como referência os resultados obtidos via MEF. Os resultados de confiabilidade para os casos nas regiões de interação LD e LDG são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2.

Observa-se que para os casos no domínio LD o MRDG se mostrou melhor em termos de confiabilidade quando comparado com o MRD, principalmente para as colunas com condição de extremidade simplesmente apoiadas. Isso mostra como a modificação da solução generalizada do MRD foi capaz de ajustar bem a estimativa de resistência quando da interação LD, ajuste esse que não é previsto no MRD tradicional como pode ser observado comparando-se as Figuras 7 e 8. Esta primeira apresenta a razão entre os resultados numéricos e os resultados do MRD ao longo de  $R_{\lambda DL}$  e a Figura 8 apresenta a mesma distribuição para os resultados do MRDG. Fica notório, observando os dois gráficos, a ineficácia do MRD em prever a redução de resistência causada pela interação LD e o sucesso do MRDG em fazê-lo.

Tabela 1. Resultados de confiabilidade para os casos na região de interação LD

Condição de extremidade	Coeficiente de ponderação da resistência ( $\gamma$ )	
	MRD	MRDG
SS	1,23	1,14
FF	1,02	1,01

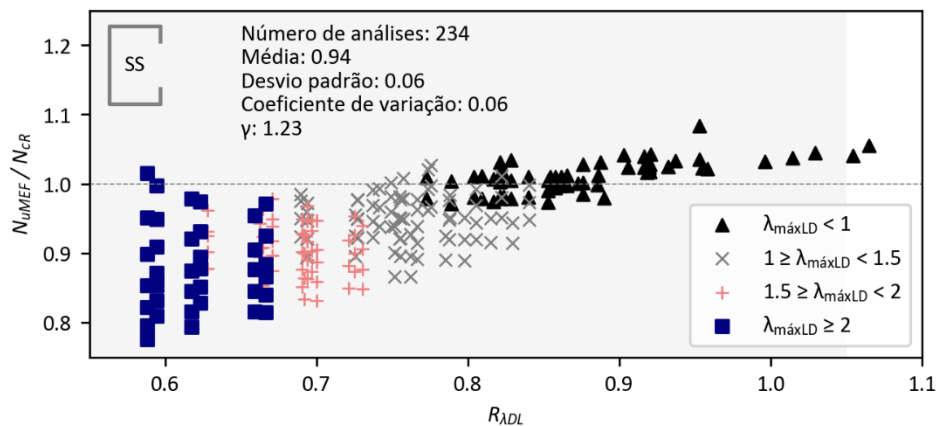


Figura 7. Razão entre a carga última obtida na análise numérica e a carga última calculada através do MRD versus  $R_{\lambda DL}$  - caso  $U_e$  - SS

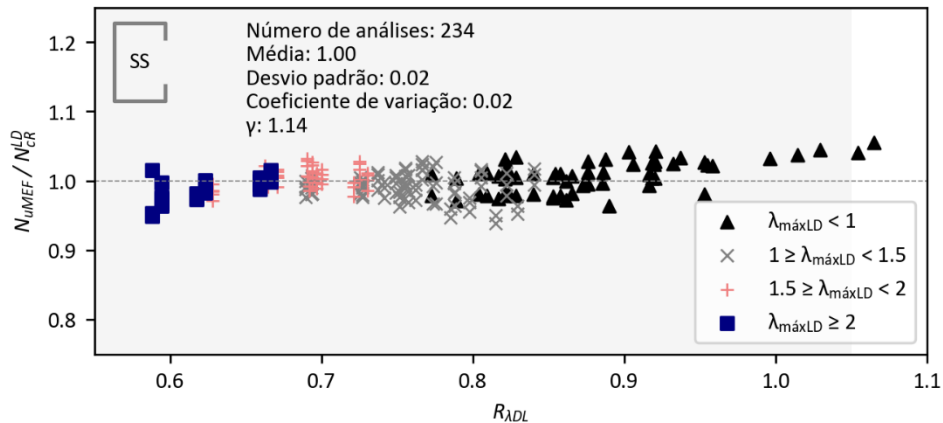


Figura 8. Razão entre a carga última obtida na análise numérica e a carga última calculada através do MRDG versus  $R_{\lambda DL}$  - caso  $U_e$  - SS

Com relação aos casos do domínio LDG, o MRDG se mostrou pior em termos de confiabilidade quando comparado com o MRD, principalmente para as colunas com condição de extremidade simplesmente apoiadas. O maior valor de confiabilidade obtida nesse caso, 1,17, apesar de maior do que o oferecido pelo MRD, coincide com o que foi apurado por Batista et al. [9] na defesa da inclusão do MRDG nas normas de dimensionamento de PFFs sob compressão axial.

Tabela 2. Resultados de confiabilidade para os casos na região de interação LDG

Condição de extremidade	Coeficiente de ponderação da resistência ( $\gamma$ )	
	MRD	MRDG
SS	1,09	1,17
FF	1,00	1,04

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas últimas décadas registrou-se um grande esforço de pesquisas dedicadas ao estudo das estruturas de paredes finas (*thin-walled structures*), com o objetivo de desenvolver uma metodologia para levar em conta os modos de interação LD e LDG. No cenário brasileiro, o MRDG poderá conquistar aceitação na comunidade que se dedica ao projeto de estudos em PFF, após ser incluído na nova revisão da norma brasileira NBR 14762. O presente estudo confirmou a confiabilidade do MRDG, principalmente para o caso LD, produzindo um coeficiente de ponderação da resistência  $\gamma$  inferior ao valor de 1,20 adotado na versão atual da NBR 14762.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Engenharia Civil da COPPE, UFRJ, em especial o Laboratório de Estruturas e Materiais, ao apoio para desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] ANSYS, Inc., ANSYS APDL Theory Reference, Release 15.0, Canonsburg, PA, 2013.
- [2] A. K. Jayasidhan, M. V. A. Kumar, K. C. K Aswathy. Experimental investigation on post-flexural–torsional buckling strength of CFS compression members. *Thin-Walled Structures*, v. 185, 1 abr. 2023.
- [3] R. Bebiano, D. Camotim, R. Gonçalves. GBTUL 2.0 – A second-generation code for the GBT-based buckling and vibration analysis of thin-walled members. *Thin-Walled Structures*, v. 124, p. 235–257, 1 mar. 2018.
- [4] B. Young, N. Silvestre, D. Camotim, Cold-formed steel lipped channel columns influenced by local-distortional interaction: strength and DSM design, *J. Struct. Eng.*139, 2013.
- [5] B. Young, P. B. Dinis, D. Camotim. CFS lipped channel columns affected by L-D-G interaction. Part I: Experimental investigation. *Computers and Structures*, v. 207, p. 219–232, 1 set. 2018.
- [6] B. Young, K.J.R. Rasmussen, Design of lipped channel columns, *J. Struct. Eng.* 124, 1998.
- [7] B.W. Schafer, T. Peköz, Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions, in: Fourteenth Int. Spec. Conf. Cold-Formed Steel Struct. St. Louis, Missouri, USA, 1988, pp. 1–8.
- [8] E.M. Batista, Effective section method: a general direct method for the design of steel cold-formed members under local-global buckling interaction. *Thin-Walled Structures*, v. 48, 2010: 345-356.
- [9] E. M. Batista, G. Y. Matsubara, M. S. R. Freitas, V. A. M. de Faria, A. L. R. Brandão. Lipped channel cold-formed steel columns: “all-in-one” design approach including the buckling interaction models LG, LD, DG and LDG. *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Louisville, Kentucky, April 1-4, 2025.*
- [10] E. S. dos Santos. Interação entre os modos de flambagem local-distorcional-global em perfis de aço formados a frio com seção U enrijecido na compressão axial. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- [11] G.C. Salles, Investigação analítica, numérica e experimental do modo de flambagem distorcional em perfis formados a frio. Dissertação de mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, UFRJ, 2017.

- [12] G.Y. Matsubara, E.M. Batista, G.C. Salles, Lipped channel cold-formed steel columns under local-distortional buckling mode interaction, *Thin-Walled Struct.* 137, 2019: 251–270.
- [13] G.Y. Matsubara, E.M. Batista. Local-distortional buckling mode of steel cold-formed columns: Generalized direct strength design approach. *Thin-Walled Struct.*, 183, 2023: 110356.
- [14] G. Y. Matsubara. Interação entre os modos de flambagem de perfis de aço formados a frio sob compressão axial: análise e método de dimensionamento estrutural. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.
- [15] L. Huang et al. Local and Distortional Interaction Buckling of Cold-formed Thin-Walled High Strength Lipped Channel Columns. *International Journal of Steel Structures*, v. 21, n. 1, p. 244–259, 1 fev. 2021.
- [16] J. Loughlan, N. Yidris, K. Jones, The failure of thin-walled lipped channel compression members due to coupled local-distortional interactions and material yielding, *Thin-Walled Struct.* 61, 2012.
- [17] NBR 14762 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- [18] NBR 6355 – Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização, ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- [19] North American Specification (NAS) for the Design of Cold-formed Steel Structural Members (AISI-S100-16), American Iron and Steel Institute (AISI), Washington DC, USA, 2016.
- [20] R. D. Ziemian. *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*. 2010.
- [21] Revisão da NBR 14762 na Comissão de Estudo da ABNT, no CB 002, Comitê Brasileiro da Construção Civil.
- [22] R. V. de Oliveira. Análise da relevância dos modos de flambagem LD e LDG no dimensionamento na compressão axial de perfis de aço formados a frio com seções comerciais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.
- [23] Y.B. Kwon, G.J. Hancock, Tests of cold-formed channels with local and distortional buckling, *J. Struct. Eng.* 118, 1992.

Anexo

Tabela 3. Conjunto de colunas estudado (mm<sup>2</sup>, mm)

Tipo de seção	A	b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	b <sub>s</sub>	t	b <sub>f</sub> /b <sub>w</sub>	Condição de extremidade SS						Condição de extremidade FF					
							l <sub>minLD</sub>	l <sub>máxLD</sub>	# casos LD	l <sub>minLDG</sub>	l <sub>máxLDG</sub>	# casos LDG	l <sub>minLD</sub>	l <sub>máxLD</sub>	# casos LD	l <sub>minLDG</sub>	l <sub>máxLDG</sub>	# casos LDG
U <sub>e</sub>	1,35	50,00	25,00	10,00	1,20	0,50	100	182	2	371	472	3	100	363	6	742	944	5
U <sub>e</sub>	1,65	50,00	25,00	10,00	1,50	0,50	100	144	1	292	368	2	100	288	4	584	736	4
U <sub>e</sub>	2,14	50,00	25,00	10,00	2,00	0,50	100	110	1	225	285	2	100	221	3	450	569	3
U <sub>e</sub>	2,37	50,00	25,00	10,00	2,25	0,50	100	101	1	206	261	2	100	202	3	411	521	3
U <sub>e</sub>	2,72	50,00	25,00	10,00	2,65	0,50	100	89	0	182	231	1	100	179	2	364	462	2
U <sub>e</sub>	3,01	50,00	25,00	10,00	3,00	0,50	100	81	0	165	210	1	100	162	2	330	420	2
U <sub>e</sub>	2,13	75,00	40,00	15,00	1,20	0,53	150	417	4	843	1064	3	150	833	10	1687	2128	6
U <sub>e</sub>	2,63	75,00	40,00	15,00	1,50	0,53	150	332	3	673	849	3	150	664	7	1346	1699	5
U <sub>e</sub>	3,44	75,00	40,00	15,00	2,00	0,53	150	248	2	503	635	2	150	496	5	1006	1271	4
U <sub>e</sub>	3,83	75,00	40,00	15,00	2,25	0,53	150	219	1	444	561	2	150	439	4	889	1121	4
U <sub>e</sub>	4,44	75,00	40,00	15,00	2,65	0,53	150	188	1	382	482	2	150	377	4	764	965	3
U <sub>e</sub>	4,96	75,00	40,00	15,00	3,00	0,53	150	172	1	350	443	2	150	345	3	701	886	3
U <sub>e</sub>	2,47	100,00	40,00	17,00	1,20	0,40	200	655	5	1331	1684	4	200	1309	12	2661	3120	5
U <sub>e</sub>	3,06	100,00	40,00	17,00	1,50	0,40	200	522	4	1062	1345	3	200	1043	9	2123	2689	6
U <sub>e</sub>	4,02	100,00	40,00	17,00	2,00	0,40	200	389	2	794	1006	3	200	778	6	1587	2013	5
U <sub>e</sub>	4,48	100,00	40,00	17,00	2,25	0,40	200	346	2	706	897	2	200	691	5	1412	1795	4
U <sub>e</sub>	5,21	100,00	40,00	17,00	2,65	0,40	200	292	1	597	758	2	200	584	4	1193	1515	4
U <sub>e</sub>	5,83	100,00	40,00	17,00	3,00	0,40	200	257	1	524	666	2	200	513	4	1049	1332	3
U <sub>e</sub>	6,43	100,00	40,00	17,00	3,35	0,40	200	229	1	469	596	2	200	458	3	937	1191	3
U <sub>e</sub>	2,71	100,00	50,00	17,00	1,20	0,50	200	704	6	1423	1794	4	200	1407	13	2846	3588	8
U <sub>e</sub>	3,36	100,00	50,00	17,00	1,50	0,50	200	562	4	1145	1450	4	200	1124	10	2289	2900	7

Tipo de seção	A	b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	b <sub>s</sub>	t	b <sub>f</sub> /b <sub>w</sub>	Condição de extremidade SS						Condição de extremidade FF					
							l <sub>minLD</sub>	l <sub>maxLD</sub>	# casos LD	l <sub>minLDG</sub>	l <sub>maxLDG</sub>	# casos LDG	l <sub>minLD</sub>	l <sub>maxLD</sub>	# casos LD	l <sub>minLDG</sub>	l <sub>maxLDG</sub>	# casos LDG
U <sub>e</sub>	4,42	100,00	50,00	17,00	2,00	0,50	200	419	3	852	1077	3	200	838	7	1703	2154	5
U <sub>e</sub>	4,93	100,00	50,00	17,00	2,25	0,50	200	372	2	754	954	2	200	743	6	1509	1907	4
U <sub>e</sub>	5,74	100,00	50,00	17,00	2,65	0,50	200	315	2	639	808	2	200	629	5	1278	1615	4
U <sub>e</sub>	6,43	100,00	50,00	17,00	3,00	0,50	200	277	1	563	712	2	200	554	4	1126	1424	3
U <sub>e</sub>	7,10	100,00	50,00	17,00	3,35	0,50	200	248	1	503	637	2	200	495	3	1007	1274	3
U <sub>e</sub>	4,92	125,00	50,00	17,00	2,00	0,40	250	582	3	1190	1514	3	250	1162	8	2380	3027	6
U <sub>e</sub>	5,49	125,00	50,00	17,00	2,25	0,40	250	516	3	1053	1338	3	250	1031	7	2106	2675	5
U <sub>e</sub>	6,40	125,00	50,00	17,00	2,65	0,40	250	437	2	893	1135	2	250	873	5	1785	2270	4
U <sub>e</sub>	7,18	125,00	50,00	17,00	3,00	0,40	250	384	2	786	1000	2	250	768	5	1571	1999	4
U <sub>e</sub>	7,94	125,00	50,00	17,00	3,35	0,40	250	343	1	702	893	2	250	686	4	1404	1786	4
U <sub>e</sub>	8,79	125,00	50,00	17,00	3,75	0,40	250	306	1	625	796	2	250	611	3	1251	1591	3
U <sub>e</sub>	5,94	150,00	60,00	20,00	2,00	0,40	300	837	4	1709	2172	4	300	1672	10	3418	4343	7
U <sub>e</sub>	6,64	150,00	60,00	20,00	2,25	0,40	300	742	3	1515	1925	3	300	1483	8	3031	3850	6
U <sub>e</sub>	7,75	150,00	60,00	20,00	2,65	0,40	300	629	3	1285	1633	3	300	1257	7	2569	3265	5
U <sub>e</sub>	8,71	150,00	60,00	20,00	3,00	0,40	300	553	2	1131	1438	3	300	1106	6	2262	2875	5
U <sub>e</sub>	9,65	150,00	60,00	20,00	3,35	0,40	300	494	2	1011	1285	2	300	988	5	2022	2571	4
U <sub>e</sub>	10,70	150,00	60,00	20,00	3,75	0,40	300	440	1	900	1145	2	300	880	4	1801	2290	4
U <sub>e</sub>	11,99	150,00	60,00	20,00	4,25	0,40	300	387	1	792	1008	2	300	774	4	1584	2016	3
U <sub>e</sub>	13,24	150,00	60,00	20,00	4,75	0,40	300	345	1	707	900	2	300	691	3	1414	1799	3
U <sub>e</sub>	7,54	200,00	75,00	20,00	2,00	0,38	400	1379	5	2824	3596	4	400	2755	12	5648	5465	0
U <sub>e</sub>	8,44	200,00	75,00	20,00	2,25	0,38	400	1224	5	2506	3191	4	400	2445	11	5012	5439	3
U <sub>e</sub>	10,14	200,00	75,00	25,00	2,65	0,38	400	1078	4	2207	2810	4	400	2155	9	4414	5571	6
U <sub>e</sub>	11,41	200,00	75,00	25,00	3,00	0,38	400	950	3	1944	2474	3	400	1898	8	3887	4947	6

Tipo de seção	A	b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	b <sub>s</sub>	t	b <sub>f</sub> /b <sub>w</sub>	Condição de extremidade SS						Condição de extremidade FF					
							l <sub>minLD</sub>	l <sub>maxLD</sub>	# casos LD	l <sub>minLDG</sub>	l <sub>maxLDG</sub>	# casos LDG	l <sub>minLD</sub>	l <sub>maxLD</sub>	# casos LD	l <sub>minLDG</sub>	l <sub>maxLDG</sub>	# casos LDG
U <sub>e</sub>	12,66	200,00	75,00	25,00	3,35	0,38	400	849	3	1738	2213	3	400	1697	7	3476	4425	5
U <sub>e</sub>	14,08	200,00	75,00	25,00	3,75	0,38	400	756	2	1549	1973	3	400	1511	6	3098	3945	5
U <sub>e</sub>	15,81	200,00	75,00	25,00	4,25	0,38	400	666	2	1364	1737	2	400	1330	5	2728	3474	4
U <sub>e</sub>	17,52	200,00	75,00	25,00	4,75	0,38	400	595	1	1220	1554	2	400	1189	4	2440	3109	4
U <sub>e</sub>	23,22	200,00	75,00	30,00	6,30	0,38	400	462	1	946	1182	2	400	922	3	1891	2365	3
U <sub>e</sub>	11,46	200,00	100,00	25,00	2,65	0,50	400	1202	5	2443	3093	4	400	2403	11	4887	6185	7
U <sub>e</sub>	12,91	200,00	100,00	25,00	3,00	0,50	400	1060	4	2155	2728	3	400	2119	9	4311	5456	6
U <sub>e</sub>	14,34	200,00	100,00	25,00	3,35	0,50	400	948	3	1927	2440	3	400	1895	8	3855	4880	6
U <sub>e</sub>	15,95	200,00	100,00	25,00	3,75	0,50	400	845	3	1718	2176	3	400	1689	7	3437	4351	5
U <sub>e</sub>	17,94	200,00	100,00	25,00	4,25	0,50	400	744	2	1513	1916	3	400	1487	6	3026	3831	5
U <sub>e</sub>	19,89	200,00	100,00	25,00	4,75	0,50	400	664	2	1351	1711	2	400	1328	5	2702	3422	4
U <sub>e</sub>	9,14	250,00	85,00	25,00	2,00	0,34	500	2051	7	4216	5376	5	500	4105	15	8431	6240	0
U <sub>e</sub>	10,24	250,00	85,00	25,00	2,25	0,34	500	1825	6	3746	4779	5	500	3647	13	7491	6215	0
U <sub>e</sub>	11,99	250,00	85,00	25,00	2,65	0,34	500	1546	5	3175	4044	4	500	3089	11	6349	6170	0
U <sub>e</sub>	13,51	250,00	85,00	25,00	3,00	0,34	500	1362	4	2796	3549	4	500	2721	9	5593	6130	3
U <sub>e</sub>	15,01	250,00	85,00	25,00	3,35	0,34	500	1218	3	2501	3158	3	500	2433	8	5003	6091	5
U <sub>e</sub>	16,70	250,00	85,00	25,00	3,75	0,34	500	1085	3	2230	2801	3	500	2168	7	4459	5601	5
U <sub>e</sub>	18,79	250,00	85,00	25,00	4,25	0,34	500	955	2	1958	2448	2	500	1908	6	3917	4896	4
U <sub>e</sub>	20,84	250,00	85,00	25,00	4,75	0,34	500	852	2	1736	2169	2	500	1702	5	3471	4339	4
U <sub>e</sub>	27,00	250,00	85,00	25,00	6,30	0,34	500	634	1	1269	1586	2	500	1270	4	2538	3172	3
U <sub>e</sub>	12,79	250,00	100,00	25,00	2,65	0,40	500	1674	5	3423	4355	4	500	3345	12	6847	7275	2
U <sub>e</sub>	14,41	250,00	100,00	25,00	3,00	0,40	500	1477	4	3020	3841	4	500	2951	10	6040	7235	5
U <sub>e</sub>	16,01	250,00	100,00	25,00	3,35	0,40	500	1321	4	2702	3438	3	500	2639	9	5404	6875	6

Tipo de seção	A	b <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	b <sub>s</sub>	t	b <sub>f</sub> /b <sub>w</sub>	Condição de extremidade SS						Condição de extremidade FF					
							l <sub>minLD</sub>	l <sub>maxLD</sub>	# casos LD	l <sub>minLDG</sub>	l <sub>maxLDG</sub>	# casos LDG	l <sub>minLD</sub>	l <sub>maxLD</sub>	# casos LD	l <sub>minLDG</sub>	l <sub>maxLDG</sub>	# casos LDG
U <sub>e</sub>	17,83	250,00	100,00	25,00	3,75	0,40	500	1177	3	2408	3064	3	500	2352	8	4816	6128	6
U <sub>e</sub>	20,06	250,00	100,00	25,00	4,25	0,40	500	1037	3	2122	2701	3	500	2072	7	4244	5402	5
U <sub>e</sub>	22,27	250,00	100,00	25,00	4,75	0,40	500	925	2	1893	2410	3	500	1848	6	3786	4820	5
U <sub>e</sub>	10,14	300,00	85,00	25,00	2,00	0,28	600	2482	7	4965	6086	4	600	4965	15	9930	6086	0
U <sub>e</sub>	11,37	300,00	85,00	25,00	2,25	0,28	600	2193	6	4386	5482	4	600	4386	13	8772	6058	0
U <sub>e</sub>	13,32	300,00	85,00	25,00	2,65	0,28	600	1843	5	3687	4608	4	600	3687	11	7373	6014	0
U <sub>e</sub>	15,01	300,00	85,00	25,00	3,00	0,28	600	1614	4	3228	4035	3	600	3228	9	6456	5974	0
U <sub>e</sub>	16,68	300,00	85,00	25,00	3,35	0,28	600	1431	3	2865	3581	3	600	2862	8	5730	5936	1
U <sub>e</sub>	18,58	300,00	85,00	25,00	3,75	0,28	600	1269	3	2533	3166	3	600	2538	7	5066	5889	3
U <sub>e</sub>	20,91	300,00	85,00	25,00	4,25	0,28	600	1103	2	2206	2757	2	600	2206	6	4412	5515	4
U <sub>e</sub>	23,22	300,00	85,00	25,00	4,75	0,28	600	974	2	1948	2434	2	600	1948	5	3895	4869	4
U <sub>e</sub>	30,15	300,00	85,00	25,00	6,30	0,28	600	704	1	1407	1759	2	600	1407	3	2815	3518	3
U <sub>e</sub>	14,11	300,00	100,00	25,00	2,65	0,33	600	2107	6	4329	5502	4	600	4215	13	8658	7123	0
U <sub>e</sub>	15,91	300,00	100,00	25,00	3,00	0,33	600	1855	5	3811	4822	4	600	3710	11	7622	7081	0
U <sub>e</sub>	17,69	300,00	100,00	25,00	3,35	0,33	600	1654	4	3397	4285	3	600	3307	10	6794	7041	1
U <sub>e</sub>	19,70	300,00	100,00	25,00	3,75	0,33	600	1470	3	3020	3793	3	600	2934	8	6041	6996	4
U <sub>e</sub>	22,19	300,00	100,00	25,00	4,25	0,33	600	1292	3	2647	3309	3	600	2582	7	5295	6617	5
U <sub>e</sub>	24,64	300,00	100,00	25,00	4,75	0,33	600	1150	2	2341	2926	2	600	2295	6	4682	5852	4
<b>Total geral</b>																		
									236			238			596			322

Tabela 4. Conjunto de colunas de validação do modelo numérico para a interação LD

Coluna	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t$ (mm)	$b_f/b_w$	$b_s/b_w$	$l$ (mm)	$E$ (MPa)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$N_y$ (N)	$N_{uEXP}$ (N)	Ref.	$N_{uFEM}$ (N)	$N_{uFEM}/N_{uEXP}$
1	104,90	81,60	15,20	0,96	0,78	0,14	2498,00	211700,00	287,20	153939,20	39900,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	42587,60	1,07
2	101,80	82,10	15,50	0,98	0,81	0,15	2499,00	211700,00	292,20	156619,20	42100,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	44677,17	1,06
3	94,90	80,90	16,90	0,98	0,85	0,18	2499,00	211700,00	284,10	152277,60	42000,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	47221,99	1,12
4	152,50	131,20	14,70	1,23	0,86	0,10	1424,50	213300,00	545,20	320577,60	68100,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	74747,00	1,10
5	152,40	131,00	15,80	1,23	0,86	0,10	1426,00	213300,00	547,20	321753,60	71000,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	75876,41	1,07
6	154,50	141,00	15,00	1,21	0,91	0,10	1426,00	213300,00	562,60	330808,80	67700,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	62754,50	0,93
7	110,50	82,20	16,10	1,46	0,74	0,15	1148,00	211200,00	448,10	221361,40	109000,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	118315,99	1,09
8	118,50	82,00	15,70	1,45	0,69	0,13	1149,00	211200,00	456,10	225313,40	102800,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	117530,55	1,14
9	118,60	81,90	15,90	1,47	0,69	0,13	1148,00	211200,00	461,60	228030,40	103600,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	121881,51	1,18
10	203,70	192,70	19,00	1,48	0,95	0,09	1851,50	211200,00	926,90	457888,60	92900,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	89040,56	0,96
11	204,70	191,90	20,60	1,46	0,94	0,10	1849,00	211200,00	918,70	453837,80	94700,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	93052,17	0,98
12	182,10	113,10	19,20	1,93	0,62	0,11	1030,00	203400,00	863,90	290270,40	145200,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	174054,62	1,20
13	181,10	112,50	20,20	1,92	0,62	0,11	1026,00	203400,00	855,00	287280,00	146100,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	175890,21	1,20
14	182,50	122,50	19,40	1,97	0,67	0,11	1027,00	203400,00	920,50	309288,00	142500,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	175539,07	1,23
15	238,90	162,70	21,10	1,97	0,68	0,09	1945,50	203400,00	1192,40	400646,40	129700,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	151123,51	1,17
16	238,20	162,30	23,10	1,95	0,68	0,10	1947,00	203400,00	1185,70	398395,20	131600,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	162384,43	1,23
17	115,00	102,50	25,80	1,97	0,89	0,22	1757,00	203400,00	732,40	246086,40	164000,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	185580,97	1,13
18	114,70	103,10	28,20	1,95	0,90	0,25	1760,50	203400,00	734,60	246825,60	170800,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	184231,88	1,08
19	103,70	103,40	30,30	1,96	1,00	0,29	2101,50	203400,00	727,40	244406,40	174900,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	185511,22	1,06
20	103,80	47,00	19,00	2,43	0,45	0,18	617,50	212600,00	572,30	301029,80	248200,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	262120,69	1,06
21	105,20	51,90	19,20	2,42	0,49	0,18	618,50	212600,00	599,20	315179,20	256700,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	273027,54	1,06
22	101,40	52,80	19,30	2,43	0,52	0,19	616,00	212600,00	596,10	313548,60	254100,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	277307,19	1,09
23	109,80	88,50	19,50	2,42	0,81	0,18	936,50	212600,00	788,10	414540,60	296600,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	339800,84	1,15

Coluna	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t$ (mm)	$b_f/b_w$	$b_s/b_w$	$l$ (mm)	$E$ (MPa)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$N_y$ (N)	$N_{uEXP}$ (N)	Ref.	$N_{uFEM}$ (N)	$N_{uFEM}/N_{uEXP}$
24	114,80	86,40	24,50	2,43	0,75	0,21	940,50	212600,00	817,30	429899,80	299200,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	353976,93	1,18
25	113,90	86,50	26,60	2,43	0,76	0,23	939,00	212600,00	824,70	433792,20	309100,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	358879,04	1,16
26	105,00	103,50	27,20	2,39	0,99	0,26	2098,50	205000,00	875,70	300365,10	212600,00	Young, Silvestre e Camotim [4]	263970,38	1,24
27	97,60	48,70	11,90	1,47	0,50	0,12	1000,40	180000,00	321,60	176880,00	102300,00	Young e Rasmussen [6]	109545,68	1,07
28	96,50	48,90	12,60	1,46	0,51	0,13	1501,20	180000,00	320,50	176275,00	98600,00	Young e Rasmussen [6]	108307,34	1,10
29	119,60	89,70	4,80	1,09	0,75	0,04	800,00	210000,00	334,70	197473,00	49464,00	Kwon e Hancock [23]	31301,43	0,63
30	119,80	89,80	6,00	1,09	0,75	0,05	800,00	210000,00	337,80	199302,00	49752,00	Kwon e Hancock [23]	52369,59	1,05
31	120,80	89,70	7,00	1,10	0,74	0,06	400,00	210000,00	344,00	202960,00	51435,00	Kwon e Hancock [23]	60212,48	1,17
32	120,40	89,60	7,00	1,10	0,74	0,06	600,00	210000,00	343,30	202547,00	53449,00	Kwon e Hancock [23]	58500,83	1,09
33	120,50	89,50	7,00	1,10	0,74	0,06	800,00	210000,00	344,90	203491,00	55176,00	Kwon e Hancock [23]	54471,19	0,99
34	178,00	62,70	12,20	0,96	0,35	0,07	1800,00	193000,00	314,80	65793,20	28800,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	30972,28	1,08
35	178,70	63,10	11,80	0,96	0,35	0,07	1600,00	193000,00	315,40	65918,60	31500,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	30150,47	0,96
36	178,50	62,80	12,30	0,96	0,35	0,07	1400,00	193000,00	315,60	65960,40	31360,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	31641,40	1,01
37	179,50	63,00	11,80	0,96	0,35	0,07	1200,00	193000,00	316,00	66044,00	31750,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	30736,53	0,97
38	178,60	63,00	11,90	0,96	0,35	0,07	1000,00	193000,00	315,30	65897,70	31850,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	32970,90	1,04
39	152,20	56,10	10,50	0,96	0,37	0,07	1800,00	193000,00	274,00	57266,00	29800,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	30321,27	1,02
40	151,80	56,90	10,50	0,96	0,37	0,07	1600,00	193000,00	275,20	57516,80	29350,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	30045,80	1,02
41	151,50	56,80	11,00	0,96	0,37	0,07	1400,00	193000,00	275,70	57621,30	30000,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	32225,53	1,07
42	151,50	56,60	10,90	0,96	0,37	0,07	1200,00	193000,00	275,20	57516,80	28100,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	31865,65	1,13
43	151,00	57,00	10,60	0,96	0,38	0,07	1000,00	193000,00	274,80	57433,20	29500,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	30933,79	1,05
44	127,30	49,00	9,70	0,96	0,39	0,08	1800,00	193000,00	235,10	49135,90	29170,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	29731,86	1,02
45	127,30	49,70	8,50	0,96	0,39	0,07	1600,00	193000,00	233,90	48885,10	26740,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	27756,69	1,04
46	127,60	49,60	9,50	0,96	0,39	0,07	1400,00	193000,00	236,10	49344,90	29850,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	29656,96	0,99
47	127,00	49,00	9,00	0,96	0,39	0,07	1200,00	193000,00	233,40	48780,60	30100,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	28770,37	0,96
48	127,00	49,50	9,00	0,96	0,39	0,07	1000,00	193000,00	234,40	48989,60	29800,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	29185,94	0,98

Coluna	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t$ (mm)	$b_f/b_w$	$b_s/b_w$	$l$ (mm)	$E$ (MPa)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$N_y$ (N)	$N_{uEXP}$ (N)	Ref.	$N_{uFEM}$ (N)	$N_{uFEM}/N_{uEXP}$
49	101,10	63,00	12,00	0,96	0,62	0,12	1800,00	193000,00	241,10	50389,90	29100,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	33574,74	1,15
50	100,60	63,00	12,00	0,96	0,63	0,12	1600,00	193000,00	240,70	50306,30	32350,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	33754,40	1,04
51	100,60	63,00	12,00	0,96	0,63	0,12	1400,00	193000,00	240,70	50306,30	29800,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	34039,95	1,14
52	100,40	63,00	12,00	0,96	0,63	0,12	1200,00	193000,00	240,50	50264,50	32700,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	33946,98	1,04
53	100,50	63,00	12,00	0,96	0,63	0,12	1000,00	193000,00	240,60	50285,40	29800,00	Loughlan, Yidris e Jones [16]	34098,61	1,14
54	109,60	102,90	10,70	1,10	0,94	0,10	2529,00	179468,00	354,00	121068,00	31500,00	Salles [11]	26565,40	0,84
55	103,10	103,90	10,40	1,10	1,01	0,10	2529,00	181724,00	364,80	125126,40	33400,00	Salles [11]	27204,01	0,81
56	108,80	102,90	10,50	1,10	0,95	0,10	2529,00	180027,00	366,00	127368,00	29000,00	Salles [11]	26885,73	0,93
57	40,54	30,21	6,03	1,03	0,75	0,15	356,30	239490,00	112,17	75135,95	56800,00	Huang et al. [15]	56880,03	1,00
58	39,90	30,04	6,16	1,01	0,75	0,15	356,30	239490,00	109,34	73240,31	57660,00	Huang et al. [15]	56450,39	0,98
59	39,97	30,10	6,11	1,02	0,75	0,15	356,40	239490,00	109,39	73273,80	56920,00	Huang et al. [15]	56685,19	1,00
60	40,21	30,44	5,83	1,03	0,76	0,14	556,60	239490,00	111,89	74948,40	54140,00	Huang et al. [15]	52434,52	0,97
61	39,89	30,23	6,13	1,03	0,76	0,15	556,50	239490,00	111,74	74847,92	51690,00	Huang et al. [15]	54866,20	1,06
62	39,75	30,22	6,12	1,03	0,76	0,15	556,60	239490,00	111,56	74727,35	52080,00	Huang et al. [15]	54091,86	1,04
63	40,09	29,85	9,15	1,01	0,74	0,23	356,40	239490,00	115,19	77158,87	59890,00	Huang et al. [15]	69839,29	1,17
64	39,93	30,21	9,12	1,02	0,76	0,23	356,30	239490,00	116,80	78237,31	60390,00	Huang et al. [15]	71169,62	1,18
65	40,05	29,81	9,12	1,01	0,74	0,23	356,50	239490,00	115,01	77038,30	60900,00	Huang et al. [15]	69767,05	1,15
66	39,93	30,01	9,14	1,03	0,75	0,23	556,40	239490,00	117,53	78726,30	62860,00	Huang et al. [15]	71573,26	1,14
67	40,00	29,96	9,22	1,02	0,75	0,23	556,40	239490,00	116,57	78083,25	62010,00	Huang et al. [15]	70591,37	1,14
68	40,29	29,88	9,07	1,03	0,74	0,23	556,60	239490,00	117,49	78699,50	61650,00	Huang et al. [15]	71296,92	1,16
69	59,93	30,17	6,03	1,02	0,50	0,10	356,60	239490,00	130,82	87628,47	56430,00	Huang et al. [15]	60552,53	1,07
70	59,93	30,14	6,04	1,01	0,50	0,10	357,00	239490,00	129,53	86764,38	55300,00	Huang et al. [15]	59773,39	1,08
71	59,96	30,02	6,19	1,02	0,50	0,10	356,50	239490,00	130,87	87661,96	55490,00	Huang et al. [15]	61412,73	1,11
72	59,91	30,20	6,03	1,01	0,50	0,10	557,10	239490,00	129,61	86817,96	53350,00	Huang et al. [15]	55995,77	1,05
73	59,97	30,08	6,07	1,01	0,50	0,10	556,20	239490,00	129,51	86750,98	51880,00	Huang et al. [15]	56329,49	1,09

Coluna	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t$ (mm)	$b_f/b_w$	$b_s/b_w$	$l$ (mm)	$E$ (MPa)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$N_y$ (N)	$N_{uEXP}$ (N)	Ref.	$N_{uFEM}$ (N)	$N_{uFEM}/N_{uEXP}$
74	59,90	30,22	6,10	1,01	0,50	0,10	556,90	239490,00	129,79	86938,53	52560,00	Huang et al. [15]	56463,79	1,07
75	60,02	30,09	9,06	1,02	0,50	0,15	356,80	239490,00	136,92	91714,49	59210,00	Huang et al. [15]	70565,04	1,19
76	60,02	29,90	9,18	1,02	0,50	0,15	357,20	239490,00	136,78	91620,72	59660,00	Huang et al. [15]	70633,17	1,18
77	59,96	30,32	8,92	1,01	0,51	0,15	356,80	239490,00	135,74	90924,08	60430,00	Huang et al. [15]	69568,21	1,15
78	59,97	30,24	9,06	1,02	0,50	0,15	556,30	239490,00	137,18	91888,65	60450,00	Huang et al. [15]	71112,10	1,18
79	59,95	30,11	9,10	1,01	0,50	0,15	556,50	239490,00	135,67	90877,19	60800,00	Huang et al. [15]	70019,47	1,15
80	60,14	30,34	8,92	1,01	0,50	0,15	557,10	239490,00	135,97	91078,14	60080,00	Huang et al. [15]	69641,99	1,16

Tabela 5. Conjunto de colunas de validação do modelo numérico para a interação LDG

Coluna	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t$ (mm)	$b_f/b_w$	$b_s/b_w$	$l$ (mm)	$E$ (MPa)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$N_y$ (N)	$N_{uEXP}$ (N)	Ref.	$N_{uFEM}$ (N)	$N_{uFEM}/N_{uEXP}$
1	53,50	56,70	12,50	0,99	1,06	0,23	1395,00	211000,00	174,20	104000,00	46150,00	Young, Dinis e Camotim [5]	45396,90	0,98
2	57,50	61,40	12,40	1,00	1,07	0,22	1651,00	211000,00	188,44	112500,00	44780,00	Young, Dinis e Camotim [5]	41325,54	0,92
3	57,60	61,40	12,50	1,00	1,07	0,22	1649,00	211000,00	189,45	113100,00	44200,00	Young, Dinis e Camotim [5]	41926,06	0,95
4	62,60	66,20	12,50	1,00	1,06	0,20	1951,00	211000,00	202,85	121100,00	39830,00	Young, Dinis e Camotim [5]	37792,73	0,95
5	68,70	71,00	12,50	0,98	1,03	0,18	2300,00	211000,00	211,89	126500,00	39680,00	Young, Dinis e Camotim [5]	33358,92	0,84
6	70,80	72,30	12,20	1,19	1,02	0,17	1896,00	213000,00	240,74	143000,00	61670,00	Young, Dinis e Camotim [5]	54673,28	0,89
7	70,90	78,30	11,90	1,20	1,10	0,17	2004,00	213000,00	254,55	151200,00	59190,00	Young, Dinis e Camotim [5]	51032,69	0,86
8	75,70	82,90	12,00	1,19	1,10	0,16	2302,00	213000,00	266,84	158500,00	49490,00	Young, Dinis e Camotim [5]	47271,97	0,96
9	82,10	87,70	11,80	1,17	1,07	0,14	2603,00	213000,00	277,10	164600,00	47460,00	Young, Dinis e Camotim [5]	44330,06	0,93
10	58,00	48,20	12,80	0,98	0,83	0,22	1401,00	211000,00	162,98	97300,00	51130,00	Young, Dinis e Camotim [5]	47045,64	0,92
11	63,30	52,60	12,70	0,99	0,83	0,20	1602,00	211000,00	176,72	105500,00	50550,00	Young, Dinis e Camotim [5]	46285,55	0,92
12	62,70	63,90	12,40	0,99	1,02	0,20	1699,00	211000,00	195,81	116900,00	42590,00	Young, Dinis e Camotim [5]	40106,70	0,94
13	68,50	57,30	12,80	0,99	0,84	0,19	1899,00	211000,00	189,61	113200,00	46240,00	Young, Dinis e Camotim [5]	41472,33	0,90

Coluna	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t$ (mm)	$b_f/b_w$	$b_s/b_w$	$l$ (mm)	$E$ (MPa)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$N_y$ (N)	$N_{uEXP}$ (N)	Ref.	$N_{UFEM}$ (N)	$N_{UFEM}/N_{uEXP}$
14	73,20	63,30	12,40	1,20	0,86	0,17	1851,00	213000,00	227,61	135200,00	66820,00	Young, Dinis e Camotim [5]	60639,16	0,91
15	78,40	68,40	12,50	1,17	0,87	0,16	2100,00	213000,00	237,37	141000,00	60740,00	Young, Dinis e Camotim [5]	54828,95	0,90
16	83,30	73,40	11,90	1,18	0,88	0,14	2402,00	213000,00	251,35	149300,00	55470,00	Young, Dinis e Camotim [5]	48443,10	0,87
17	88,50	78,30	12,30	1,20	0,88	0,14	2750,00	213000,00	273,40	162400,00	52060,00	Young, Dinis e Camotim [5]	47498,32	0,91
18	33,70	60,00	9,70	1,52	1,78	0,29	2400,00	191330,00	247,40	69534,24	17750,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	18992,88	1,07
19	33,20	60,00	9,70	1,53	1,81	0,29	2000,00	191330,00	248,20	69759,09	19690,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	21310,83	1,08
20	30,50	40,10	10,60	1,53	1,31	0,35	2350,00	191330,00	186,10	52305,27	13010,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	14524,25	1,12
21	30,30	40,40	10,60	1,53	1,33	0,35	2440,00	191330,00	186,90	52530,11	13370,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	14017,79	1,05
22	30,20	40,70	10,30	1,52	1,35	0,34	2000,00	191330,00	187,20	52614,43	16160,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	16501,03	1,02
23	30,50	40,60	10,50	1,52	1,33	0,34	2000,00	191330,00	188,70	53036,02	16350,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	16745,73	1,02
24	30,40	30,00	10,60	1,53	0,99	0,35	2340,00	194720,00	155,40	40237,72	13370,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	12405,97	0,93
25	29,30	30,40	10,60	1,53	1,04	0,36	2350,00	194720,00	154,60	40030,58	11840,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	11623,89	0,98
26	30,10	30,40	10,30	1,53	1,01	0,34	2000,00	191330,00	154,70	43479,98	13980,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	14591,90	1,04
27	30,20	30,10	10,50	1,53	1,00	0,35	2000,00	191330,00	154,90	43536,19	14610,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	14680,84	1,00
28	47,90	60,90	9,20	1,52	1,27	0,19	2400,00	191330,00	270,60	76054,84	25800,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	26081,72	1,01
29	51,10	60,10	9,80	1,52	1,18	0,19	2000,00	191330,00	275,20	77347,71	31850,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	34540,79	1,08
30	47,70	44,50	10,20	1,55	0,93	0,21	2400,00	191330,00	227,90	64053,57	25630,00	Jayasidhan, Anil Kumar e Aswathy [2]	23651,48	0,92
31	79,10	66,00	11,70	1,07	0,83	0,15	2600,00	188710,00	250,92	88573,00	36700,00	Santos [10]	32042,76	0,87
32	79,30	66,00	11,75	1,09	0,83	0,15	2550,00	188710,00	255,93	90344,00	37500,00	Santos [10]	33757,86	0,90
33	78,90	65,95	11,80	1,09	0,84	0,15	2500,00	188710,00	255,50	90190,09	37000,00	Santos [10]	34352,35	0,93
34	79,50	66,05	11,80	1,08	0,83	0,15	2350,00	188710,00	254,02	89667,65	37600,00	Santos [10]	36232,64	0,96
35	79,50	65,85	11,85	1,07	0,83	0,15	2200,00	188710,00	251,34	88724,08	39400,00	Santos [10]	37771,11	0,96
36	79,40	65,80	11,90	1,08	0,83	0,15	2150,00	188710,00	253,58	89515,15	38400,00	Santos [10]	39070,82	1,02
37	75,30	61,45	11,70	1,09	0,82	0,16	2350,00	188710,00	241,54	85265,03	34700,00	Santos [10]	34677,87	1,00
38	75,10	61,35	11,85	1,09	0,82	0,16	2300,00	188710,00	241,44	85226,56	39000,00	Santos [10]	35668,22	0,91

Coluna	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t$ (mm)	$b_f/b_w$	$b_s/b_w$	$l$ (mm)	$E$ (MPa)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$N_y$ (N)	$N_{uEXP}$ (N)	Ref.	$N_{UFEM}$ (N)	$N_{UFEM}/N_{uEXP}$
39	75,10	61,05	11,65	1,07	0,81	0,16	2250,00	188710,00	235,94	83285,06	42000,00	Santos [10]	35246,44	0,84
40	74,80	61,40	11,75	1,08	0,82	0,16	2100,00	188710,00	238,79	84292,16	38100,00	Santos [10]	38251,11	1,00
41	67,10	56,05	11,70	1,07	0,84	0,17	1900,00	188710,00	216,78	76524,05	32500,00	Santos [10]	37230,85	1,15
42	67,00	56,10	11,70	1,08	0,84	0,17	1850,00	188710,00	218,81	77239,22	38400,00	Santos [10]	38752,99	1,01
43	66,40	56,10	11,85	1,09	0,84	0,18	1800,00	188710,00	220,51	77838,97	36300,00	Santos [10]	40231,32	1,11
44	66,80	55,80	11,70	1,07	0,84	0,18	1650,00	188710,00	215,93	76221,88	43900,00	Santos [10]	42143,33	0,96
45	66,50	55,95	11,80	1,06	0,84	0,18	1550,00	188710,00	214,12	75584,36	42800,00	Santos [10]	43377,85	1,01
46	66,60	56,05	11,75	1,06	0,84	0,18	1500,00	188710,00	214,33	75659,20	43100,00	Santos [10]	44067,81	1,02