



ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE MODOS DE FLAMBAGEM LOCAL E
DISTRORCIONAL EM PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO COM SEÇÃO U
ENRIJECIDO SOB COMPRESSÃO AXIAL

Gustavo Yoshio Matsubara

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Eduardo de Miranda Batista
Juarez Moara Santos Franco

Rio de Janeiro
Março de 2018

ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE MODOS DE FLAMBAGEM LOCAL E
DISTRORCIONAL EM PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO COM SEÇÃO U
ENRIJECIDO SOB COMPRESSÃO AXIAL

Gustavo Yoshio Matsubara

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Eduardo de Miranda Batista, D.Sc.

Prof. Juarez Moara Santos Franco, D.Sc.

Prof. Alexandre Landesmann, D.Sc.

Prof^a. Arlene Maria Cunha Sarmanho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2018

Matsubara, Gustavo Yoshio

Análise da interação entre modos de flambagem local e distorcional em perfis de aço formados a frio com seção U enrijecido sob compressão axial/ Gustavo Yoshio Matsubara. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

X, 104 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Eduardo de Miranda Batista

Juarez Moara Santos Franco

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 73-76.

1. Interação local e distorcional. 2. Colunas de Perfis Formados a Frio. 3. Análise Numérica. I. Batista, Eduardo de Miranda *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por tornar tudo isso possível.

A minha família e namorada por me passar força nesses dois anos difíceis, mas de muito aprendizado.

Aos meus orientadores Eduardo de Miranda Batista e Juarez Moara Santos Franco pelos conhecimentos passados que possibilitaram vencer as dificuldades que surgiram ao longo de todo percurso da pesquisa. Esses ensinamentos me ajudaram a crescer muito como pessoa e como engenheiro.

A meus amigos do mestrado que levarei por toda vida, em especial, aos colegas do laboratório de estruturas (Labest), Materiais (Numats) e pavimentação (Geotecnia). O aprendizado de vida e as lembranças de vocês levarei por toda vida e serei sempre grato pelos momentos que passamos juntos, até mesmo nas piores dificuldades.

A todos os professores da COPPE que me passaram seus conhecimentos para conseguir chegar aqui hoje.

A todos os meus professores de graduação que me incentivaram a seguir na área acadêmica, em especial aos meus orientadores e colaboradores de iniciação científica e trabalho de conclusão de curso, Ronaldo Izzo, Juliana Rose e Adalberto Matoski.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE MODOS DE FLAMBAGEM LOCAL E
DISTORCIONAL EM PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO COM SEÇÃO U
ENRIJECIDO SOB COMPRESSÃO AXIAL

Gustavo Yoshio Matsubara

Março/2018

Orientadores: Eduardo de Miranda Batista

Juarez Moara Santos Franco

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho apresenta resultados numéricos em elementos finitos (MEF) com auxílio do programa comercial ANSYS de colunas de perfis U enrijecidos de aço formados a frio sujeitos a compressão axial. Esses elementos devido a esbeltez de suas paredes ficam sujeitas a modos de instabilidades local, distorcional e global, podendo interagir esses modos entre eles. As interações podem ocorrer quando dois ou três modos de instabilidades se manifestam simultaneamente, resultando assim em um fenômeno de natureza complexa. Uma das interações que necessita um grande volume de estudo e que é tema central da pesquisa é a interação local - distorcional (LD). Para o estudo desse fenômeno foi realizado (i) revisão bibliográfica de trabalhos numéricos e experimentais que apresentavam essa interação (ii) calibração do modelo de elementos finitos comparando com resultados numéricos e experimentais (iii) criação de uma proposta de equação para lidar com esse fenômeno (iv) validação das equações propostas com resultados numéricos e experimentais (v) verificação dos coeficientes de ponderação da resistência das equações propostas (vi) criação de uma superfície contínua de resistência. Após a apresentação dos resultados, concluiu-se que as equações propostas no formato MRD ($P_{prop1-2}$ e P_{prop3}), apresentam ótimos resultados quando comparados com 54 colunas experimentais e mais de 250 colunas numéricas. Por fim, o coeficiente de ponderação da resistência das equações propostas se encontram próximos aos valores presentes na NBR 14762 (ABNT, 2010).

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

LOCAL-DISTORTIONAL BUCKLING MODES INTERACTION IN COLD-FORMED STEEL LIPPED CHANNEL IN AXIAL COMPRESSION

Gustavo Yoshio Matsubara

March/2018

Advisors: Eduardo de Miranda Batista

Juarez Moara Santos Franco

Department: Civil Engineering

The present work presents numerical results of finite elements (MEF) of cold-formed steel lipped channel columns in axial compression using ANSYS commercial software. These columns are subject to instabilities modes called local, distortional and global buckling and they can interact with each other. These interactions can occur when two or three buckling modes manifest simultaneously, resulting in a complex phenomenon. The local-distortional mode is one of the most important buckling interactions that need a large volume of study and hence is the central theme of this research project. The present work includes: (i) literature review of experimental and numerical research on L-D interaction, (ii) calibration of the FEM model based on comparison between numerical and experimental results, (iii) creation of two equations to deal with this phenomenon, called $P_{prop1-2}$ and P_{prop3} , (iv) validation of these two equations based on numerical and experimental results, (v) estimation of resistance factor of these two equations (vi) proposition of a continuous resistance surface. Based on the results, the ultimate compression load DSM equations ($P_{prop1-2}$ and P_{prop3}) have excellent results when compared to 54 experimental columns and more than 250 numerical columns and the resistance factor presents a very close result to the Brazilian Code (NBR 14762, 2010).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....	3
2	ESTADO DA ARTE E METODOLOGIA DA PESQUISA.....	5
2.1	FLAMBAGEM DE PERFIS FORMADOS A FRIO SOB COMPRESSÃO AXIAL	5
2.2	CÁLCULO DE FORÇA CRÍTICA DE FLAMBAGEM.....	7
2.3	CURVA DE ASSINATURA (ANÁLISE DE ESTABILIDADE ELÁSTICA).....	8
2.4	ANÁLISE DA FLAMBAGEM ELÁSTICA E INTERAÇÃO ENTRE MODOS.....	10
2.5	TIPOS DE INTERAÇÃO LD.....	12
2.6	ESBELTEZ DAS COLUNAS	13
2.7	MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA PARA COLUNAS (MRD).....	16
2.8	MÉTODOS NUMÉRICOS PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL ...	19
2.8.1	<i>Elemento de casca utilizado: SHELL 181</i>	19
2.8.2	<i>Imperfeições iniciais</i>	20
3	MODELO NUMÉRICO	23
3.1	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	24
4	ANÁLISE PARAMÉTRICA	31
4.1	METODOLOGIA DA ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	31
4.2	ESTUDO PARAMÉTRICO COM A VARIAÇÃO DA ESPESSURA	31
4.3	ESTUDO PARAMÉTRICO COM A VARIAÇÃO DA VARIAÇÃO B_f/B_w	48
4.3.1	<i>Proposta 1-2 – Formulação complementar de b_f/b_w ($P_{prop1-2}$)</i>	52
4.3.2	<i>Proposta 3 – Baseada em uma única relação de b_f/b_w (P_{prop3})</i>	58
4.4	ESTUDO PARAMÉTRICO COM A VARIAÇÃO DA VARIAÇÃO D/B_w	62
4.5	COEFICIENTE DE PONDERAÇÃO DA RESISTÊNCIA	64
4.6	METODOLOGIA SIMPLIFICADA ADOTADA EM PROJETOS DE ENGENHARIA	66
5	CONCLUSÕES.....	69
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

SÍMBOLOS E SIGLAS

Letras Latinas maiúsculas

A – coeficiente da curva de Winter a ser ajustada

B – Coeficiente da curva de Winter a ser ajustada

E - módulo de elasticidade longitudinal do aço

D - flambagem distorcional; largura do enrijecedor

L - comprimento da coluna; flambagem local

P_{crL} - carga crítica de flambagem local

P_{crD} - carga crítica de flambagem distorcional

P_{crG} - carga crítica de flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção

P_n - resistência nominal à compressão

P_{nL} - carga axial de compressão resistente nominal para flambagem local

P_{nD} - carga axial de compressão resistente nominal para flambagem distorcional

P_{nG} - carga axial de compressão resistente nominal para flambagem global por flexão, torção e flexo-torção

P_y - carga relativa ao escoamento do aço

X_f - valor médio do fator fabricação

X_m - valor médio do fator material

$R_{\lambda DL}$ – Relação λ_D / λ_L

Letras latinas minúsculas

b_f - largura da mesa da seção transversal

b_w - largura da alma da seção transversal do perfil

d_1 – deslocamento da alma quando sujeito a flambagem local

d_2 – deslocamento da mesa quando sujeito a flambagem distorcional

f_y - tensão de escoamento do aço

m - grau de liberdade; média

n - número de ensaios

t - espessura nominal da parede da seção transversal do perfil; espessura medida média da parede da seção transversal do perfil

Letras gregas minúsculas

β_0 - índice de confiabilidade alvo

γ - coeficiente de ponderação da resistência

δ_f - coeficiente de variação do fator fabricação

δ_m - coeficiente de variação do fator material

δ_t - coeficiente de variação obtido nos ensaios (relação entre desvio padrão e o valor médio), tomando sempre maior ou igual a 6,5%

λ_D - esbeltez referente à flambagem distorcional

λ_G - esbeltez referente à flambagem global

λ_L - esbeltez referente à flambagem local

1 Introdução

1.1 Considerações Gerais

A NBR 14762 (ABNT, 2010) define os perfis formado a frio como sendo: “perfil obtido por dobramento, em prensa dobradeira, de tiras cortadas de chapas ou bobinas, ou por conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas, a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente, revestidas ou não, sendo ambas as operações realizadas com o aço em temperatura ambiente”.

Uma das primeiras pesquisas sobre esse material teve início em 1939, na Universidade de Cornell com professor George Winter. O objetivo dessa pesquisa era obter informações estruturais consistentes sobre os perfis formados a frio com intuito de formular um projeto específico de normas técnicas.

Atualmente, os perfis formados a frio são bastante versáteis na construção civil sendo algumas de suas aplicações em galpões, edifícios de pequena altura, andaimes, escoramentos, terças, longarinas, residências, entre outros.

A Figura 1.1 mostra uma residência construída com perfis formados a frio, com a utilização de perfis U e U enrijecidos, segundo sistema *steel frame*.



Figura 1.1 – Construção de uma residência em perfil formado a frio (YU, 2000).

Além dessa versatilidade, existem vantagens no uso de perfis formados a frio em relação ao concreto e madeira, sendo algum deles:

- (i) Mais leves;
- (ii) Alta resistência e ductilidade;
- (iii) Facilidade na fabricação;
- (iv) Agilidade na instalação e transporte;
- (v) Qualidade mais uniforme;
- (vi) Material reciclável.

Algumas outras vantagens dos perfis de aço formado a frio em relação aos perfis de aço laminados que são:

- (i) Boa relação resistência por unidade de massa;
- (ii) Variedade de formas de seções transversais que podem ser obtidas;

Apesar dessas características favoráveis, o colapso estrutural desses perfis inclui uma combinação de fenômenos de natureza complexa, como por exemplo, efeitos da flambagem e plastificação. Com isso, algumas características negativas são mencionadas por (FENA, 2011):

- (i) Reduzida rigidez a torção, principalmente em perfis de seção aberta;
- (ii) Devido à elevada esbeltez de suas paredes, favorece a ocorrência de flambagem local, sendo caracterizada pela flexão das paredes sem deslocamento dos bordos longitudinais internos.

Os principais fenômenos de flambagem dos perfis formados a frio são classificadas como: local, distorcional e global, podendo ocorrer combinações variadas entre eles.

A interação entre os modos de flambagem ocorre quando as cargas críticas correspondentes a esses modos coincidem ou apresentam valores próximos o suficiente para acionar essa interação. Um exemplo de interação local-distorcional-global pode ser observado na Figura 1.2.



Figura 1.2 –Interação dos modos de flambagem local-distorcional-global em ensaios experimentais (SANTOS, 2014).

O presente trabalho visa estudar o fenômeno de interação entre os modos de flambagem local-distorcional (LD) em colunas de perfis U enrijecidos. O perfil mencionado está apresentado na Figura 1.4.



Figura 1.3 – Perfil formado a frio U enrijecido(PERFIL NORTE, 2011).

1.2 Motivação e objetivos

A motivação da presente pesquisa se dirige para o caso do modo de flambagem em perfis de aço formados a frio, na compressão axial, resultante da interação entre os modos local e distorcional, reconhecido na literatura como interação LD. Esse fenômeno conduz a fenômeno de pós flambagem e mecanismos de colapso distintos dos casos já plenamente resolvidos, quando se trata, por exemplo, da interação local-global, LG, assim como dos demais casos de interação DG ou LDG. Nesse sentido, constatamos ausência de formulações em normas de projeto que contemple esse fenômeno, incluindo nesse caso a norma brasileira NBR 14762 (ABNT, 2010).

Como os demais casos de interação entre modos de flambagem em perfis de aço formados a frio com paredes finas, o caso LD obriga a consideração da pós flambagem não linear, assim como a identificação da participação dos modos L e D no desenvolvimento do mecanismo final de colapso. Para isso, resultados experimentais e modelos de análise numérica são de importância fundamental, de modo a permitir a investigação do comportamento das colunas, além da verificação procedimentos práticos para projeto de estruturas. Considerando a relevância e necessidade de investigações consagradas à interação LD, decidiu-se pelo planejamento e execução da presente pesquisa.

O objetivo da presente pesquisa é a determinação das variáveis relevantes no fenômeno da interação LD em perfis formados a frio na compressão axial, seguido da proposição de formulação suficientemente precisa e simples, visando seu emprego no dimensionamento corrente em estruturas de aço. O ponto de partida e foco da pesquisa se assenta na suposição de que a resistência de perfis formados a frio com seção U enrijecido, na compressão axial, deve obedecer uma função contínua e dependente das variáveis geométricas dominantes no fenômeno. Nesse sentido, a adoção dos princípios do método da resistência direta proposto originalmente por SCHAFER e PEKOZ (1998a) decorreu de forma natural no presente estudo, levando em conta ainda que tal método é parte integrante da norma brasileira (ABNT, 2010). Para o desenvolvimento dessa formulação, a pesquisa foi desenvolvida com base em resultados experimentais divulgados por outros autores, complementados por análise estrutural com auxílio do método dos elementos finitos, em modelo de autoria do autor da presente dissertação.

2 Estado da arte e metodologia da pesquisa

2.1 Flambagem de perfis formados a frio sob compressão axial

As colunas de perfis de aço formados frio devido às suas paredes esbeltas, ficam propensas a desenvolverem três modos de flambagem, tais como local, distorcional e global, sendo esse último por flexão ou por flexo-torção. A descrição das principais características de cada modo é apresentada a seguir:

a) **Modo Local:** A flambagem local apresenta flexão das chapas constituintes do perfil, sem o deslocamento ou mudanças de ângulos das arestas de encontros das chapas que compõem o mesmo (pontos circulados). A figura 2.1 mostra a ocorrência do modo local em um perfil U enrijecido. Esse modo é a extensão do modo de flambagem de placa (THIMOSHENKO e GERE, 1961), aplicado a placas associadas.

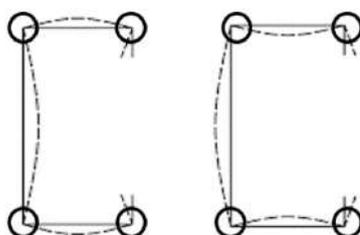


Figura 2.1– Flambagem local de perfil U enrijecido submetido a compressão axial.

O comprimento de semi-onda desse modo de flambagem é caracterizado por ser mais curto quando comparado com o comprimento de semi-onda dos modos distorcional e semi-onda global. As diferenças entre os comprimentos de semi-ondas podem ser observadas na Figura 2.4.

b) **Modo Distorcional:** Esse modo se diferencia do modo local pois não ocorre a conservação da posição original dos cantos dobrados da seção do perfil, sendo caracterizado nesse tipo de perfil pela abertura e fechamento das mesas. A figura 2.2 mostra a ocorrência do modo distorcional em um perfil U enrijecido.

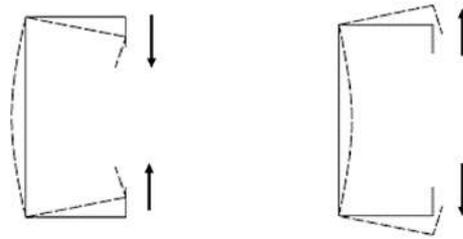


Figura 2.2– Flambagem distorcional de um perfil U enrijecido submetido a compressão axial.

O comprimento de meia onda produzido pela flambagem distorcional é maior que o da instabilidade local, porém, mais curto que o comprimento de onda produzido pela flambagem global (Figura 2.4).

c) **Modo Global:** A instabilidade global é ocasionada pelo fenômeno de flexão da peça em seu eixo de menor inércia ou uma combinação de flexão e torção (flexotorção). A Figura 2.3 mostra os dois tipos de instabilidades globais.



Figura 2.3 –Modos de flambagem global: (a) flexão na menor inércia (b) flexotorção.

No caso da instabilidade global por flexão, ocorre o movimento da seção transversal do perfil com amplitudes diferentes ao longo da coluna, assumindo assim uma forma curva.

A flambagem global por flexo-torção, é ocasionada pela combinação da torção e flexão segundo o eixo de maior inércia.

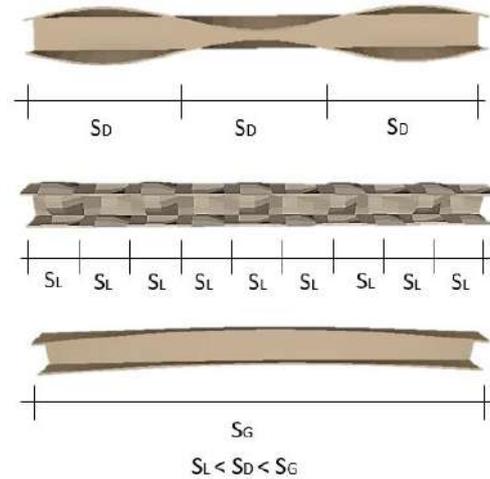


Figura 2.4 – Representação do comprimento de semi-onda distorcional (S_D), semi-onda local (S_L) e semi-onda global (S_G) gerados no GBTUL (BEBIANO *et al.*, 2010), para um perfil de mesmo comprimento.

2.2 Cálculo de força crítica de flambagem

A força crítica pode ser definida como a força máxima que uma coluna ideal (perfeitamente reta) pode suportar antes que ocorra a flambagem. A NBR 14762 (ABNT, 2010) oferece algumas formulações para lidar com forças críticas de flambagem nas condições simplesmente apoiadas.

a) Força crítica local: A formulação para força crítica de flambagem local de placa isolada pode ser verificado em THIMOSHENKO e GERE (1961), porém, para aplicação de placas associadas, essa equação foi estendida por VON KÁRMÁN *et al.* (1932), sendo válidas apenas para casos em que as placas não apresentam tensões residuais e imperfeições geométricas. Para contornar essa limitação, WINTER (1947) reformulou essa equação através de coeficientes semi-empíricos, originando assim, o Método da Largura Efetiva (MLE). Mais recentemente, BATISTA (2010) propôs o Método da Seção Efetiva (MSE) que visa calcular analiticamente de maneira mais precisa e rápida a carga crítica de flambagem local em placas associadas quando comparado com o Método da Largura Efetiva. Por último, outra alternativa é calcular a carga crítica de flambagem local através da utilização de programas computacionais, sendo os mais usuais o GBTUL (BEBIANO *et al.*, 2010) e CUFSM (LI e SCHAFER, 2010).

b) Força crítica distorcional: A formulação para força crítica de flambagem distorcional possui algumas propostas de fórmulas analíticas para lidar com essa

flambagem, sendo elas desenvolvidas por LAU e HANCOCK (1986), SCHAFFER (1997), SILVESTRE e CAMOTIM (2010) e mais recentemente, CARDOSO *et al.* (2017) desenvolveram alguns modelos de formulações para lidar com o modo de flambagem elástica distorcional.

c) **Força crítica global:** Para lidar com a flambagem elástica global já existem formulações analíticas que podem ser encontradas em THIMOSHENKO e GERE (1961) que lidam com esse fenômeno, sendo verificado principalmente a flambagem por flexão na menor inércia e flexo-torção.

2.3 Curva de assinatura (análise de estabilidade elástica)

A curva de assinatura é a representação gráfica das cargas críticas de colunas e vigas que descrevem o perfil analisado com a variação do comprimento. Sendo assim, é possível obter essas curvas através de alguns programas como o CUFSM (LI e SCHAFFER, 2010), baseado no método das faixas finitas ou o GBTUL (BEBIANO *et al.*, 2010), baseado no método da teoria generalizada de vigas.

Essa representação gráfica do comportamento da força crítica dos perfis através de um gráfico é de grande utilidade para projetar colunas e vigas prevendo o modo pelo qual o perfil irá ocorrer a perda de estabilidade.

Um exemplo é um perfil U enrijecido 120x90x8x1(mm), apresentando módulo de elasticidade igual a 210GPa, coeficiente de Poisson equivalente a 0,3 e com condições de extremidades simplesmente apoiadas e empenamento livre (Figura 2.5).

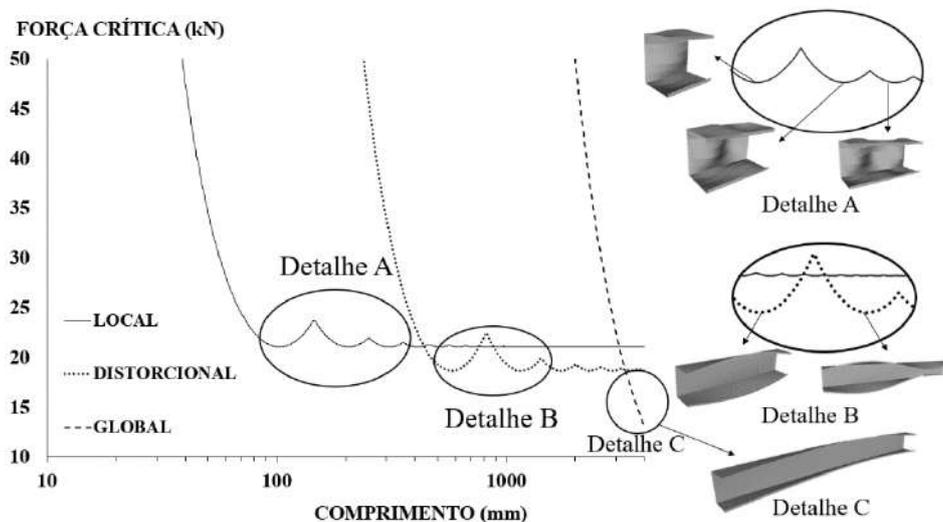


Figura 2.5 – Curva de assinatura exemplo U enrijecido 120x90x8x1(mm) com suas semi-ondas sendo replicadas na horizontal (condição biapoiada).

É possível observar para esse exemplo de coluna (Figura 2.5) simplesmente apoiada que a flambagem local apresenta valor mínimo de força crítica para comprimento próximos de 100 mm e, conforme aumenta-se o comprimento do perfil, observamos a replicação de forma harmônica das semi-ondas locais, sem alteração da carga crítica mínima (21kN).

A flambagem distorcional apresenta um comportamento similar ao modo local, porém, para o caso analisado, é acionado a partir de um comprimento aproximado de 515 mm e, com isso, tem-se a replicação harmônica das semi-ondas distorcionais (detalhe B) até que se atinja o comprimento de flambagem global. Pelo fato da flambagem distorcional apresentar carga crítica menor que a local, ocorre a partir desse comprimento (aproximadamente 515 mm) a mudança de flambagem local para distorcional.

A flambagem global passa a ser dominante a partir do comprimento aproximado de 3300 m e, como consequência, ocorre a transição do modo de flambagem distorcional para global. Os valores de força crítica global seguem a curva tracejada em declínio apresentado no detalhe C da Figura 2.5.

Apesar desse exemplo apresentado ser na condição biapoiada, ou seja, extremidades com rotações de flexão livres e empenamento igualmente livre, na maioria dos casos experimentais, os perfis são testados na forma biengastada devido ao fato dos perfis serem soldados a chapas de extremidades.

Para casos de perfis biengastados, ou seja, com suas extremidades apresentando rotações impedidas e empenamento igualmente impedido, o perfil ainda apresenta a replicação de semiondas, porém, nessa condição ocorre a diminuição da força crítica para cada modo de flambagem replicado. Essa condição está ilustrada na Figura 2.6.

O aumento do comprimento do perfil, induzem as forças críticas (local e distorcional) a convergirem para a condição biapoiada. Os valores das cargas críticas (local e distorcional) com a mesma seção transversal na condição biapoiada do exemplo em questão (Figura 2.6) podem ser verificados na Figura 2.5. Esses valores de forças críticas na condição biapoiada estão representadas na Figura 2.6 com duas linhas tracejadas denominadas de Linha 1 e Linha 2, sendo referidas ao modo local e a ao modo distorcional, respectivamente.

O fenômeno de convergência dos valores de carga crítica para a condição biapoiada pode ser melhor explicado pelo fato do aumento de comprimento inibir

gradualmente a influência dos efeitos de extremidades na coluna, tendendo assim para a condição biapoada.

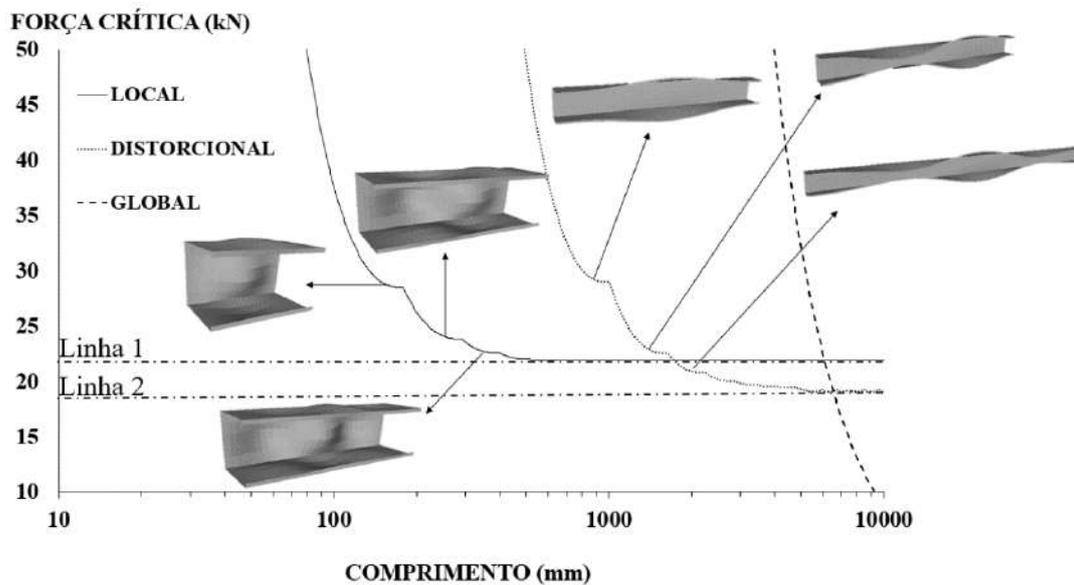


Figura 2.6- Curva de assinatura de coluna U enrijecido 120x90x8x1(mm) na condição biengastada.

2.4 Análise da flambagem elástica e interação entre modos

A previsão da interação entre os modos de flambagem pode ser prevista com dados obtidos da curva de assinatura.

Para o caso biapoado, essa previsão é feita em perfis que possuem a replicação dos modos local e distorcional sobrepostos. Como já mencionado, as colunas na condição biapoada replicam suas semi-ondas L e D sem alteração da carga crítica. Como consequência, quando se tem a sobreposição de múltiplas semi-ondas L e D, tem-se a interação LD em múltiplos comprimentos, sendo diferenciado pelo número de semi-ondas LD geradas.

Um exemplo da descrição anterior pode ser observado na Figura 2.7 no qual para um perfil U enrijecido 100x50x5x1 mm e com comprimento de 270 mm, uma semi-onda distorcional soma-se com o duas semi-ondas locais devido à sobreposição da curva local e distorcional (detalhe A). Caso aumente o comprimento da peça para 580 mm, as semi-ondas locais e distorcionais continuam se replicando, ocorrendo uma sobreposição dessas novas semi-ondas pela combinação de seis semi-ondas locais com duas semi-ondas distorcionais (detalhe B).

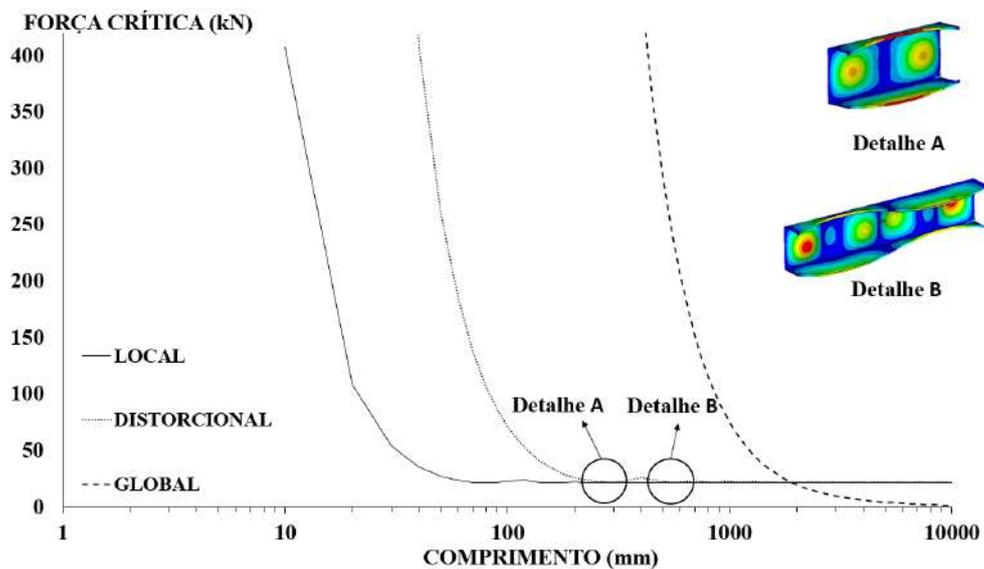


Figura 2.7 - Curva de assinatura para coluna U enrijecido 100x50x5x1(mm) com suas semi-ondas locais e distorcionais se sobrepondo na condição biapoiada.

A interação em colunas biengastadas ocorrem de maneira similar ao apresentado na Figura 2.7. Tem-se a diferença da forma como as semi-ondas são replicadas. Um exemplo de interação de perfil U enrijecido de dimensões 95x80x10x5 (mm) e com comprimento de 2900 mm está representado na Figura 2.8. Nela consegue-se observar as curvas se sobrepondo e gerando uma interação LD com cinco semi-ondas distorcionais e múltiplas ondas locais.

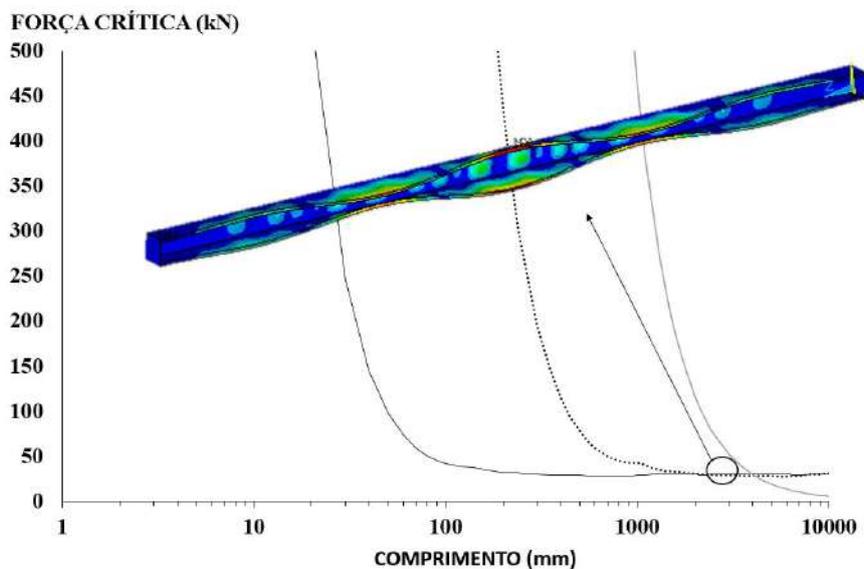


Figura 2.8 - Curva de assina exemplo U enrijecido 95x80x10x5 (mm) com suas semi-ondas locais e distorcionais se sobrepondo (condição biaengastada).

2.5 Tipos de interação LD

Apesar da curva de assinatura dar indícios claros de interação LD, essa interação pode ocorrer para forças críticas L e D não coincidentes. Com as cargas críticas razoavelmente distantes, ainda assim, existe a possibilidade de ocorrência da interação LD quando o carregamento se aproxima do valor máximo com formação de mecanismo de colapso. Essa forma da interação LD não se manifesta na análise de flambagem elástica, sendo identificadas somente no regime pós-flambagem. Mesmo nesses casos, a interação causa uma queda de resistência da coluna, que pode ocasionar um erro de dimensionamento quando esse fenômeno não for considerado.

Uma das maneiras mais usuais até o momento de se medir o grau de interação LD é mencionado por MARTINS *et al.*(2017), com a utilização da relação P_{crD}/P_{crL} , o qual foi denominado R_{DL} . Com esse parâmetro mesmo autor define três tipos de interação LD, denominadas Interação verdadeira (*True Interaction*), Interação LD secundária local (*Secondary-local bifurcation L-D interaction*) e Interação LD secundária distorcional (*Secondary-distortional bifurcation L-D interaction*). As características de cada uma dessas interações estão descritas a seguir:

- a) Interação verdadeira (*True Interaction*): ocorre quando $0,8 \leq P_{crD}/P_{crL} \leq 1,3$, sendo classificada dessa forma quando a carga crítica distorcional é próxima da carga crítica local, gerando uma forte interação LD.
- b) Interação LD secundária local (*Secondary-local bifurcation L-D interaction*): ocorre quando $P_{crD}/P_{crL} < 0,8$, sendo classificada dessa forma quando a carga crítica local é visivelmente acima da carga crítica distorcional e significativamente abaixo da carga de início de escoamento da seção transversal, $P_y = A f_y$, porém, ainda assim ocorrendo a interação LD.
- c) Interação LD secundária distorcional (*Secondary-distortional bifurcation L-D interaction*): ocorre quando $P_{crD}/P_{crL} > 1,3$. Sendo classificada dessa forma quando a carga crítica distorcional se encontra visivelmente acima da carga crítica local e significativamente abaixo da carga de escoamento P_y , porém, ainda assim existindo a interação LD.

A explicação para a ocorrência da interação LD secundária, segundo MARTINS *et al.* (2015a), é baseada no fato da carga de escoamento ser suficientemente maior que a

carga crítica local e distorcional, conseqüentemente, a coluna consegue atingir cargas de bifurcação secundárias, que são as cargas que acionam o desenvolvimento de um novo modo de flambagem.

Essas interações, segundo MARTINS *et al.*(2015a), podem ocorrer tanto para colunas biapoiadas quanto para biengastadas, porém, no primeiro caso, a interação verdadeira é muito mais relevante do que as interações secundárias.

No caso biengastado, as interações secundárias podem conduzir a uma queda maior da resistência prevista (segundo as formulações usuais) nos casos de interação onde o modo local precede o modo distorcional (Interação LD secundária distorcional).

2.6 Esbeltez das colunas

Os valores de carga crítica dão indícios de ocorrência de interação LD, porém, existe a influência adicional do efeito de plasticidade representada pela carga de início de escoamento, P_y . O parâmetro mais adequado para lidar com a flambagem de colunas de perfis formados a frio é o índice de esbeltez reduzida, pois leva em consideração as cargas críticas e a carga de escoamento da coluna. O índice de esbeltez reduzida para os modos de flambagem local, distorcional é dada pelas equações 1, 2 e 3, respectivamente.

Sendo P_y , P_{crL} , P_{crD} e P_{crG} , a carga de escoamento, carga crítica local, carga crítica distorcional e carga crítica global, respectivamente.

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crL}}} \quad (1)$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crD}}} \quad (2)$$

$$\lambda_G = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crG}}} \quad (3)$$

A obtenção dos valores de carga crítica é possível através da análise da flambagem elástica, que resulta na curva de assinatura, como já foi discutido nos itens anteriores. Porém, algumas simplificações podem ser feitas para facilitar a obtenção desses valores sem perda significativa de precisão.

O programa utilizado neste trabalho para lidar com as cargas críticas foi o programa GBTUL (BEBIANO *et al.*, 2010) para obtenção das cargas críticas local, distorcional e global.

No caso de colunas simplesmente apoiadas, foi adotada a carga crítica local e distorcional da primeira semi-onda, visto que as semi-ondas posteriores possuem a mesma carga crítica como pode ser observado na curva de assinatura do exemplo da Figura 2.5, entretanto, para o cálculo de carga crítica global é possível a utilização de formulações analíticas presentes em THIMOSHENKO e GERE (1961) ou através do GBTUL (BEBIANO *et al.*, 2010), adotando o valor de carga crítica do comprimento real da coluna.

No caso de colunas biengastadas, todos os valores de cargas críticas (local, distorcional e global) obtidas via GBTUL (BEBIANO *et al.*, 2010) foram as correspondentes a valores de comprimento real da coluna a ser analisada. Porém, para ter um ganho de custo computacional foram isolados apenas os modos mais relevantes para o cálculo das cargas críticas interessadas. Adotou-se então, a mesma metodologia descrita por YOUNG *et al.* (2013).

Segundo YOUNG *et al.* (2013), os modos mais significativos para o modo local são os modos de número 7, 9, 11, 13, 15 e 17, segundo a nomenclatura no programa GBTUL. No caso do modo distorcional, o mais significativo é apenas o 5 e os modos mais significativos globais são os de números 2 e 4. Entretanto, para este trabalho foi adicionado também o modo global 3, pois verificou-se que não houve perda significativa de processamento e visto que esse modo ganha importância para análises futuras pelo qual a interferência do global é gradualmente acrescentada.

Com isso, tendo esses modos em mente, isolou-se no GBTUL (BEBIANO *et al.*, 2010) as curvas de assinatura de cada um dos três modos L, D, e G para identificar qual a contribuição de cada modo em uma determinada seção transversal do perfil, segundo o comprimento real da coluna.

Os modos de deformações escolhidos para essa análise podem ser observados nas Figuras 2.9, 2.10 e 2.11.

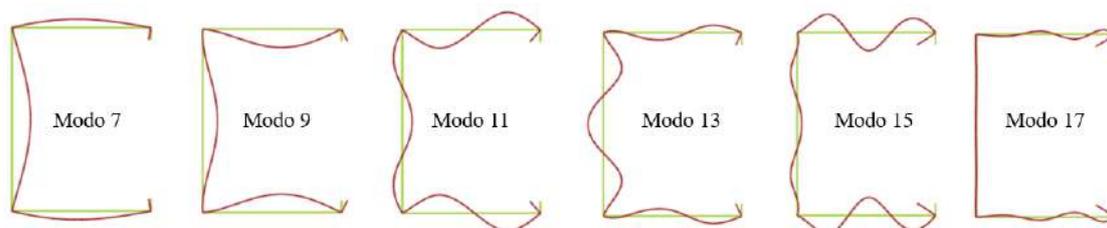


Figura 2.9 – Modos locais de deformações para análise de flambagem elástica via GBTUL (BEBIANO *et al.*, 2010).



Figura 2.10 - Modo distorcional de deformação para análise de flambagem elástica via GBTUL (BEBIANO *et al.*, 2010).

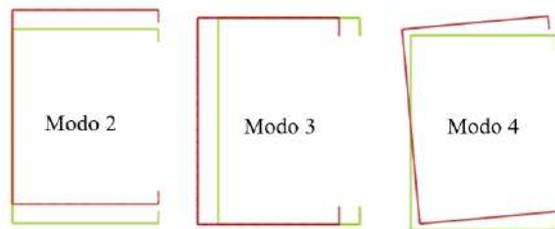


Figura 2.11 - Modos globais de deformações para análise de flambagem elástica via GBTUL (BEBIANO *et al.*, 2010).

Consegue-se observar na Figura 2.12, os valores de carga crítica local, distorcional e global na condição biengastada utilizando a metodologia descrita anteriormente para o comprimento real da coluna. O perfil exemplo utilizado foi o U enrijecido 101,8 x 82,1 x 15,5 x 0,98 x 2499 (mm).

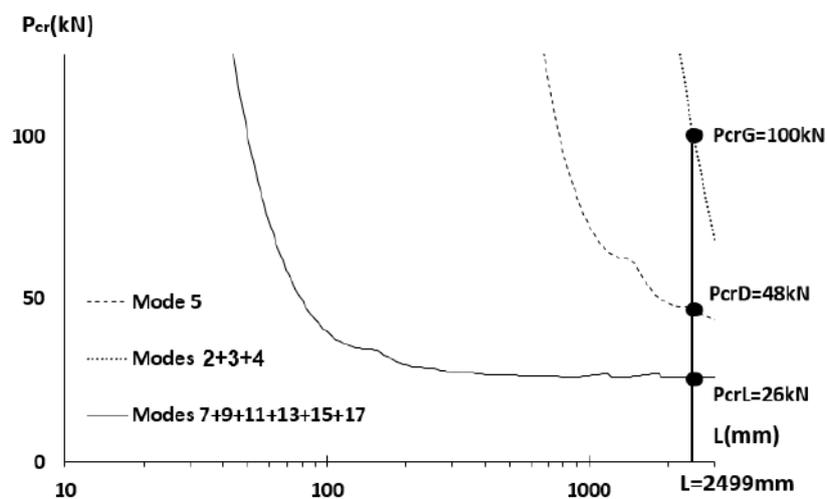


Figura 2.12– Curva de assinatura obtida isolando-se os modos descritos para condição biengastada.

Tendo em vista a importância da esbelteza nas análises das colunas sujeitas à interação LD, foram adotadas algumas modificações em relação nomenclaturas consideradas por MARTINS *et al.*(2017).

Para esse trabalho foi adotado o conceito de relação dos λ_D e λ_L , sendo denominado de $R_{\lambda DL}$, como pode ser visto na Equação 4. Essa metodologia visa simplificar os cálculos das formulações do MRD propostos no decorrer deste trabalho, de forma a padronizar a utilização das esbeltezas em todo processo de cálculo.

$$R_{\lambda DL} = \frac{\lambda_D}{\lambda_L} = \sqrt{\frac{P_{crL}}{P_{crD}}} \quad (4)$$

Outro conceito que será utilizado nesse trabalho é o conceito de índice de esbelteza relativa máximo $\lambda_{m\acute{a}x}$, que será o valor máximo de λ_L , λ_D e λ_G . Porém, vale citar que esse trabalho visa estudar somente a interação local e distorcional e, portanto, nas colunas analisadas os valores de λ_G estarão sempre muito abaixo dos outros dois, de forma a evitar a influência do modo global.

Por fim, para estabelecer a distância que separa o modo global dos modos local e distorcional, será utilizada a relação entre o $\lambda_{m\acute{i}nLD} = \min. \{\lambda_L, \lambda_D\}$ e λ_G , sendo essa relação denominada $\lambda_{m\acute{i}nLD-G}$ (Equação 5). Esse parâmetro visa estabelecer uma medida de controle do modo global com o objetivo de manter esse modo suficientemente afastado das análises.

$$\lambda_{m\acute{i}nLD-G} = \frac{\lambda_{m\acute{i}nLD}}{\lambda_G} \quad (5)$$

2.7 Método da resistência direta para colunas (MRD)

O método da resistência direta proposto por SCHAFER e PEKOZ (1998a) é um método que visa a previsão da resistência de colunas e vigas de perfis formados a frio através do ajuste de resultados experimentais e/ou numéricos, com base na equação de WINTER (1968). O formato dessa equação é dado pela Equação 6, sendo P_u a carga última, A e B são coeficientes de ajustes obtidos experimentalmente e/ou numericamente, P_y é a carga de início de escoamento do aço e P_{cr} é a carga crítica de flambagem local ou

distorcional, obtida através de métodos analíticos e/ou através de programas computacionais, sendo assuntos já mencionados nos itens anteriores.

$$P_u = \left(1 - \frac{A}{\lambda^B}\right) \frac{P_y}{\lambda^B} \quad \text{sendo } \lambda = \sqrt{\frac{P_y}{P_{cr}}} \quad (6)$$

O método da resistência direta possui fórmulas calibradas por SCHAFER e PEKOZ (1998a) baseadas na curva de WINTER (1968) para os modos local (SCHAFER, 2002), Equação 7 e distorcional (SCHAFER, 2002), Equação 8. Porém, essas equações não são capazes de prever cargas últimas quando sujeitas a interação entre o modo local e distorcional (LD).

Apesar da existência da interação local-global em vários documentos normativos, não foi considerada nesse trabalho pelo fato da influência do global ter sido mantida baixa.

$$P_{nL} = \begin{cases} P_y & \lambda_L \leq 0,776 \\ \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_L^{0,8}}\right) \frac{P_y}{\lambda_L^{0,8}} & \lambda_L > 0,776 \end{cases} \quad \text{sendo } \lambda_L = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crL}}} \quad (7)$$

$$P_{nD} = \begin{cases} P_y & \lambda_D \leq 0,561 \\ \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_D^{1,2}}\right) \frac{P_y}{\lambda_D^{1,2}} & \lambda_D > 0,561 \end{cases} \quad \text{sendo } \lambda_D = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crD}}} \quad (8)$$

Alguns pesquisadores propuseram adaptações do MRD para lidar com a interação LD, sendo as mais conhecidas as propostas por SCHAFER (2002), SILVESTRE *et al.* (2012) e MARTINS *et al.* (2017).

A proposição para interação LD de SCHAFER (2002) se deu em duas equações, denominadas de P_{nDL} e P_{nLD} , sendo que, P_{nLD} e P_{nDL} surgem a partir das substituições de f_y por P_{nD} na Equação 7 e f_y por P_{nL} na Equação 6, respectivamente. Gera-se então as Equações 9 e 10.

$$P_{nLD} = \begin{cases} P_{nD} & \lambda_{LD} \leq 0,776 \\ \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_{LD}^{0,8}}\right) \frac{P_{nD}}{\lambda_{LD}^{0,8}} & \lambda_{LD} > 0,776 \end{cases} \quad \text{sendo } \lambda_{LD} = \sqrt{\frac{P_{nD}}{P_{crL}}} \quad (9)$$

$$P_{nDL} = \begin{cases} P_{nL} & \lambda_{DL} \leq 0,561 \\ \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_{DL}^{0,8}}\right) \frac{P_{nL}}{\lambda_{DL}^{0,8}} & \lambda_{DL} > 0,561 \end{cases} \quad \text{sendo } \lambda_{DL} = \sqrt{\frac{P_{nL}}{P_{crD}}} \quad (10)$$

Posteriormente, SILVESTRE *et al.* (2012) propuseram uma formulação para lidar com a interação LD em perfis U enrijecidos, passando por algumas adaptações propostas por MARTINS *et al.* (2017). Essa equação se baseia na utilização da Equação 6, com a substituição de P_{nL} por P_{nL}^* . Com isso, origina-se as Equações 11 e 12, válidas para interação verdadeira (*True Interaction*).

$$P_{MnDL} = \begin{cases} P_{nL}^* & \lambda_{DL}^* \leq 0,561 \\ \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{DL}^{*1,2}}\right) \frac{P_{nL}^*}{\lambda_{DL}^{*1,2}} & \lambda_{DL}^* > 0,561 \end{cases} \quad \lambda_{DL}^* = \sqrt{\frac{P_{nL}^*}{P_{crD}}} \quad (11)$$

$$P_{nL}^* = \begin{cases} P_y & L_{crD}/L_{crL} \leq 4 \\ P_y + \left(1 - 0,25 \frac{L_{crD}}{L_{crL}}\right) (P_y - P_{nL}) & 4 \leq L_{crD}/L_{crL} \leq 8 \\ P_{nL} & L_{crD}/L_{crL} \geq 8 \end{cases} \quad (12)$$

Segundo MARTINS *et al.* (2017), apesar da formulação P_{MnDL} (Equação 11) apresentar ótimos resultados para colunas numéricas, no caso de colunas experimentais os resultados são superestimados. Por esse motivo, segundo esses mesmos autores, a proposta de SCHAFER (2002), dada pela Equação 10, apresenta melhores resultados se comparada à equação de SILVESTRE *et al.* (2012) e, com isso, concluiu-se que a equação de SCHAFER (2002) (Equação 10) torna-se mais adequada para lidar com a interação verdadeira (*True Interaction*) do que as Equações 11 e 12.

MARTINS *et al.* (2017) propõem, adicionalmente uma solução para descrever a interação secundária local, sendo utilizado a equação que lida com o modo distorcional dada pela Equação 8 (SCHAFER, 2002) e, por fim, para descrever a interação secundária distorcional são empregadas as Equações 13-19.

$$P_{nSDB} = \begin{cases} P_1 + \frac{P_2 - P_1}{\lambda_{L2} - \lambda_{L1}} (\lambda_L - \lambda_{L1}) & \lambda_L \leq 0,85 \frac{P_{crD}}{P_{crL}} \\ \frac{P_y}{\lambda_L^{1,2}} \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_L^{1,2}}\right) & 0,85 \frac{P_{crD}}{P_{crL}} < \lambda_L < 0,85 \frac{P_{crD}}{P_{crL}} + 0,25 \\ & \lambda_L \geq 0,85 \frac{P_{crD}}{P_{crL}} + 0,25 \end{cases} \quad (13)$$

sendo

$$P_1 = \frac{P_{y1}}{\lambda_{L1}^{0,8}} \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_{L1}^{0,8}} \right) \quad (14)$$

$$P_2 = \frac{P_{y2}}{\lambda_{L2}^{1,2}} \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_{L2}^{1,2}} \right) \quad (15)$$

$$\lambda_{L1} = 0,85 \frac{P_{crD}}{P_{crL}} \quad (16)$$

$$\lambda_{L2} = \lambda_{L1} + 0,25 \quad (17)$$

$$P_{y1} = \lambda_{L1}^2 P_{crL} \quad (18)$$

$$P_{y2} = \lambda_{L2}^2 P_{crL} \quad (19)$$

Uma tabela foi resumida da solução da interação LD de MARTINS *et al.*(2017) é apresentada na Tabela 2.1. No presente trabalho, essa solução será denominada de P_{nLD*} , de forma a simplificar a citação da mesma no decorrer do trabalho.

Tabela 2.1 - Tabela de resumo da proposta de MARTINS *et al.*(2017) para lidar com a interação LD (P_{nLD*}).

Tipo de Interação	Equação Proposta
Interação distorcional secundária (Secondary-distortional bifurcation)	Equações 13-19
Interação verdadeira (<i>True Interaction</i>)	Equação 10
Interação local secundária (Secondary-local bifurcation)	Equação 8

2.8 Métodos numéricos para análise de estabilidade estrutural

O estudo de estabilidade estrutural foi desenvolvido através do Método dos elementos finitos (MEF) com o programa comercial ANSYS (SAS, 2009). Porém, para melhor entendimento da metodologia adotada nesse trabalho serão discutidos alguns tópicos de grande importância para melhor entendimento conceitual do presente trabalho.

2.8.1 Elemento de casca utilizado: SHELL 181

O elemento SHELL 181 é adequado para analisar elementos de casca com espessura fina até moderada.

Esses elementos possuem quatro nós por elemento (Nós I, J, K e L), com cada nó possuindo seis graus de liberdade, sendo três translações (x,y,z) e três rotações (x,y,z), como pode ser observado na Figura 2.13.

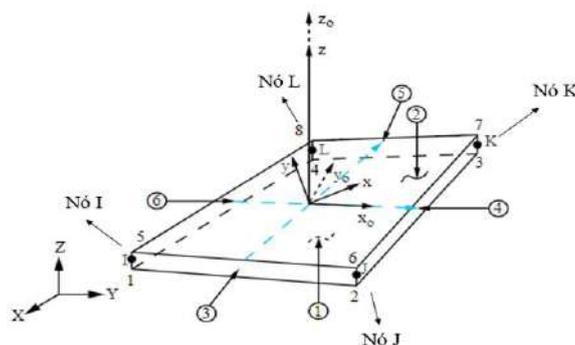


Figura 2.13 – Elemento de SHELL 181 com quatro nós por elemento e seis graus de liberdade por nó (ANSYS v.16.0).

2.8.2 Imperfeições iniciais

A previsão de amplitudes e formato das imperfeições iniciais tem grande importância para análises que envolvam os modos de flambagem local e distorcional. Além da influência das imperfeições iniciais, tem-se ainda algumas incertezas como, por exemplo, em relação a propriedade mecânica do aço e possíveis imprecisões com relação a medições na geometria da seção transversal do perfil. Portanto, a escolha de imperfeições iniciais adequadas para lidar com essas incertezas é de grande importância.

O formato da imperfeição inicial utilizada é aquela obtida através da análise de estabilidade elástica, através de uma rotina presente na biblioteca dos programas comerciais mais utilizados para esse fim como, por exemplo, o ANSYS (SAS, 2009) e o ABAQUS (SIMULIA, 2012). Essa metodologia foi utilizada por vários autores como DINIS *et al.*(2007), SILVESTRE *et al.* (2012) e MARTINS *et al.* (2015a), tendo obtido dessa forma, bons resultados.

No caso da amplitude de imperfeição inicial, SCHAFER e PEKOZ (1998b) sugerem a aplicação de imperfeições na alma do tipo 1 (d_1) e na mesa do perfil do tipo 2 (d_2). Essas imperfeições estão esquematizadas na Figura 2.14.

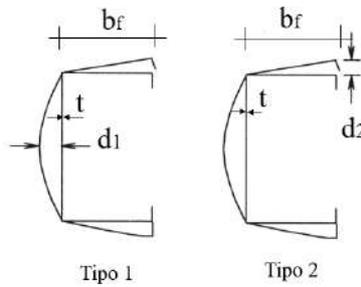


Figura 2.14 – Imperfeições d_1 e d_2 na seção transversal do perfil (SCHAFER e PEKOZ, 1998b-Adaptado).

Os valores de amplitudes sugeridos estão mostrados a seguir:

Tipo 1	$d_1 = 0,006b_f$ ou $d_1 = 6te^{-2t}$	se $b_f/t < 200$ e $t < 3\text{mm}$
Tipo 2	$d_2 = t$	se $b_f/t < 100$ e $t < 3\text{mm}$

Outra alternativa, mais conservadora, apresentada pelos mesmos autores indica a utilização da probabilidade de ocorrer determinada amplitude, conforme reproduzido na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Amplitude de imperfeições e suas respectivas probabilidades de ocorrer segundo SCHAFER e PEKOZ (1998b).

Probabilidade de ocorrer	Tipo 1 d_1	Tipo 2 d_2
25%	0,14t	0,64t
50%	0,34t	0,94t
75%	0,66t	1,55t
95%	1,35t	3,44t
99%	3,87t	4,47t

A sugestão desses autores é a utilização da combinação de dois modos diferentes de forma a conseguir aplicar as imperfeições d_1 e d_2 simultaneamente.

Além da proposta de imperfeição inicial proposta por SCHAFER e PEKOZ (1998b), outros pesquisadores adotam critérios mais simplificados e rápidos com a aplicação direta de imperfeição do primeiro modo de flambagem obtidos através da análise de flambagem elástica, seguido de aplicação de um fator de escala equivalente a 10% da espessura, independente se a imperfeição está aplicada em d_1 ou d_2 . Essa metodologia simplificada foi utilizada em vários trabalhos numéricos como os de DINIS *et al.* (2007), SILVESTRE *et al.* (2012) e MARTINS *et al.* (2015a).

Apesar dessa metodologia simplificada apresentar bons resultados, as cargas últimas numéricas tendem a indicar valores um pouco superior do que as experimentais,

como foi verificado por PASTOR *et al.*(2014), porque considera imperfeições muito pequenas. Entretanto, para a elaboração de critérios e regras de dimensionamento estrutural, essa diferença pode ser corrigida através do coeficiente de ponderação da resistência, γ , que pode ser calculado segundo procedimento incluído na norma brasileira NBR 14762 (ABNT, 2010)

Por isso, optou-se por utilizar nesse trabalho o método simplificado com amplitude máxima de imperfeição inicial equivalente a 10% da espessura e deformação obtida através da análise de estabilidade elástica, devido à facilidade de aplicação sem perda significativa de precisão.

Para o caso de imperfeição distorcional, a imperfeição inicial desse modo foi considerada sempre com abertura de mesa, pelo fato dessa configuração apresentar valores de carga última menores em colunas (pior caso), segundo DINIS *et al.*(2007).

3 Modelo numérico

O modelo numérico foi desenvolvido com auxílio do software comercial ANSYS (SAS, 2009) e a utilização do método dos elementos finitos (MEF) de forma a possibilitar a análise da interação local-distorcional de perfis de aço formados a frio sujeitos a compressão axial.

As condições de contorno adotadas foram desenvolvidas com intuito de reproduzir resultados experimentais de YOUNG e HANCOCK (1992), YOUNG e RASMUSSEN (1998), LOUGHLAN *et al.*(2012), KWON e HANCOCK (2009), LOUGHLAN *et al.* (2012), YOUNG *et al.*(2013) e SALLES (2017), apresentando rotações, translações transversais e empenamento impedidos nas duas extremidades, sendo essas condições atendidas da seguinte forma: (i) nas duas extremidades foram impedidas as rotações, translações transversais, empenamento com auxílio de chapas de aço com espessura de 25 mm fixadas à seção do transversal do perfil, reproduzindo as condições adotadas nos ensaios experimentais (ii) o deslocamento axial da barra foi impedido em um único nó localizado no centro da chapa da alma, a meio comprimento da coluna (iii) a força de compressão foi aplicada por duas forças concentradas no centro de gravidade das seções extremas.

Tanto a coluna em seção U enrijecido quanto as placas de extremidades foram modeladas com o elemento de casca SHELL 181 (4 nós por elemento e 6 graus de liberdade por nó), sendo utilizado também por pesquisadores como FEREGUETTI (2016), SENA (2017) e SILVA (2017). As dimensões dos elementos que melhor apresentaram convergência através de testes feitos variando suas dimensões foram as de 5 mm de lado, sendo esse valor coerente com os verificados por outros autores como SILVESTRE *et al.* (2012) e FENA (2011). O modelo descrito pode ser observado na Figura 3.1.

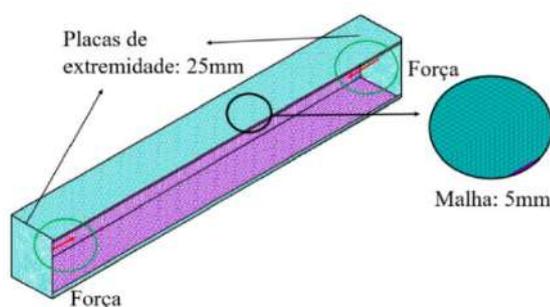


Figura 3.1- Modelo gerado no programa computacional ANSYS.

O aço foi considerado material isotrópico e o modelo de tensão-deformação utilizado corresponde a material elastoplástico bilinear com patamar de escoamento apresentando inclinação (σ/ϵ) suave padrão do ANSYS (SAS, 2009) igual a 1450 MPa. Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson adotados foram, respectivamente, $E=210\text{GPa}$ $\nu=0,3$ para o estudo paramétrico e para colunas experimentais foram utilizados os valores medidos em laboratório.

O modelo bilinear isotrópico apresenta bons resultados nas análises estruturais, em comparação com modelos multilíneares segundo PASTOR *et al.*(2014).

Na Figura 3.2 é possível observar o gráfico bilinear isotrópico utilizado neste trabalho.

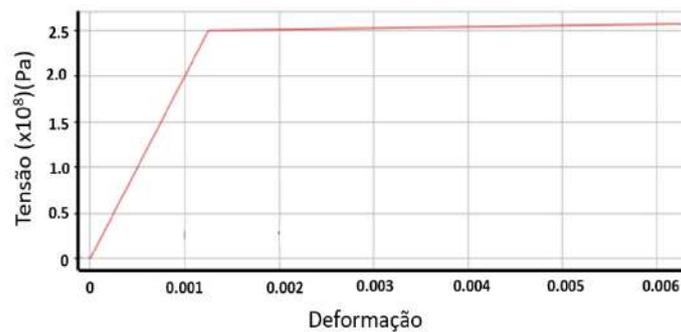


Figura 3.2 – Modelo de material elastoplástico bilinear utilizado neste trabalho.

Para reprodução da imperfeição geométrica inicial foi utilizada a deformação obtida através da análise de estabilidade elástica adotando-se o primeiro autovalor obtido no ANSYS (SAS, 2009) e aplicado uma fator de escala da deformação obtida igual a 10% da espessura do perfil. Essa metodologia é uma das mais utilizadas no meio científico, sendo adotada por vários pesquisadores como DINIS *et al.*(2007), FENA (2011), SILVESTRE *et al.*(2012) e MARTINS *et al.* (2017).

A solução numérica de estabilidade estrutural se deu através do Método de Riks (RIKS, 1979) , visto que apresenta bons resultados para o estudo de placas sujeitas a fenômenos de flambagem. Esse método se mostrou eficiente em vários trabalhos de estabilidade estrutural presentes na literatura.

3.1 Validação do modelo numérico

O modelo numérico foi validado em duas etapas: validação numérica-numérica e validação numérica-experimental.

A validação numérica-numérica se deu através da comparação de resultados numéricos de comportamentos pós-flambagem obtidos nos trabalhos de DINIS *et al.* (2007), FENA (2011) e SILVESTRE *et al.* (2012), tendo apresentado resultados coerentes e semelhantes aos apresentados por esses autores.

Na segunda etapa da validação foram utilizados dados experimentais disponíveis na literatura, os quais serviram para validar o modelo numérico desenvolvido através da comparação das cargas últimas experimentais com as obtidas numericamente.

Os principais trabalhos experimentais presentes na bibliografia, todos dirigidos a seção U enrijecido em estudo (Figura 3.3), foram realizados por KWON E HANCOCK (1992), YOUNG E RASMUSSEN (1998), KWON E HANCOCK (2009), LOUGHLAN *et al.* (2012), YOUNG *et al.* (2013) e SALLES (2017).

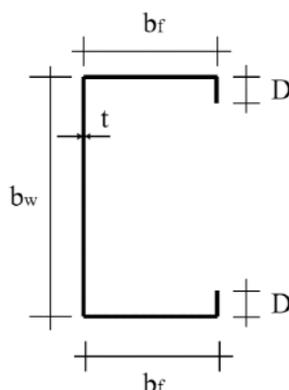


Figura 3.3 – Seção U enrijecido e suas dimensões.

Para a etapa de validação com base nos dados experimentais das colunas testadas pelos autores mencionados, foram excluídos alguns resultados que não atenderam os seguintes critérios: (i) não obtiveram convergência numérica e (ii) indicaram influência predominante do modo global, sendo todas as colunas de KWON *et al.* (2009) excluídas devido a alguns valores de carga última resultarem em valores muito discrepantes com relação ao modelo numérico, reforçando assim a hipótese levantada por MARTINS *et al.* (2017) de que as resinas utilizadas para fixação das seções extremas das colunas não foram capazes de garantir as condições de contorno desejadas. Com isso, as colunas selecionadas que obedeceram aos critérios preestabelecidos para validação estão descritas nas Tabelas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5.

Tabela 3.1- Dimensões das colunas experimentais medidas.

AUTOR	b_w(mm)	bf(mm)	D(mm)	t(mm)	L(mm)	E(MPa)	f_y(MPa)
1- YOUNG E HANCOCK (1992)	119,60	89,70	4,80	1,09	800	210000	590
2-YOUNG E HANCOCK (1992)	119,80	89,80	6,00	1,09	800	210000	590
3-YOUNG E HANCOCK (1992)	120,80	89,70	7,00	1,10	400	210000	590
4-YOUNG E HANCOCK (1992)	120,40	89,60	7,00	1,10	600	210000	590
5-YOUNG E HANCOCK (1992)	120,50	89,50	7,00	1,10	800	210000	590

Tabela 3.2- Dimensões das colunas experimentais medidas.

AUTOR	b_w(mm)	b_f(mm)	D(mm)	t(mm)	L(mm)	E(MPa)	f_y(MPa)
YOUNG E RASMUSSEN (1998)	97,60	48,70	11,90	1,47	1000	180000	550
YOUNG E RASMUSSEN (1998)	96,50	48,90	12,60	1,46	1501	180000	550

Tabela 3.3-Dimensões das colunas experimentais medidas.

AUTOR	b_w(mm)	b_f(mm)	D(mm)	t(mm)	L(mm)	E(MPa)	f_y(MPa)
1-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	178,00	62,70	12,20	0,96	1800	193000	209
2-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	178,70	63,10	11,80	0,96	1600	193000	209
3-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	178,50	62,80	12,30	0,96	1400	193000	209
4-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	179,50	63,00	11,80	0,96	1200	193000	209
5-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	178,60	63,00	11,90	0,96	1000	193000	209
6-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	152,20	56,10	10,50	0,96	1800	193000	209
7-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	151,80	56,90	10,50	0,96	1600	193000	209
8-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	151,50	56,80	11,00	0,96	1400	193000	209
9-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	151,50	56,60	10,90	0,96	1200	193000	209
10-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	151,00	57,00	10,60	0,96	1000	193000	209
11-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	127,30	49,00	9,70	0,96	1800	193000	209
12-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	127,30	49,70	8,50	0,96	1600	193000	209
13-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	127,60	49,60	9,50	0,96	1400	193000	209
14-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	127,00	49,00	9,00	0,96	1200	193000	209
15-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	127,00	49,50	9,00	0,96	1000	193000	209
16-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	101,10	63,00	12,00	0,96	1800	193000	209
17-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	100,60	63,00	12,00	0,96	1600	193000	209
18-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	100,60	63,00	12,00	0,96	1400	193000	209
19-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	100,40	63,00	12,00	0,96	1200	193000	209
20-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	100,50	63,00	12,00	0,96	1000	193000	209

Tabela 3.4-Dimensões das colunas experimentais medidas.

AUTOR	b_w (mm)	b_f (mm)	D(mm)	t(mm)	L(mm)	E(MPa)	f_y (MPa)
1-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	104,90	81,60	15,20	0,96	2498	211700	536
2-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	101,80	82,10	15,50	0,98	2499	211700	536
3-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	94,90	80,90	16,90	0,98	2499	211700	536
4-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	152,50	131,20	14,70	1,23	1425	213300	588
5-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	152,40	131,00	15,80	1,23	1426	213300	588
6-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	154,50	141,00	15,00	1,21	1426	213300	588
7-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	110,50	82,20	16,10	1,46	1148	211200	494
8-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	118,50	82,00	15,70	1,45	1149	211200	494
9-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	118,60	81,90	15,90	1,47	1148	211200	494
10-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	203,70	192,70	19,00	1,48	1852	211200	494
11-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	204,70	191,90	20,60	1,46	1849	211200	494
12-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	182,10	113,10	19,20	1,93	1030	203400	336
13-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	181,10	112,50	20,20	1,92	1026	203400	336
14-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	182,50	122,50	19,40	1,97	1027	203400	336
15-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	238,90	162,70	21,10	1,97	1946	203400	336
16-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	238,20	162,30	23,10	1,95	1947	203400	336
17-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	115,00	102,50	25,80	1,97	1757	203400	336
18-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	114,70	103,10	28,20	1,95	1761	203400	336
19-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	103,70	103,40	30,30	1,96	2102	203400	336
20-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	103,80	47,00	19,00	2,43	618	212600	526
21-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	105,20	51,90	19,20	2,42	619	212600	526
22-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	101,40	52,80	19,30	2,43	616	212600	526
23-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	109,80	88,50	19,50	2,42	937	212600	526
24-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	114,80	86,40	24,50	2,43	941	212600	526
25-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	113,90	86,50	26,60	2,43	939	212600	526
26-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	105,00	103,50	27,20	2,39	2099	205000	343

Tabela 3.5- Dimensões das colunas experimentais medidas.

AUTOR	b_w (mm)	b_f (mm)	D(mm)	t(mm)	L(mm)	E(MPa)	f_y (MPa)
1-SALLES (2017)	103,10	103,90	10,30	1,10	2533	179001	342

Com a utilização do modelo numérico apresentado anteriormente, foram calculadas numericamente o comportamento e as respectivas cargas últimas das colunas apresentadas pelos autores dos ensaios experimentais. A carga última (P_u) foi adotada a maior carga que a coluna consegue suportar, sendo possível observar um exemplo dessa carga no estágio III de carregamento representado na Figura 4.10.

O resultado da comparação entre resultados numéricos e experimentais estão apresentados nas Tabelas 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10.

Tabela 3.6- Relação entre as cargas últimas numéricas e experimentais de KWON E HANCOCK (1992).

AUTOR	P_{uexp.} (N)	P_{unum} (N)	EXP./NUM.
1-YOUNG E HANCOCK (1992)	49464,0	51080,1	0,97
2-YOUNG E HANCOCK (1992)	49752,1	52552,0	0,95
3-YOUNG E HANCOCK (1992)	51435,3	60739,4	0,85
4-YOUNG E HANCOCK (1992)	53449,1	60202,9	0,89
5-YOUNG E HANCOCK (1992)	55176,0	56471,0	0,98

Tabela 3.7- Relação entre as cargas últimas numéricas e experimentais de YOUNG E RASMUSSEN (1998).

AUTOR	P_{uexp.}(N)	P_{unum.}(N)	EXP./NUM.
1-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	102300,0	112974,9	0,91
2-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	98600,0	111549,9	0,88

Tabela 3.8 - Relação entre as cargas últimas numéricas e experimentais de LOUGHLAN *et al.*(2012).

AUTOR	P_{uexp.}(N)	P_{unum}(N)	EXP./NUM.
1-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	28800,0	31985,0	0,90
2-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	31500,0	31151,5	1,01
3-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	31360,0	32442,9	0,97
4-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	31750,0	31991,2	0,99
5-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	31850,0	33451,4	0,95
6-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	29800,0	31012,0	0,96
7-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	29350,0	30982,8	0,95
8-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	30000,0	31300,0	0,96
9-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	28100,0	32587,9	0,86
10-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	29500,0	31897,0	0,92
11-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	29170,0	30711,2	0,95
12-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	26740,0	28754,0	0,93
13-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	29850,0	30601,2	0,98
14-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	30100,0	29841,0	1,01
15-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	29800,0	30237,6	0,99
16-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	29100,0	33943,6	0,86
17-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	32350,0	34197,5	0,95
18-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	29800,0	34367,7	0,87
19-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	32700,0	34351,1	0,95
20-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	29800,0	34451,8	0,86

Tabela 3.9 - Relação entre as cargas últimas numéricas e experimentais de YOUNG *et al.* (2013).

AUTOR	P_{uexp.}(N)	P_{unum.}(N)	EXP./NUM.
1-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	39900,0	43389,2	0,92
2-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	42100,0	46064,5	0,91
3-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	42000,0	47695,1	0,88
4-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	68100,0	75103,7	0,91
5-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	71000,0	76191,7	0,93
6-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	67700,0	63698,5	1,06
7-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	109000,0	119177,3	0,91
8-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	102800,0	120425,8	0,85
9-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	103600,0	123845,1	0,84
10-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	92900,0	90550,4	1,03
11-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	94700,0	101368,6	0,93
12-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	145200,0	177520,2	0,82
13-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	146100,0	177046,1	0,83
14-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	142500,0	180262,3	0,79
15-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	129700,0	158151,7	0,82
16-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	131600,0	166111,6	0,79
17-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	164000,0	186474,3	0,88
18-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	170800,0	184204,8	0,93
19-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	174900,0	186114,2	0,94
20-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	248200,0	268203,0	0,93
21-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	256700,0	279640,6	0,92
22-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	254100,0	283383,3	0,90
23-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	296600,0	344144,3	0,86
24-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	299200,0	256708,9	1,17
25-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	309100,0	321348,4	0,96
26-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	212600,0	266408,6	0,80

Tabela 3.10 - Relação entre a carga última numérica e experimental de SALLES (2017).

AUTOR	P_{uexp.}(N)	P_{unum.}(N)	EXP./NUM.
1-SALLES (2017)	33400,0	38588,5	0,87

Os modelos numéricos gerados a partir dos dados experimentais apresentaram bons resultados, com a média das correlações P_{uexp}/P_{unum} das 54 colunas igual a 0,92, desvio padrão de 0,07. Esses indicadores indicam que o modelo apresentou resultados com boa correlação em relação aos experimentos realizados.

Os resultados obtidos podem ser resumidos pela Figura 3.4, que mostra que quanto mais próximos os pontos da linha tracejada, maior será a proximidade da carga última experimental e numérica.

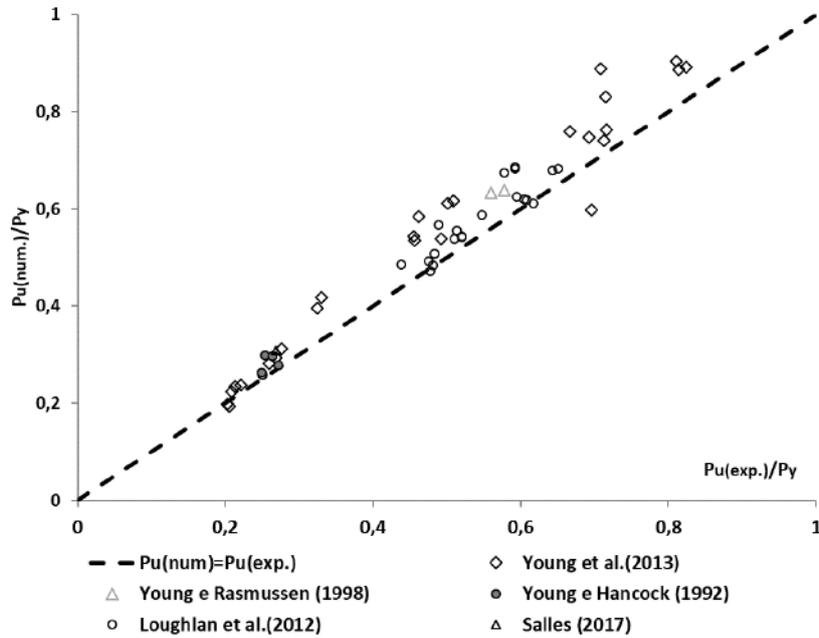


Figura 3.4 - Correlação entre as cargas última numérica e experimental normalizada pela carga de escoamento P_y , para colunas nas Tabelas 3.6, 3.7, 3.8 e 3.10.

Baseado nos resultados estatísticos da correlação numérico-experimental, conclui-se que o modelo em elementos finitos de casca é confiável e pode ser considerado para análises paramétricas complementares que serão discutidas mais adiante.

4 Análise paramétrica

O estudo paramétrico se baseia na criação de vários modelos numéricos se diferenciando apenas na alteração de um ou alguns parâmetros. No caso em estudo, esses parâmetros estão relacionados a geometria do perfil e propriedade do material, tendo como objetivo a compreensão da influência da combinação desses parâmetros na resistência final dos perfis quando sujeitos a interação LD.

4.1 Metodologia da análise paramétrica

Para a análise paramétrica foi selecionada uma coluna qualquer para iniciar o estudo (coluna 10 de YOUNG *et al.*(2013) descrita na (Tabela 3.4) e com base nessa coluna foram feitas alterações das variáveis que estão diretamente relacionadas aos parâmetros do problema para compreender melhor a interferência deles na resistência final da peça.

As variáveis a serem analisadas são D (largura do enrijecedor), b_w (largura da alma), b_f (largura de mesa), f_y (tensão de escoamento do perfil) e t (espessura do perfil), sendo essas duas últimas responsáveis diretamente pela alteração dos parâmetros $\lambda_{máx}$ e $R_{\lambda DL}$, respectivamente.

De forma a organizar o estudo das variáveis existentes, foram escolhidos os seguintes parâmetros para o estudo da previsão de carga última quando sujeitos a interação local e distorcional:

- (i) Esbeltez máxima ($\lambda_{máx}$), obtida através do maior valor entre λ_D , λ_L e λ_G ;
- (ii) Relação entre as esbeltezas local e distorcional (λ_D/λ_L), denominado de $R_{\lambda DL}$;
- (iii) Relação entre dimensão do enrijecedor e alma (D/b_w);
- (iv) Relação entre dimensão da mesa e alma (b_f/b_w).

É importante ressaltar que todas as colunas utilizadas para o estudo paramétrico estão nas condições de extremidades biengastadas, reproduzindo as mesmas condições que se encontram as colunas experimentais avaliadas.

4.2 Estudo paramétrico com a variação da espessura

O aumento da espessura ocasiona uma maior dificuldade no desenvolvimento do modo local e, como consequência, ocorre o aumento de esbeltez dos modos distorcional e global, gerando uma alteração do $R_{\lambda DL}$. As deformações na transição do modo local

para o modo distorcional com o aumento da espessura é verificada na análise de flambagem elástica como pode ser observado na Figura 4.1, sendo desenvolvida no programa comercial ANSYS (SAS, 2009). Essas deformações serão posteriormente utilizadas como imperfeições iniciais aplicadas na análise não linear.

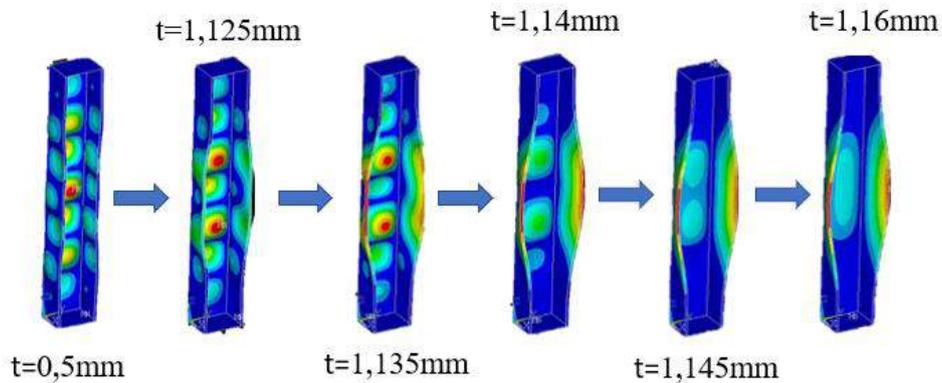


Figura 4.1- Variação dos modos de uma mesma coluna com a variação apenas da espessura utilizando o primeiro modo da análise de autovalor e autovetor no ANSYS (SAS, 2009).

Como já mencionado, o estudo paramétrico se baseia na variação de um ou de um conjunto de parâmetros visando identificar a influência da mesma no comportamento do fenômeno estudado. A análise desse trabalho foi dividida em três etapas, sendo elas, o estudo da variação da espessura e das relações b_f/b_w e D/b_w .

Os outros parâmetros como $\lambda_{m\acute{a}x}$ e $R_{\lambda DL}$ foram alterados dentro de cada uma das três etapas. O parâmetro $R_{\lambda DL}$ variou nos intervalos compreendidos entre 0,27 e 1,49, sendo feito dentro de cada $R_{\lambda DL}$ a variação de quatro valores de $\lambda_{m\acute{a}x}$ (1,0, 1,5, 2,0 e 2,5).

Para estudo da primeira etapa (variação da espessura) foi fixado os valores de b_f/b_w em 0,95 e D/b_w em 0,09, sendo esses parâmetros analisados nas outras duas etapas posteriores. Variou-se então o parâmetro $R_{\lambda DL}$ através de 18 pontos variando entre 0,27 e 1,49, sendo possível com isso, captar interações fortes e fracas.

Dentro de cada valor de $R_{\lambda DL}$, fez-se a variação de mais quatro valores de $\lambda_{m\acute{a}x}$ (1,0, 1,5, 2,0 e 2,5) para analisar a influência desse parâmetro combinado com diferentes valores de $R_{\lambda DL}$ e manteve-se o valor de $\lambda_{m\acute{i}nLD-G}$ (Equação 5) com valores menores ou iguais a 0,5 com intuito de manter a flambagem global afastada dessa análise.

O valor de $R_{\lambda DL}$ tem a função de medir o grau de interação local-distorcional da coluna (LD). Sendo assim, o parâmetro $\lambda_{m\acute{a}x}$ é responsável pela medição da capacidade

de desenvolver os modos de flambagem no regime elástico, favorecendo um fenômeno chamado por MARTINS *et al.*(2015a) de interação secundária.

A interação secundária ocorre quando a tensão de escoamento é grande o suficiente para possibilitar o desenvolvimento da pós flambagem elástica em larga escala, próprio de colunas muito esbeltas. Nesses casos, a carga aplicada se aproxima das cargas de bifurcação secundária local e bifurcação secundária distorcional, sendo a primeira ocasionada pelo aparecimento da flambagem local, com posterior aparecimento do modo distorcional e a segunda ocasionada pelo aparecimento da flambagem local posterior ao aparecimento do modo distorcional, com ambas gerando uma interação LD. Por esse motivo o primeiro caso é chamado de interação LD por bifurcação secundária distorcional e o segundo chamado de interação LD por bifurcação secundária local, nomenclaturas essas utilizadas por MARTINS *et al.*(2015b).

Dois dos parâmetros que tem grande relação com a bifurcação secundária é o $\lambda_{máx}$ e o $R_{\lambda DL}$, sendo esse primeiro adotado valores a $\lambda_{máx} = 1,0$, $\lambda_{máx} = 1,5$, $\lambda_{máx} = 2,0$ e $\lambda_{máx} = 2,5$. Esses valores convencionados de $\lambda_{máx}$ tem por objetivo captar os pontos pelos quais o ajuste da curva de WINTER (1968) ficasse mais precisa. Foi considerado ainda que, para valores de $\lambda_{máx} > 2,5$ a utilização prática é praticamente nula e, para valores de $\lambda_{máx} < 1,0$, a influência da flambagem tende a ser reduzida.

As discussões anteriores podem ser ilustradas na Figura 4.2, que mostra duas colunas iguais, diferindo apenas nos valores de f_y . Observa-se que para $\lambda_{máx} = 2,5$ a ocorrência da plastificação é menos generalizada na carga última (regiões em vermelho representam regiões plastificadas) do que em peças com $\lambda_{máx} = 1,0$, pois o processo de plastificação tem maior predominância conforme ocorre a diminuição do índice de esbeltez relativa $\lambda_{máx}$.

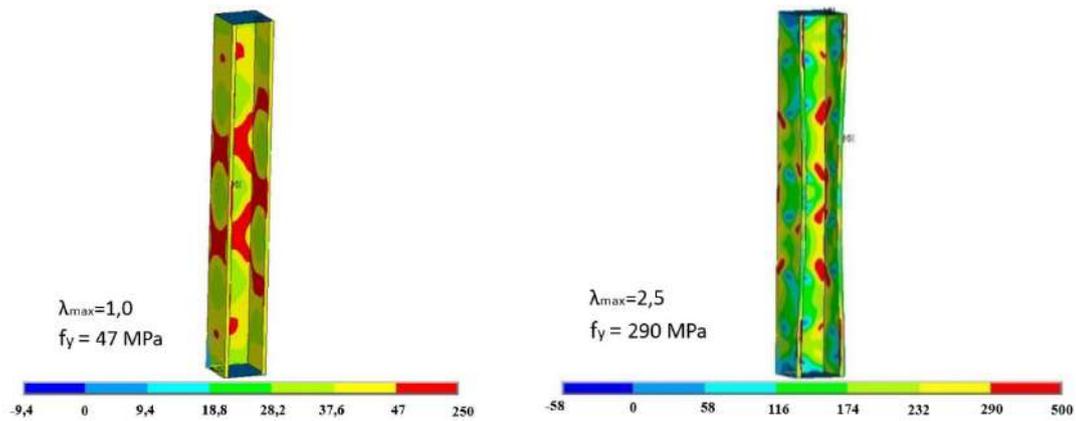


Figura 4.2- Plastificação com tensões de Von Mises na carga última (regiões plastificadas em vermelho) de uma mesma coluna variando apenas o $\lambda_{m\acute{a}x}$.

Após as considerações anteriores, pode-se perceber que os parâmetros $R_{\lambda DL}$ e $\lambda_{m\acute{a}x}$ tem importância para captar o desenvolvimento da interação LD, principalmente nos casos de interação secundárias devido a influência do ramo elástico ter grande ligação com esse fenômeno. Com isso, se faz necessário considerar esses parâmetros na proposta de formulação que será feita nessa primeira etapa do estudo de variação da espessura com b_f/b_w e D/b_w fixados com valores constantes, como já mencionado.

Para se propor uma formulação para lidar com os fenômenos de flambagem local e distorcional é feito a utilização do MRD (SCHAFER e PEKOZ, 1998b), tendo a necessidade de recalibrar essas equações já existentes para colunas sujeitas a interação de flambagem local e distorcional.

Para os fenômenos de interação LD, é necessário a calibração da curva de Winter para diferentes graus de interação de $R_{\lambda DL}$. Com isso, com para cada valor de $R_{\lambda DL}$ consegue-se duas constantes (A e B), como foi mostrado na Equação 6.

As Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 são exemplos de alguns gráficos gerados no formato da curva de Winter (1968), para valores de $R_{\lambda DL}$ equivalentes a 0,27, 0,53, 0,84, 1,06 e 1,19. Os pontos escuros são os pontos obtidos numericamente através do modelo gerado, a curva pontilhada é gerada através da equação local (Equação 7) e a curva com traço cheio é gerada através da curva da equação distorcional (Equação 8). Nesses gráficos também é evidenciada a tendência das cargas últimas numéricas migrarem da curva local para o distorcional com o aumento de $R_{\lambda DL}$, sendo essa migração mais efetiva para $\lambda_{m\acute{a}x}$ maiores, reforçando a teoria de interações secundárias mencionadas por MARTINS *et al.*(2015a).

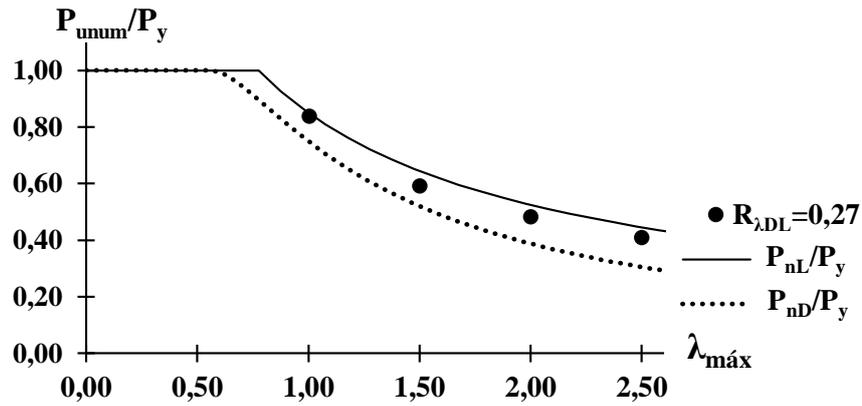


Figura 4.3– Pontos de carga últimas numéricas comparados com cargas últimas local e distorcional com $R_{\lambda DL}$ igual a 0,27.

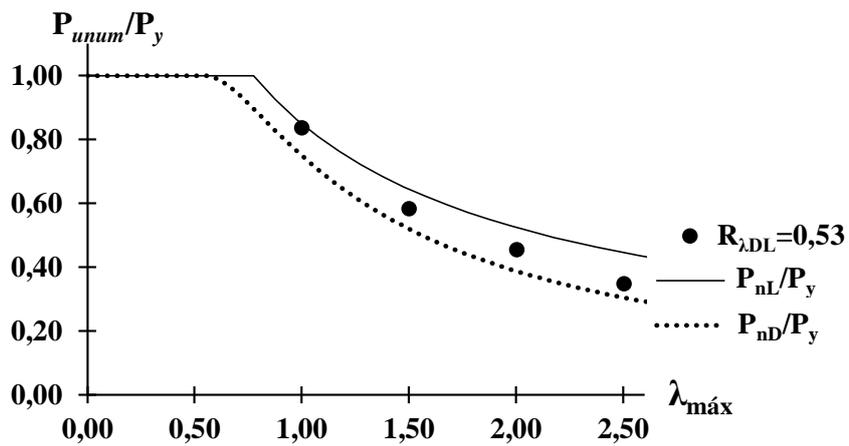


Figura 4.4- Pontos de carga últimas numéricas comparados com cargas últimas local e distorcional com $R_{\lambda DL}$ igual a 0,53.

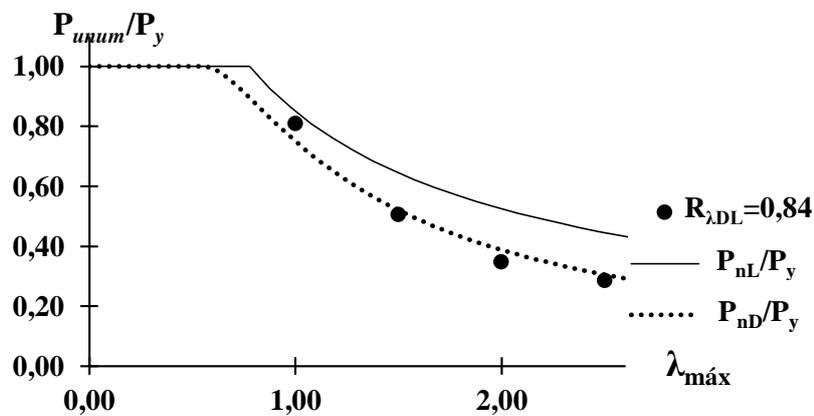


Figura 4.5- Pontos de carga últimas numéricas comparados com cargas últimas local e distorcional com $R_{\lambda DL}$ igual a 0,84.

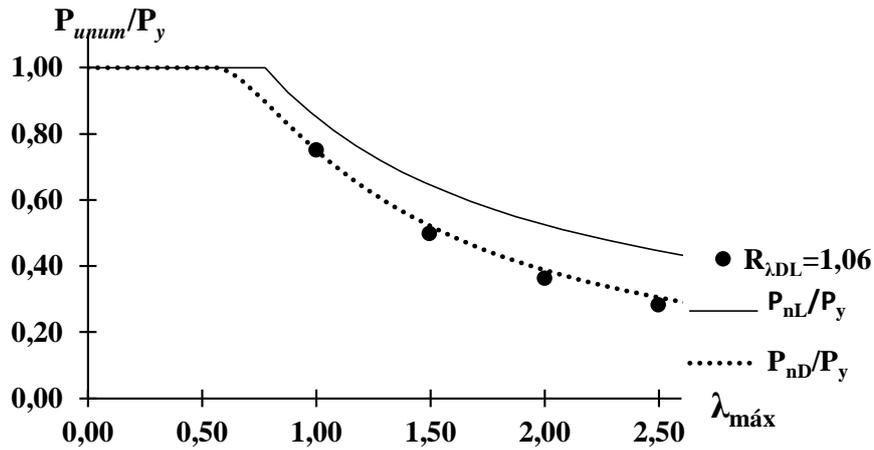


Figura 4.6- Pontos de carga últimas numéricas comparados com cargas últimas local e distorcional com $R_{\lambda DL}$ igual a 1,06.

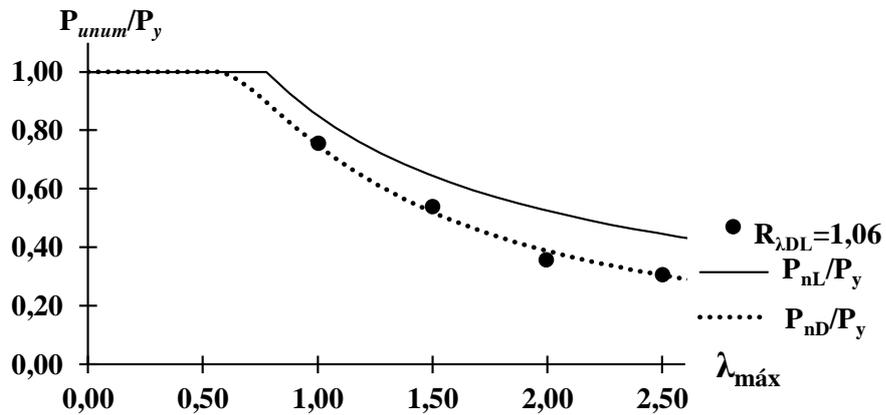


Figura 4.7- Pontos de carga últimas numéricas comparados com cargas últimas local e distorcional com $R_{\lambda DL}$ igual a 1,19.

Para melhor visualização do comportamento das colunas variando-se o $R_{\lambda DL}$ é apresentado no Figura 4.8 a relação entre a carga última numérica (P_{unum}) e $P_n = \min\{P_{nL}$ e $P_{nD}\}$.

Os resultados possuem uma linha de tendência praticamente contínua, com exceção apenas dos pontos com $\lambda_{m\acute{a}x}$ iguais a 2,0 e 2,5 combinados com $R_{\lambda DL}$ com valores igual a 1,12 e 1,19, que divergem dos demais.

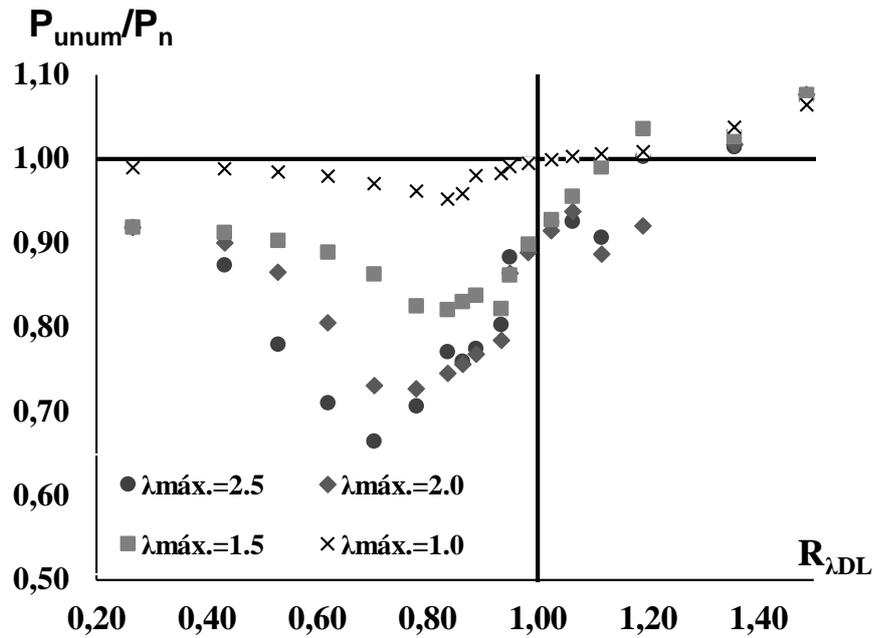


Figura 4.8– Variação da a relação P_{unum}/P_n com a variação de $R_{\lambda DL}$.

A explicação para a maior queda da relação P_u/P_n na região de $R_{\lambda DL}$ próximo de 0,75 é pelo fato dessa região começar a apresentar $P_{nL} > P_{nD}$, portanto, P_n passa a transitar da equação P_{nL} para P_{nD} . Com isso, resultados numéricos demonstram que a perda de carga devido a interação LD pode chegar a valores próximos de 35% quando comparado com as equações convencionais (P_{nL} e P_{nD}).

Um exemplo de coluna sujeita a interação LD, está mostrado na Figura 4.9, sendo apresentado a soma das deformações e a distribuição de tensões de Von Mises. As regiões as regiões plastificadas nas tensões de Von Mises estão representadas em vermelho. Essa coluna apresenta $\lambda_{máx.}$ e $R_{\lambda DL}$, iguais a 2,5 e 1,06, respectivamente.

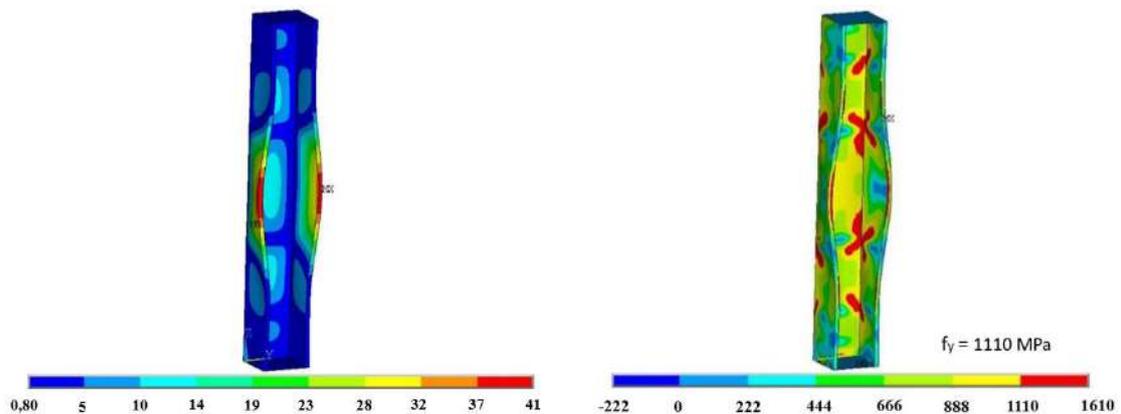


Figura 4.9 – Deformações (esquerda) e tensões de Von Mises (direita) de uma coluna com $\lambda_{máx.} = 2,5$ e $R_{\lambda DL} = 1,06$.

A identificação do modo distorcional foi caracterizado como sendo com perfis apresentados aberturas de mesas acima de 1 mm e o modo local para deformações de semi-ondas locais acima de 1 mm. Com isso, é possível identificar os modos desenvolvidos para cada valor de $\lambda_{m\acute{a}x}$ com a variação de $R_{\lambda DL}$.

As identificações dos modos estão mostradas nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, sendo comparado também a perda de carga através da relação P_{unum}/P_n causada pelas formulações existentes quando lidam com a interação LD.

Tabela 4.1- Resultados para $\lambda_{m\acute{a}x}=1,0$, obtidos dos modos de flambagem elástica ($F_{elastic.}$) e a flambagem na carga última ($F_{\acute{u}ltim.}$) e a relação entre carga última numérica (P_{unum}) e a menor carga entre P_{nL} e P_{nD} (P_n).

$\lambda_{m\acute{a}x}=1,0$			
$R_{\lambda DL}$	$F_{elastic.}$	$F_{\acute{u}ltim.}$	P_{unum}/P_n
0,27	L	L	0,99
0,43	L	L	0,99
0,53	L	L	0,98
0,62	L	L	0,98
0,70	L	L	0,97
0,78	L	L	0,96
0,84	L	L	0,95
0,86	L	L	0,96
0,89	L	L	0,98
0,93	L	L	0,98
0,95	L+D	L+D	0,99
0,98	D	D	1,00
1,02	D	D	1,00
1,06	D	D	1,00
1,12	D	D	1,01
1,19	D	D	1,01
1,36	D	D	1,04
1,49	D	D	1,06

Tabela 4.2- Resultados para $\lambda_{m\acute{a}x}=1,5$, obtidos dos modos de flambagem elástica ($F_{elastic.}$) e a flambagem na carga última ($F_{\acute{u}ltim.}$) e a relação entre carga última numérica (P_u) e a menor carga entre P_{nL} e P_{nD} (P_n).

$\lambda_{m\acute{a}x}=1,5$			
$R_{\lambda DL}$	$F_{elastic.}$	$F_{\acute{u}ltim.}$	P_{unum}/P_n
0,27	L	L	0,92
0,43	L	L	0,91
0,53	L	L	0,90
0,62	L	L+D	0,89
0,70	L	L+D	0,86
0,78	L	L+D	0,83
0,84	L	L+D	0,82
0,86	L	L+D	0,83
0,89	L	L+D	0,84
0,93	L	L+D	0,82
0,95	L+D	L+D	0,86
0,98	D	L+D	0,90
1,02	D	L+D	0,93
1,06	D	L+D	0,96
1,12	D	L+D	0,99
1,19	D	L+D	1,04
1,36	D	D	1,03
1,49	D	D	1,08

Tabela 4.3- Resultados para $\lambda_{m\acute{a}x}=2,0$, obtidos dos modos de flambagem elástica ($F_{elastic.}$) e a flambagem na carga última ($F_{\acute{u}ltim.}$) e a relação entre carga última numérica (P_u) e a menor carga entre P_{nL} e P_{nD} (P_n).

$\lambda_{m\acute{a}x}=2,0$			
$R_{\lambda DL}$	$F_{elastic.}$	$F_{\acute{u}ltim.}$	P_{unum}/P_n
0,27	L	L	0,92
0,43	L	L	0,90
0,53	L	L+D	0,87
0,62	L	L+D	0,81
0,70	L	L+D	0,73
0,78	L	L+D	0,73
0,84	L	L+D	0,75
0,86	L	L+D	0,76
0,89	L	L+D	0,77
0,93	L	L+D	0,78
0,95	L+D	L+D	0,86
0,98	D	L+D	0,89
1,02	D	L+D	0,91
1,06	D	L+D	0,94
1,12	D	L+D	0,89
1,19	D	L+D	0,92
1,36	D	L+D	1,02
1,49	D	L+D	1,08

Tabela 4.4-Resultados para $\lambda_{m\acute{a}x}=2,5$, obtidos dos modos de flambagem elástica ($F_{elastic.}$) e a flambagem na carga última ($F_{\acute{u}ltim.}$) e a relação entre carga última numérica (P_{unum}) e a menor carga entre P_{nL} e P_{nD} (P_n).

$\lambda_{m\acute{a}x}=2,5$			
$R_{\lambda DL}$	$F_{elastic.}$	$F_{\acute{u}ltim.}$	P_{unum}/P_n
0,27	L	L	0,92
0,43	L	L	0,87
0,53	L	L+D	0,78
0,62	L	L+D	0,71
0,70	L	L+D	0,66
0,78	L	L+D	0,71
0,84	L	L+D	0,77
0,86	L	L+D	0,76
0,89	L	L+D	0,77
0,93	L	L+D	0,80
0,95	L+D	L+D	0,88
0,98	D	L+D	0,90
1,02	D	L+D	0,92
1,06	D	L+D	0,93
1,12	D	L+D	0,91
1,19	D	L+D	1,00
1,36	D	L+D	1,01
1,49	D	L+D	1,07

Após a identificação das interações apresentado nas tabelas anteriores, pode-se concluir que identificação da interação LD nem sempre indica perda significativa de carga, sendo possível prever melhor através do parâmetro $R_{\lambda DL}$. Outro fato verificado é a existência de maior perda de cargas nos casos de interação secundária distorcional, fato esse já verificado em estudos de MARTINS et al.(2017).

Para obter melhor compreensão do fenômeno, é possível visualizar a forma como se desenvolve a interação em etapas (I, II e III) na Figura 4.10. Consegue-se perceber que apesar de apresentar flambagem local no regime elástico, no regime pós-crítico a flambagem distorcional (etapa II) aparece e posteriormente ocorre o desenvolvimento da interação LD até atingir a carga última (interação secundária distorcional). A coluna utilizada é de número 11 da Tabela 3.4.

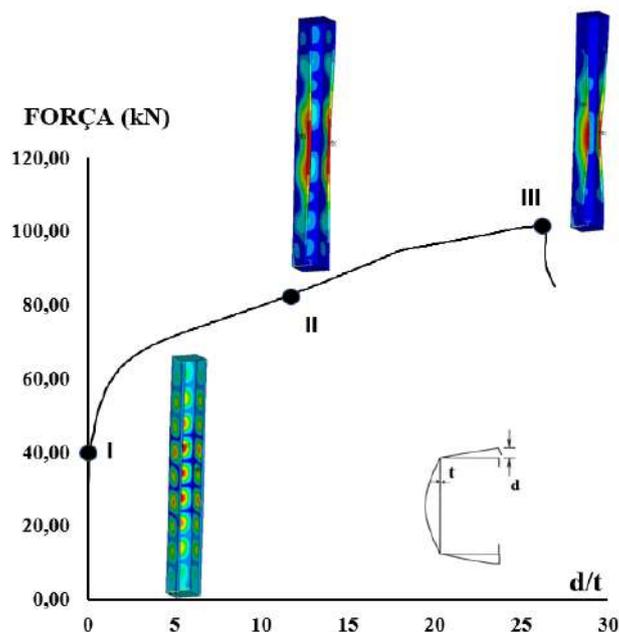


Figura 4.10 – Campo de deslocamentos obtidos do modelo em elementos finitos com desenvolvimento da interação LD da coluna de número 11 da Tabela 3.4 com aumento gradual de carga.

Após esse estudo do comportamento da interação e confirmação do fato de que as formulações convencionais mais conhecidas (P_{nL} e P_{nD}) não conseguem lidar com a interação LD de forma eficaz, tem-se a necessidade da criação de uma nova formulação no mesmo formato do MRD, para lidar com esse tipo de fenômeno. Por isso, foi feita uma proposta de curva de dimensionamento para esse fim.

Os passos para criação de uma nova formulação foram os seguintes:

- (i) Foi efetuado um ajuste da formulação geral da curva segundo a Equação 6 e com os pontos numéricos obtidos, achou-se os coeficientes A e B (Equação 6) para cada valor de $R_{\lambda DL}$;
- (ii) Traçou-se um gráfico da variação do coeficiente A (Equação 6) para cada valor de $R_{\lambda DL}$ e fez-se um ajuste de um polinômio para descrever essa variação;
- (iii) Traçou-se um gráfico da variação do coeficiente B (Equação 6) para cada valor de $R_{\lambda DL}$ e foi feito, igualmente, um ajuste polinomial para lidar com essa variação;
- (iv) Obtém-se uma Equação de Winter no formato da Equação 6 com coeficientes variáveis (A e B), sendo essa variação obtida através dos polinômios dos passos (ii) e (iii);
- (v) Verifica-se a validade das equações para os resultados experimentais;

Para obter a variação dos coeficientes A e B (Equação 6) foi ajustado a curva geral de Winter para cada valor de $R_{\lambda DL}$, como mostrado três exemplos nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13. Posteriormente, com a curva interpolada foi possível achar os coeficientes A e B que melhor se ajustam no grau de interação analisado.

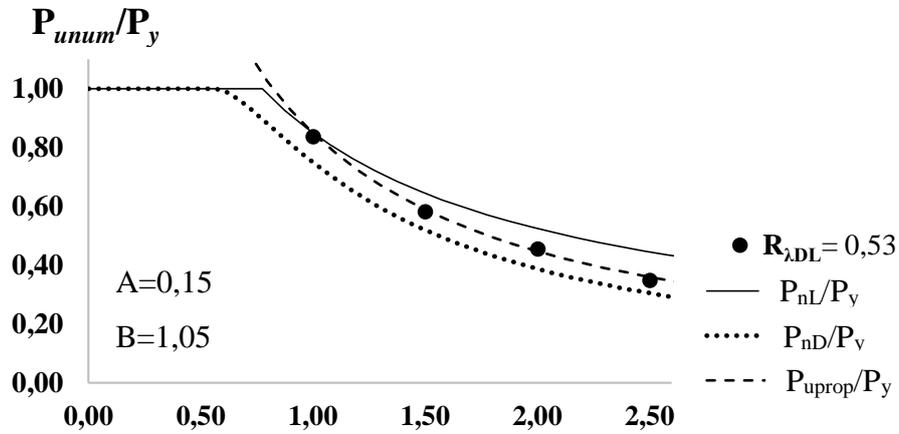


Figura 4.11 – Gráfico com a curva de Winter com interpolada com $R_{\lambda DL}=0,53$ e obtendo-se $A = 0,15$ e $B = 1,05$.

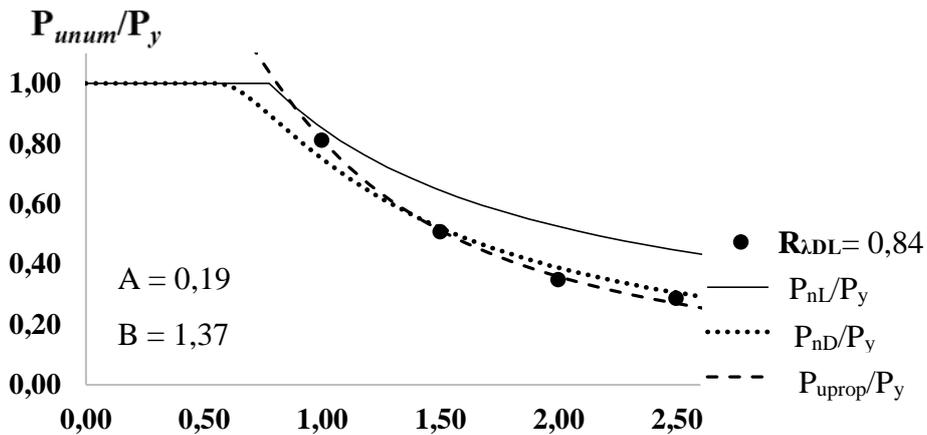


Figura 4.12 - Gráfico com a curva de Winter com interpolada com $R_{\lambda DL}=0,84$ e obtendo-se $A = 0,19$ e $B = 1,37$.

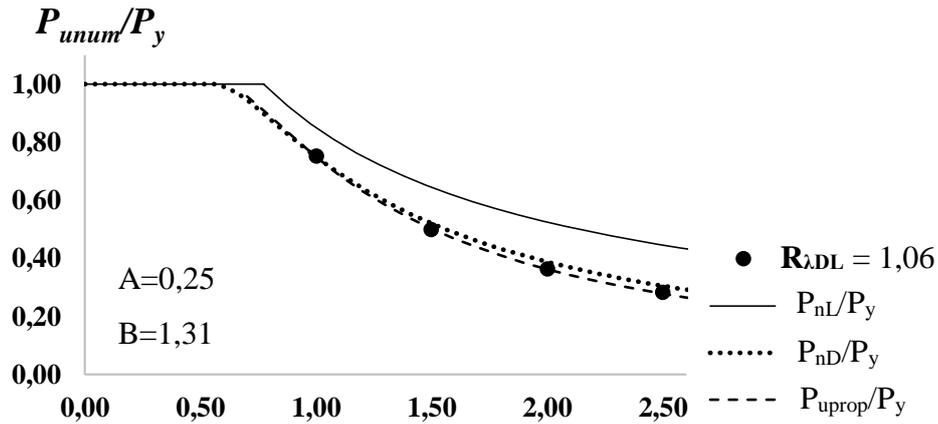


Figura 4.13 - Gráfico com a curva de Winter com interpolada com $R_{\lambda DL} = 1,06$ e obtendo-se $A = 0,25$ e $B = 1,31$.

Com isso, foi possível plotar um gráfico da variação dos coeficientes A e B da curva de Winter (Equação 6) para diferentes valores de $R_{\lambda DL}$, como são mostrados nas Figuras 4.14 e 4.15. Nessas figuras, as linhas cheias contínuas foram consideradas retas horizontais pelo fato dos pontos ajustados nessa região tenderem a valores fixos, pelos quais coincidem com os valores de flambagem local pela esquerda e distorcional pela direita, descrevendo assim a transição do modo local para o distorcional.

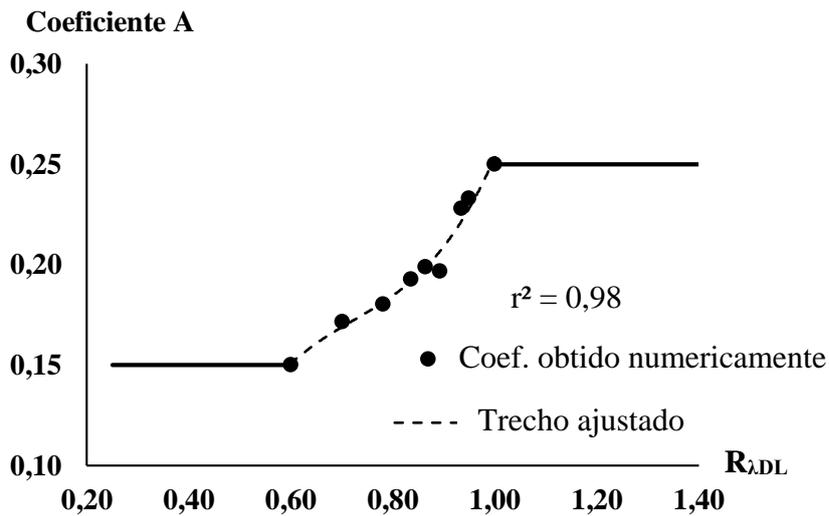


Figura 4.14 – Variação do coeficiente A com a variação de $R_{\lambda DL}$.

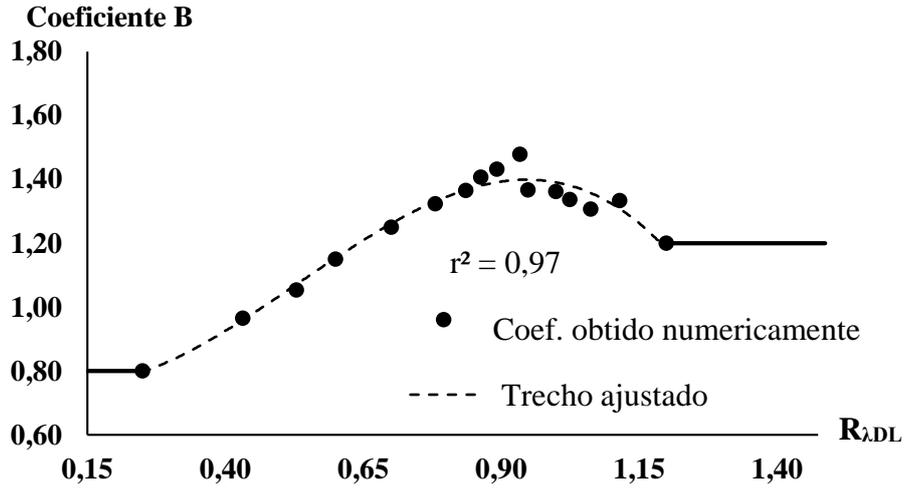


Figura 4.15 - Variação do coeficiente B com a variação de $R_{\lambda DL}$.

Os trechos ajustados presentes nas curvas das Figuras 4.14 e 4.15 geraram as Equação 20 e 21, com $R_{\lambda DL}$ dado pela Equação 4.

$$A = \begin{cases} 0,15 & R_{\lambda DL} < 0,60 \\ 1,89R_{\lambda DL}^3 - 4,09R_{\lambda DL}^2 + 3,1R_{\lambda DL} - 0,65 & 0,60 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,0 \\ 0,25 & R_{\lambda DL} > 1,0 \end{cases} \quad (20)$$

$$B = \begin{cases} 0,80 & R_{\lambda DL} < 0,25 \\ -2,28R_{\lambda DL}^3 + 3,65R_{\lambda DL}^2 - 0,78R_{\lambda DL} + 0,8 & 0,25 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,20 \\ 1,20 & R_{\lambda DL} > 1,20 \end{cases} \quad (21)$$

$$R_{\lambda DL} = \frac{\lambda_D}{\lambda_L} = \sqrt{\frac{P_{crL}}{P_{crD}}} \quad (4)$$

Um ponto a ser comentado da Equação 21 refere-se ao ponto de fronteira entre o polinômio e o valor horizontal constante do coeficiente B, que tende para o valor de 1,20. Verifica-se discordância entre o valor obtido do polinômio, ou seja, se substituirmos o valor de $R_{\lambda DL} = 1,20$ no polinômio na Equação 21 obteremos o valor de 1,18. Essa discordância se deve ao fato dos arredondamentos adotados, provindos da utilização de apenas duas casas decimais após a vírgula para cada coeficiente do polinômio e o arredondamento nos valores de $R_{\lambda DL}$. No entanto, como a metodologia visa simplificar a aplicação prática sem perda significativa de precisão, podemos considerar os procedimentos adotados adequados, mesmo existindo essa pequena discordância.

Com isso, a aplicação da formulação proposta baseada no MRD, denominado de P_{prop1} , é efetuada pela substituição dos valores de A (Equação 20) e B (Equação 21) na Equação 22, mantendo-se a relação $P_{prop1}/P_y \leq 1$.

$$\frac{P_{prop1}}{P_y} = \left(1 - \frac{A}{\lambda_{m\acute{a}x.} B}\right) \frac{1}{\lambda_{m\acute{a}x.} B} \quad \text{sendo } \lambda_{m\acute{a}x.} = \text{m\acute{a}x.}\{\lambda_L, \lambda_D\} \text{ e } \frac{P_{prop1}}{P_y} \leq 1 \quad (22)$$

Por \u00faltimo, \u00e9 feita a verifica\u00e7\u00e3o da formula\u00e7\u00e3o proposta com base nos resultados obtidos atrav\u00e9s testes num\u00e9ricos e experimentais. A verifica\u00e7\u00e3o das colunas com resultados num\u00e9ricos est\u00e1 apresentada na Tabela A.1 presente nos ap\u00eandices, sendo resumida na Figura 4.16.

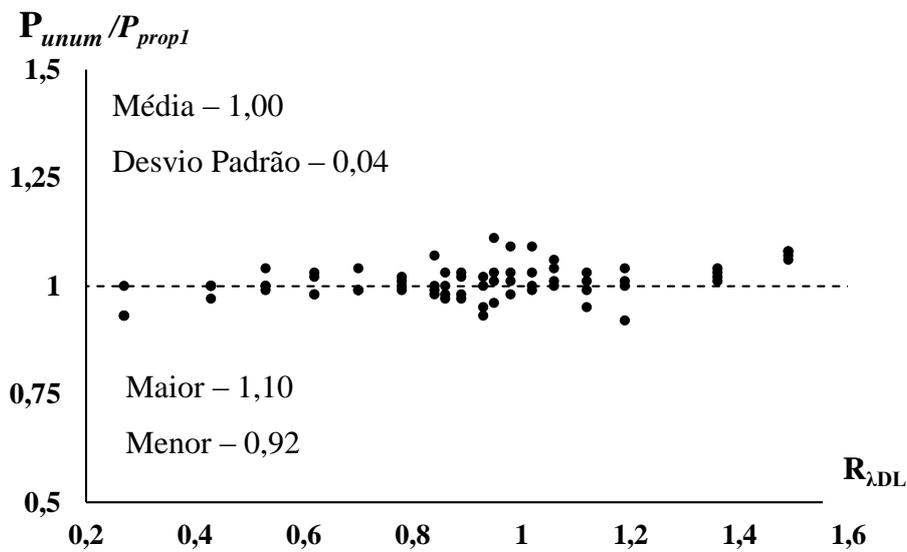


Figura 4.16 – Relação entre as cargas \u00faltimas num\u00e9ricas (P_{unum}) e P_{prop1} dado pela Equa\u00e7\u00e3o 22.

A m\u00e9dia da rela\u00e7\u00e3o P_{unum}/P_{prop1} \u00e9 de 1,00, com desvio padr\u00e3o de 0,04. Esses bons resultados demonstram que a Equa\u00e7\u00e3o 22 est\u00e1 bem calibrada com as colunas num\u00e9ricas, por\u00e9m, \u00e9 necess\u00e1rio validar a equa\u00e7\u00e3o para colunas experimentais.

Na Tabela A.2 (ap\u00eandices) est\u00e3o apresentados os resultados da correla\u00e7\u00e3o entre as cargas \u00faltimas experimentais ($P_{uexp.}$) e os valores calculados com base na proposta de aplica\u00e7\u00e3o do MRD, Equa\u00e7\u00e3o 22 (P_{prop1}), sendo esses resultados resumidos na Figura 4.17.

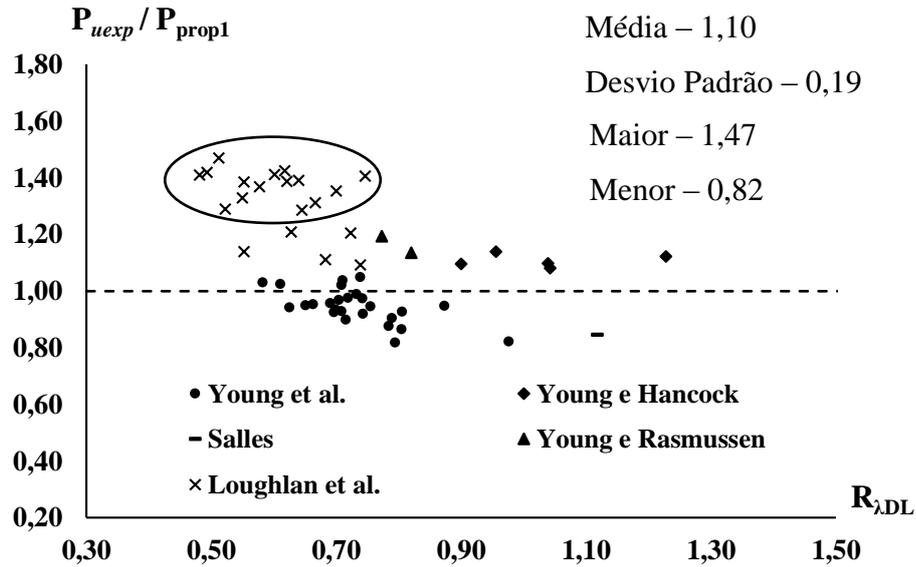


Figura 4.17 - Comparação entre a formulação P_{prop1} dado pela Equação 22 com cargas últimas experimentais.

A média da relação P_{uexp}/P_{prop1} foi de 1,10, com desvio padrão de 0,19. Apesar do desvio padrão não ser considerado adequado, é importante notar que as colunas que causaram essa dispersão fazem parte do conjunto testado por LOUGHLAN *et al.* (2012), como pode ser observado os pontos circulos na Figura 4.17. Por isso, se desconsiderarmos as colunas desse autor a média altera para 0,98, com desvio padrão de 0,09, como pode ser observado no Figura 4.18.

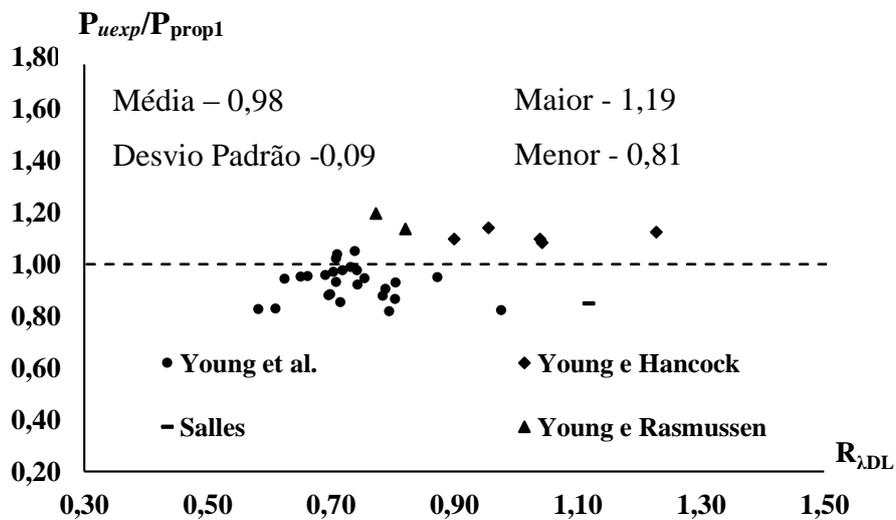


Figura 4.18 - Comparação entre a formulação P_{prop1} e cargas últimas experimentais dado pela Equação 22, excluindo as colunas de LOUGHLAN *et al.* (2012).

Com isso, existem indícios de que as colunas de LOUGHLAN *et al.* (2012) possuem algum parâmetro não considerado na formulação de P_{prop1} . A suspeita é de que esses resultados experimentais tenham influência da geometria da seção, em especial relacionadas as relações b_f/b_w e D/b_w (Figura 3.3). Os efeitos de tais parâmetros serão discutidos mais adiante neste trabalho.

Por fim, foram comparados a proposta P_{nLD*} de MARTINS *et al.*(2017) com as colunas experimentais selecionadas. O resultado dessa comparação P_{uexp}/P_{nLD*} estão apresentadas na Tabela A.3 e representada na Figura 4.19.

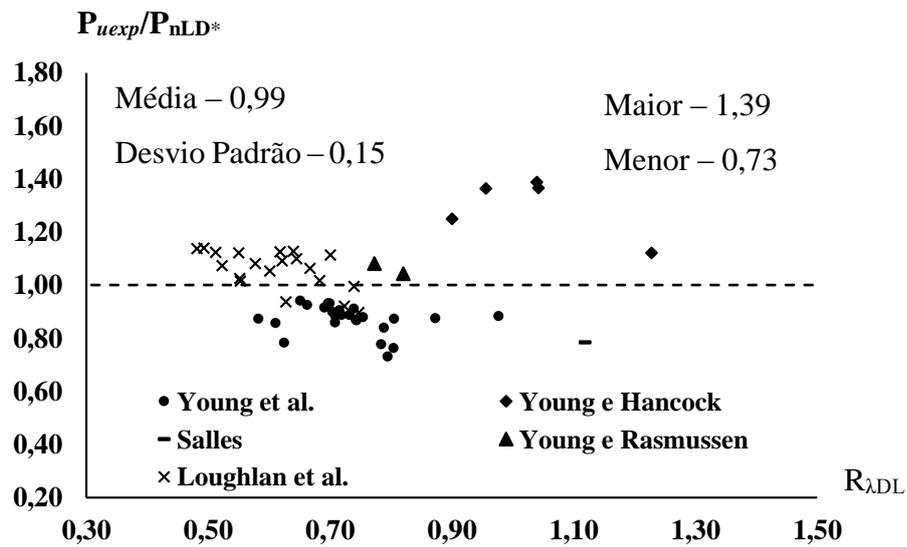


Figura 4.19 - Comparação entre a proposta de MARTINS *et al.* (2017) e cargas últimas experimentais ($P_{uexp.}$) com a variação de $R_{\lambda DL}$.

A média obtida com a relação P_{uexp}/P_{nLD*} foi de 0,99, com desvio padrão de 0,15. Esses valores foram considerados adequados e a proposta de MARTINS *et al.*(2017), P_{nLD*} apresenta-se melhor que os resultados obtidos pela equação proposta P_{prop1} . Entretanto, mais adiante serão apresentados resultados de análises adicionais, levando em consideração o efeito das variáveis b_f/b_w e D/b_w , que aprimoram de forma significativa os resultados obtidos com a solução proposta nessa etapa, P_{prop1} . Essa consideração se dirige em especial ao conjunto de quinze colunas testadas por LOUGHLAN *et al.* (2012) que não apresentam valores satisfatórios na comparação com os valores calculados de P_{prop1} .

Por fim, mostra-se que a equação P_{prop1} gera uma superfície contínua de resistência (Figura 4.20). Observa-se uma queda acentuada da relação P_{prop1}/P_y para $R_{\lambda DL}$ próximo

de 1,0, sendo ocasionadas pela ação das interações verdadeiras. Entretanto, conforme aumenta-se o parâmetro λ_{max} , verifica-se que essa queda de resistência ocorre de forma antecipada (valores de $R_{\lambda DL}$ menores que 1,0) devido as interações secundárias.

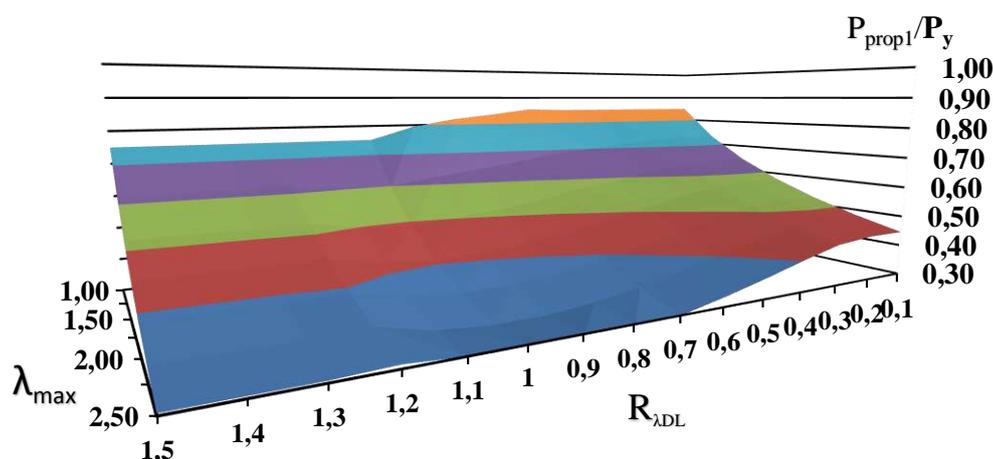


Figura 4.20 – Superfície contínua de resistência gerada pela P_{prop1} .

4.3 Estudo paramétrico com a variação da variação b_f/b_w

Alguns indícios apontados na comparação da relação P_{uexp}/P_{prop1} do item anterior para as colunas de LOUGHLAN *et al.* (2012) indicaram suspeitas com relação à influência dos parâmetros b_f/b_w e D/b_w nas cargas últimas calculadas das colunas. A Tabela 4.5 mostra a relação entre os parâmetros b_f/b_w e D/b_w comparados com P_{uexp}/P_{prop1} .

Tabela 4.5 – Relações geométricas b_f/b_w e D/b_w e relação entre cargas últimas com P_{uexp}/P_{prop1} , sendo os valores de A e B os coeficientes da curva de Winter obtidas.

AUTOR	A	B	b_f/b_w	D/b_w	P_{uexp}/P_{prop1}
1-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,18	1,34	0,78	0,14	0,88
2-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,19	1,36	0,81	0,15	0,87
3-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,18	1,35	0,85	0,18	0,82
4-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,18	1,31	0,86	0,10	0,97
5-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,17	1,27	0,86	0,10	0,97
6-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,18	1,30	0,91	0,10	0,99
7-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,18	1,30	0,74	0,15	1,05
8-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,17	1,28	0,69	0,13	1,04
9-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,17	1,28	0,69	0,13	1,02
10-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,17	1,29	0,95	0,09	0,98
11-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,16	1,23	0,94	0,10	0,95
12-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,16	1,17	0,62	0,11	1,03
13-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,16	1,14	0,62	0,11	1,03

continua na próxima página

AUTOR	A	B	b_f/b_w	D/b_w	P_{uexp}/P_{prop1}
14-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,19	0,67	0,11	0,94
15-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,17	1,26	0,68	0,09	0,96
16-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,16	1,21	0,68	0,10	0,95
17-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,18	1,35	0,89	0,22	0,90
18-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,18	1,32	0,90	0,25	0,95
19-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,19	1,36	1,00	0,29	0,93
20-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,17	1,26	0,45	0,18	0,93
21-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,17	1,27	0,49	0,18	0,93
22-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,17	1,28	0,52	0,19	0,90
23-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,20	1,39	0,81	0,18	0,95
24-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,18	1,31	0,75	0,21	0,92
25-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,17	1,28	0,76	0,23	0,93
26-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,25	1,41	0,99	0,26	0,82
1-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	0,18	1,33	0,50	0,12	1,19
2-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	0,19	1,37	0,51	0,13	1,14
1-SALLES (2017)	0,25	1,31	1,01	0,10	0,85
1-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,25	1,20	0,75	0,04	1,12
2-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,25	1,38	0,75	0,05	1,10
3-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,25	1,38	0,74	0,06	1,08
4-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,21	1,40	0,74	0,06	1,10
5-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,24	1,41	0,74	0,06	1,14
1-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,10	0,35	0,07	1,33
2-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,10	0,35	0,07	1,47
3-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,05	0,35	0,07	1,42
4-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,03	0,35	0,07	1,41
5-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,02	0,35	0,07	1,39
6-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,18	0,37	0,07	1,41
7-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,16	0,37	0,07	1,37
8-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,13	0,37	0,07	1,39
9-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,10	0,37	0,07	1,29
10-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,06	0,38	0,07	1,31
11-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,23	0,39	0,08	1,35
12-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,17	1,27	0,39	0,07	1,29
13-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,21	0,39	0,07	1,39
14-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,20	0,39	0,07	1,42
15-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,16	1,18	0,39	0,07	1,41
16-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,18	1,31	0,62	0,12	1,09
17-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,18	1,30	0,63	0,12	1,20
18-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,17	1,29	0,63	0,12	1,11
19-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,17	1,25	0,63	0,12	1,21
20-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,19	0,63	0,12	1,09

Observamos na Tabela 4.5, que os piores resultados de P_{uexp}/P_{prop1} , ou seja, valores acima de 1,25 (grifados em cinza) correspondem a valores de b_f/b_w inferiores às demais

colunas, reforçando o indício de que essa variável pode estar interferindo nos resultados. Esse indício fica mais evidente no trabalho de SCHAFER e PEKOZ (1998a), no qual menciona que uma das limitações do MRD para previsão de carga última é que esse método pode ter seus resultados afetados pela relação b_f/b_w .

Portanto, devido aos altos valores da relação P_{uexp} e P_{prop1} nas colunas 1 a 15 de LOUGHLAN *et al.* (2012), a relação $b_f/b_w < 0,4$ pode ter interferido no desenvolvimento do modo secundário distorcional e conseqüentemente, não ter ocorrido a interação LD. Essa hipótese é sustentada com o fato dos valores de carga última experimentais (P_{uexp}) das colunas em questão apresentarem certa proximidade com os valores obtidos das equações de dimensionamento da flambagem local (P_{nL}), Equação 7, como pode ser observado na Tabela 4.6. Porém, vale mencionar que grande parte delas ainda se apresenta um pouco conservadoras com relação a formulação local (P_{nL}).

Tabela 4.6 – Relação entre as cargas últimas experimentais P_{uexp} e formulação de flambagem local, dada por P_{nL} (Equação 7)

AUTOR	$P_{uexp}(N)$	$P_{nL}(N)$	P_{uexp}/P_{nL}
1-YOUNG et al. (2013)	28800	28372	1,02
2-YOUNG et al. (2013)	31500	28096	1,12
3-YOUNG et al. (2013)	31360	27897	1,12
4-YOUNG et al. (2013)	31750	27844	1,14
5-YOUNG et al. (2013)	31850	27976	1,14
6-YOUNG et al. (2013)	29800	27884	1,07
7-YOUNG et al. (2013)	29350	27868	1,05
8-YOUNG et al. (2013)	30000	27721	1,08
9-YOUNG et al. (2013)	28100	27390	1,03
10-YOUNG et al. (2013)	29500	27455	1,07
11-YOUNG et al. (2013)	29170	27419	1,06
12-YOUNG et al. (2013)	26740	27126	0,99
13-YOUNG et al. (2013)	29850	27129	1,10
14-YOUNG et al. (2013)	30100	26688	1,13
15-YOUNG et al. (2013)	29800	26471	1,13

Essa dificuldade em desenvolver o modo distorcional pode ser explicada pelo fato de mesas mais curtas apresentarem maior resistência de abertura devido ao ganho de rigidez torcional das mesmas. Por isso, segundo conclusões apresentadas por YOUNG *et al.*(2013), as interações LD visualizadas nos ensaios numéricos e experimentais feitas por LOUGHLAN *et al.*(2012) podem ter sido ocasionadas pela plastificação da região de encontro entre alma e mesa e não por fenômenos de flambagem elástica distorcional.

A análise da influência relação b_f/b_w vai se apoiar no procedimento adotado na primeira etapa para encontrar a equação proposta P_{prop1} pelo qual se baseou na fixação dos parâmetros b_f/b_w igual a 0,95, D/b_w igual a 0,09 e posteriormente, traçado a variação dos coeficientes A e B com a variação de $R_{\lambda DL}$. Por isso, nessa segunda etapa será feito o mesmo procedimento, porém, repetido para mais quatro valores de b_f/b_w (totalizando cinco). Essa variação dos coeficientes A e B com a variação de $R_{\lambda DL}$ para diferentes valores de b_f/b_w pode ser verificado nas Figuras 4.20 e 4.21. O parâmetro D/b_w continuou fixado no valor de 0,09, pois será feito a análise desse parâmetro somente na próxima etapa.

A Figura 20 mostra a variação do coeficiente A (Equação 22) com a variação de $R_{\lambda DL}$ para diferentes relações de b_f/b_w . Percebe-se que a relação b_f/b_w tem influência na variação do coeficiente A. As curvas apresentadas com a variação de b_f/b_w apresentam formatos parecidos, porém alguns pontos se apresentam transladados uns em relação aos outros.

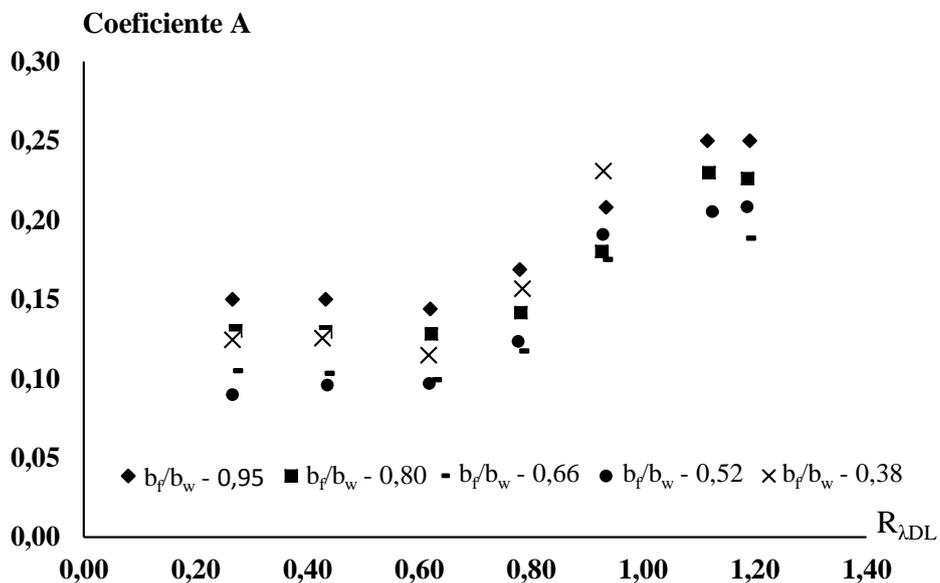


Figura 4.21 – Variação do coeficiente A com a variação $R_{\lambda DL}$ para diferentes relações de b_f/b_w .

A Figura 4.22 mostra a variação do coeficiente B (Equação 22) com relação a variação de $R_{\lambda DL}$ para diferentes relações de b_f/b_w . Percebe-se assim como na Figura 4.20 que a relação b_f/b_w também tem influência na variação do coeficiente do coeficiente B.

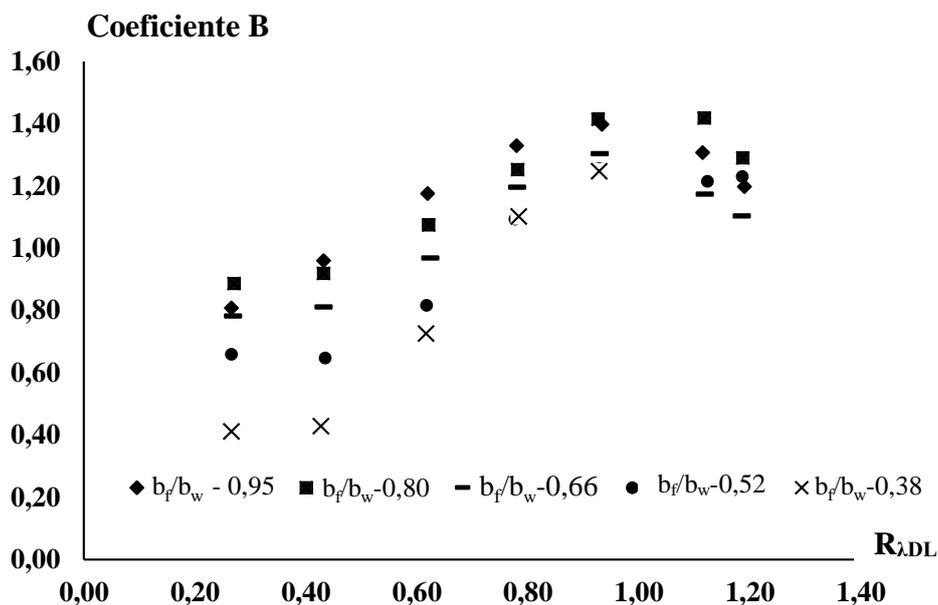


Figura 4.22 - Variação do coeficiente B com a variação $R_{\lambda DL}$ para diferentes relações de b_f/b_w .

Com os resultados apresentados nas Figuras 4.20 e 4.21 conclui-se que a formulação proposta (P_{prop1}) com os coeficientes A e B apresentados nas Equações 20 e 21, pelos quais foram consideradas apenas uma relação fixa de b_f/b_w igual a 0,95, conduzem a resultados muito conservadores quando ocorrem relações de b_f/b_w ligeiramente inferiores como é o caso de colunas de LOUGHLAN *et al.*(2012), conforme destacado na Tabela 4.5.

Portanto, para lidar com esse problema propõe-se duas soluções:

- (i) Adotar uma fórmula complementar de P_{prop2} para lidar com b_f/b_w menores;
- (ii) Adotar uma formulação única (P_{prop3}), no mesmo formato das Equações 20, 21 e 22 para lidar com o comportamento das colunas, porém, gerando como consequência, um desvio padrão maior com relação a solução (ii).

4.3.1 Proposta 1-2 – Formulação complementar de b_f/b_w ($P_{prop1-2}$)

Para proposição de uma equação complementar, é necessário analisar para quais valores de b_f/b_w a formulação P_{prop1} (feita para relações b_f/b_w iguais a 0,95) passa a não atender a precisão desejada. Com isso, a Tabela 4.7 mostra os resultados calculados da relação P_{unum}/P_{prop1} para diferentes valores de $\lambda_{m\acute{a}x}$, $R_{\lambda DL}$ e b_f/b_w , sendo D/b_w fixo igual a 0,09 para análise posterior na próxima etapa. Resultados para valores de $R_{\lambda DL}$ iguais a 1,12, 1,19 e b_f/b_w igual a 0,38 não foram considerados nessa tabela, pois foram

considerados apenas colunas com $\lambda_{\min LD-G}$ (Equação 5) abaixo de 0,5, de modo a evitar a flambagem global nas análises.

Tabela 4.7–Variação da relação de P_{unum}/P_{prop} . para diferentes valores de b_f/b_w .

$R_{\lambda DL}$	λ_{\max}	$b_f/b_w=0,95$	$b_f/b_w=0,80$	$b_f/b_w=0,66$	$b_f/b_w=0,52$	$b_f/b_w=0,38$
		P_{unum}/P_{prop1}	P_{unum}/P_{prop1}	P_{unum}/P_{prop1}	P_{unum}/P_{prop1}	P_{unum}/P_{prop1}
0,27	1,00	0,99	1,03	1,04	1,04	1,03
0,27	1,50	0,92	0,97	1,07	1,18	1,18
0,27	2,00	0,92	0,95	1,03	1,20	1,32
0,27	2,50	0,92	0,95	1,02	1,04	1,38
0,43	1,00	0,99	1,03	1,04	1,04	1,02
0,43	1,50	0,96	1,02	1,13	1,24	1,23
0,43	2,00	0,99	1,03	1,12	1,30	1,42
0,43	2,50	0,99	1,04	1,11	1,21	1,54
0,62	1,00	0,98	1,06	1,08	1,03	1,02
0,62	1,50	1,02	1,11	1,23	1,28	1,29
0,62	2,00	1,02	1,10	1,20	1,33	1,39
0,62	2,50	0,97	1,05	1,13	1,22	1,36
0,78	1,00	1,04	1,08	1,10	1,10	1,05
0,78	1,50	1,04	1,13	1,22	1,24	1,21
0,78	2,00	1,00	1,07	1,10	1,19	1,22
0,78	2,50	1,02	1,06	1,07	1,18	1,11
0,93	1,00	1,05	1,10	1,11	1,08	1,03
0,93	1,50	0,95	1,03	1,07	1,14	1,10
0,93	2,00	0,96	1,00	1,04	1,05	1,15
0,93	2,50	1,03	1,06	1,23	1,21	1,07
1,12	1,00	1,01	1,03	1,06	1,05	-
1,12	1,50	1,03	0,98	1,07	1,09	-
1,12	2,00	0,95	0,99	1,13	1,12	-
1,12	2,50	1,00	0,87	1,14	1,03	-
1,19	1,00	1,01	1,03	1,08	1,05	-
1,19	1,50	1,04	0,98	1,10	1,05	-
1,19	2,00	0,92	0,96	1,10	1,05	-
1,19	2,50	1,00	0,96	1,09	0,92	-
MAIOR		1,05	1,13	1,23	1,33	1,54
MENOR		0,92	0,87	1,02	0,92	1,02

Baseado na Tabela 4.7, conclui-se que a formulação de P_{prop1} apresenta valores satisfatórios para valores de b_f/b_w variando entre 0,95 até 0,66, sendo o menor e o maior valor da relação P_{unum}/P_{prop1} nesse intervalo equivalentes a 0,87 e 1,23, respectivamente.

Portanto, faz-se necessário uma formulação para lidar com relações de b_f/b_w abaixo de 0,66 e acima 0,38, chamado de P_{prop2} . Com isso, foram desenvolvidas soluções para os coeficientes A e B para um valor de b_f/b_w médio entre os valores que não

atenderam a formulação P_{prop1} , sendo adotada o valor de b_f/b_w igual a 0,52. Essas curvas podem ser observadas nas Figuras 4.22 e 4.23.

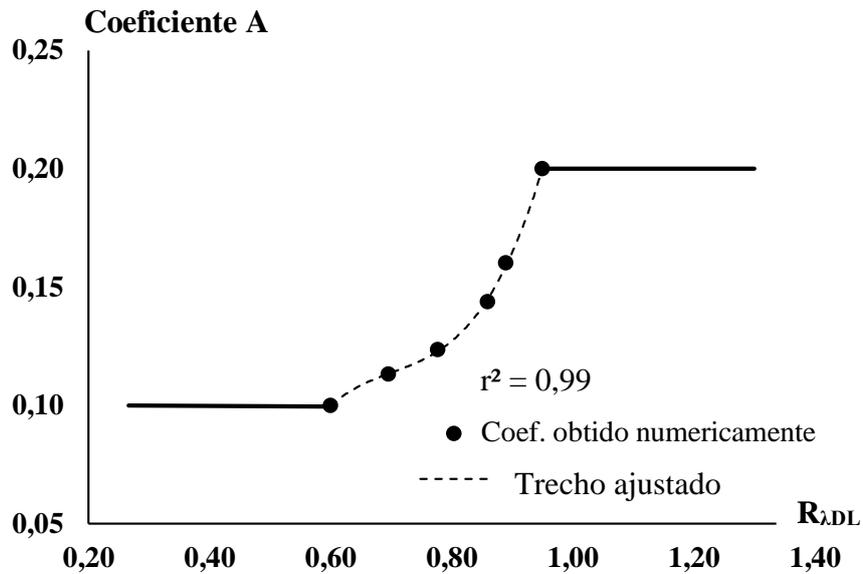


Figura 4.23 – Trecho ajustado para variação do coeficiente A com a variação de $R_{\lambda DL}$ com relação b_f/b_w igual a 0,52.

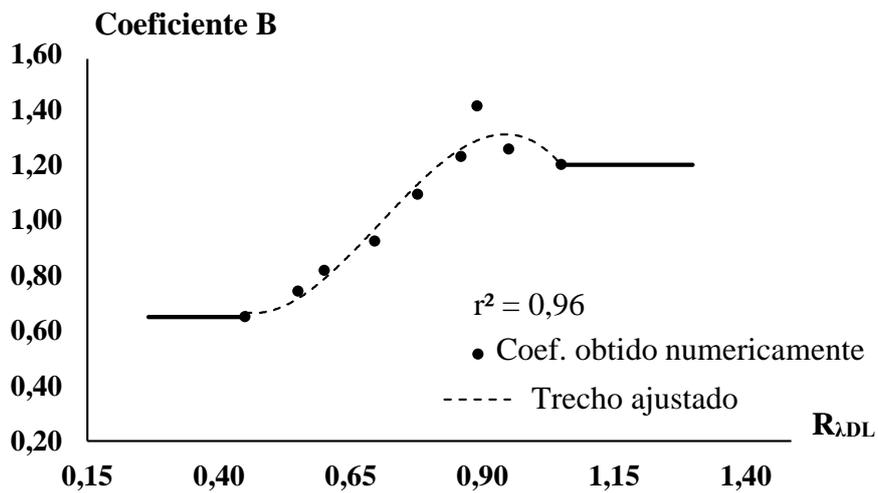


Figura 4.24 - Trecho ajustado para variação do coeficiente B com a variação de $R_{\lambda DL}$ com relação b_f/b_w igual a 0,52.

As equações geradas a partir dos trechos ajustados das Figuras 4.22 e 4.23 são as Equações 23 e 24, sendo que as mesmas são válidas apenas para trechos com b_f/b_w entre 0,38 até 0,66, com $P_{prop2}/P_y \leq 1$.

Para $0,38 \leq b_f/b_w \leq 0,66$:

$$P_{prop2} = \left(1 - \frac{A}{\lambda^B}\right) \frac{P_y}{\lambda^B} \quad \text{sendo } \lambda = \sqrt{\frac{P_y}{P_{cr}}} \quad (23)$$

$$A = \begin{cases} 0,10 & R_{\lambda DL} < 0,60 \\ 4,11R_{\lambda DL}^3 - 8,65R_{\lambda DL}^2 + 6,17R_{\lambda DL} - 1,38 & 0,60 \leq R_{\lambda DL} \leq 0,95 \\ 0,20 & R_{\lambda DL} > 0,95 \end{cases} \quad (24)$$

$$B = \begin{cases} 0,65 & R_{\lambda DL} < 0,45 \\ -12,86R_{\lambda DL}^3 + 27,17R_{\lambda DL}^2 - 17,03R_{\lambda DL} + 4 & 0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05 \\ 1,20 & R_{\lambda DL} > 1,05 \end{cases} \quad (25)$$

No caso do polinômio correspondente ao coeficiente A, na extremidade pelo qual $R_{\lambda DL} < 0,60$, não converge para o valor local ($A=0,15$) e valor distorcional ($A=0,25$), isso se deve ao fato já comentado do parâmetro b_f/b_w ter influência na resistência do perfil.

No caso do polinômio do coeficiente B, na extremidade pelo qual $R_{\lambda DL} < 0,45$, o valor encontrado foi de 0,65, diferentemente do que corresponde ao modo local que é equivalente a 0,80 (Equação 7). Na outra extremidade do mesmo polinômio, $R_{\lambda DL} > 1,05$, o valor encontrado já é o mesmo correspondente ao modo distorcional, ou seja, igual a 1,20 (Equação 8).

Contudo, tanto nos coeficientes A quanto no B, se for efetuado um ajuste para os valores de conhecidos local ($A=0,15$ e $B = 0,8$) e distorcional ($A=0,8$), teríamos ainda um bom ajuste de resultados, entretanto, geraria um desvio padrão maior. Porém, como o intuito dessa primeira proposta é achar uma formulação mais acurada baseada nos resultados numéricos, será considerado nessa equação $P_{prop1-2}$ alguns valores não coincidentes com os valores de flambagem local e distorcional.

Outro comentário a ser feito, é que o polinômio ajustado possui uma discordância para o coeficiente B quando o $R_{\lambda DL}$ é igual a 0,45, pois se substituirmos esse valor de $R_{\lambda DL}$ no polinômio do coeficiente B, iremos encontrar o valor de 0,67. Isso ocorre devido aos arredondamentos adotados para facilitar a aplicação prática da solução proposta.

O resumo da proposta das equações das variações dos coeficientes A e B estão apresentados na Tabela 4.8, considerados alguns arredondamentos como as mudanças dos valores de b_f/b_w de 0,38 para 0,40 e de 0,66 para 0,65 de forma a facilitar a aplicação prática das mesmas.

Tabela 4.8 – Equações dos Coeficientes A e B para aplicação no $P_{prop1-2}$ (Equação 25).

Intervalo de b_f/b_w	Equações dos coeficientes A e B
$0,40 \leq b_f/b_w \leq 0,65$	Equações 23 e 24
$0,65 < b_f/b_w \leq 1,00$	Equações 20 e 21

Após o cálculo dos coeficientes A e B (Tabela 4.8), eles são aplicados na Equação 25, denominado de $P_{prop1-2}$.

$$\frac{P_{prop1-2}}{P_y} = \left(1 - \frac{A}{\lambda_{m\acute{a}x.} B}\right) \frac{1}{\lambda_{m\acute{a}x.} B} \quad \text{sendo } \lambda_{m\acute{a}x.} = \text{m\acute{a}x.}\{\lambda_L, \lambda_D\} \text{ e } \frac{P_{\lambda DL}}{P_y} \leq 1 \quad (26)$$

A verificação da formulação $P_{prop1-2}$ com relação aos resultados de cargas últimas numéricas está apresentada na Tabela A.4 (apêndices) e estão melhor resumidas na Figura 4.25.

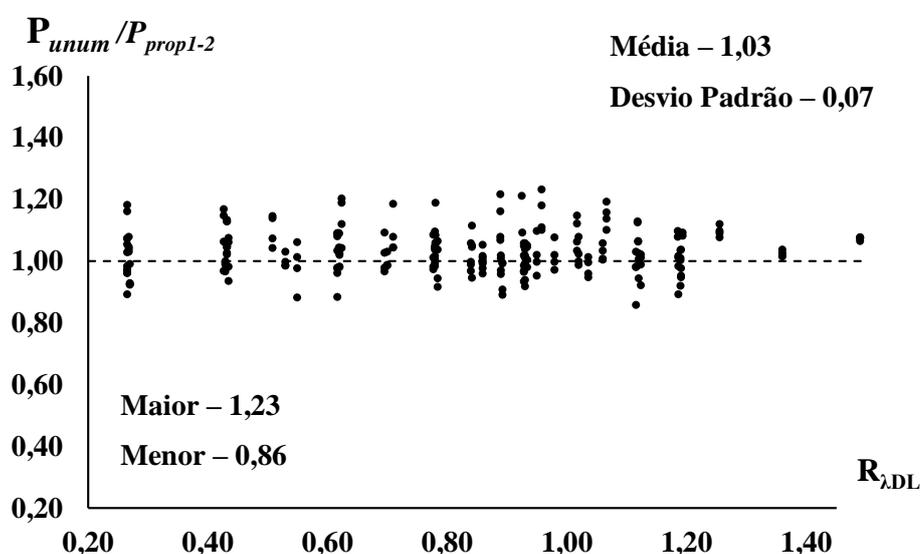


Figura 4.25 - Relação entre as cargas últimas numéricas (P_{unum}) e $P_{prop1-2}$. (Equação 25) com a variação de $R_{\lambda DL}$.

A média da correlação entre as cargas últimas numéricas e a equação $P_{prop1-2}$ ($P_{unum}/P_{prop1-2}$) apresenta média de 1,03, com desvio padrão de 0,07, mostrando assim, sua boa calibração com os resultados numéricos. Entretanto, para validação dessa metodologia, é preciso também passar pela verificação da calibração da equação $P_{prop1-2}$ com os ensaios experimentais. Tal verificação é apresentada na Tabela A.5 e Figura 4.26.

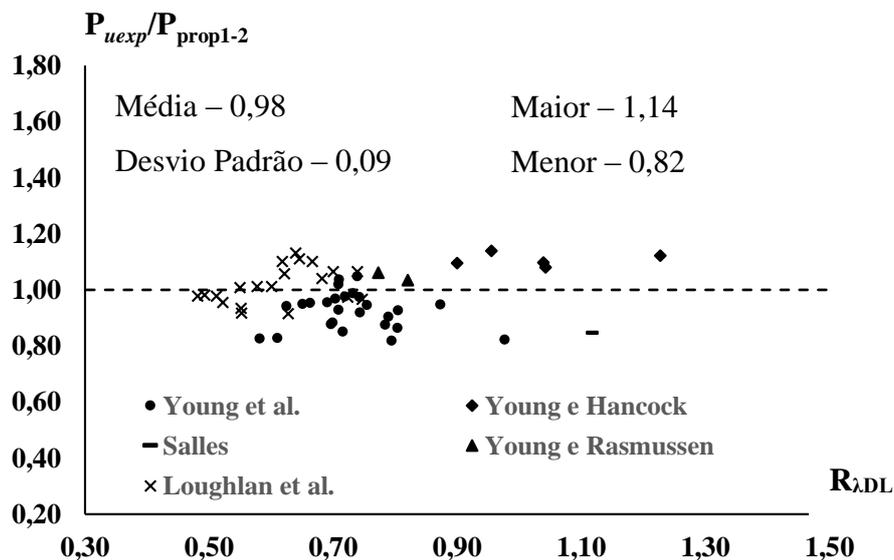


Figura 4.26 - Relação entre as cargas últimas experimental (P_{uexp}) e $P_{prop1-2}$ (Equação 25) com a variação de $R_{\lambda DL}$.

Consegue-se observar na Figura 4.26 que a complementação de uma nova equação (P_{prop2}) para lidar com a variável b_f/b_w resolveu o problema das colunas de 1 até 15 de LOUGHLAN *et al.* (2012) e mostrou, através dos resultados numéricos e experimentais, que o comportamento está bem representado pela formulação $P_{prop1-2}$. Destaca-se ainda que a comparação com os resultados experimentais levou à média de 0,98 e desvio padrão de 0,09.

Outro fator importante a ser comentado é que mesmo para colunas experimentais apresentando relação b_f/b_w da ordem de 0,35, ou seja, fora do intervalo especificado pela Equação $P_{prop1-2}$ (limite de até 0,40), a correlação entre a carga última experimental (P_{uexp}) e a especificada pela $P_{prop1-2}$ ainda apresenta ótimos resultados. Essa conclusão mostra que para valores próximos fora do intervalo $0,4 \leq b_f/b_w \leq 1,0$ a equação $P_{prop1-2}$ ainda é válida, porém, a limitação dos intervalos de b_f/b_w foram adotados para atender com segurança e precisão a maioria das colunas usuais.

Por fim, vale mencionar também que apesar de alguns resultados experimentais corresponderem a colunas com $\lambda_{mínLD-G}$ acima do valor limite adotado nas colunas numéricas (maiores que 0,5), essas colunas ainda apresentaram bons resultados, mostrando que até um certo intervalo acima de 0,5 que havia sido especificado, a formulação proposta ($P_{prop1-2}$) ainda consegue prever as cargas últimas dos experimentos. Entretanto, é necessário fazer um estudo adicional para verificar a influência do parâmetro

associado a flambagem global das colunas, $\lambda_{\min LD-G}$, nas equações propostas. Porém, esse estudo não será desenvolvido no presente trabalho.

Conclui-se assim, que a essa proposta 1-2 ($P_{prop1-2}$) se mostrou eficaz para lidar com o comportamento da interação LD em perfis U enrijecidos.

A superfície gerada pela equação P_{prop2} está representada na Figura 4.27. A grande diferença entre a superfície 1 (P_{prop1}) e 2 (P_{prop2}) é que as interações secundárias têm um intervalo mais curto devido ao aumento de rigidez a torção causado pelo encurtamento das mesas, consequentemente, existe uma queda mais brusca da relação P_{prop2}/P_y .

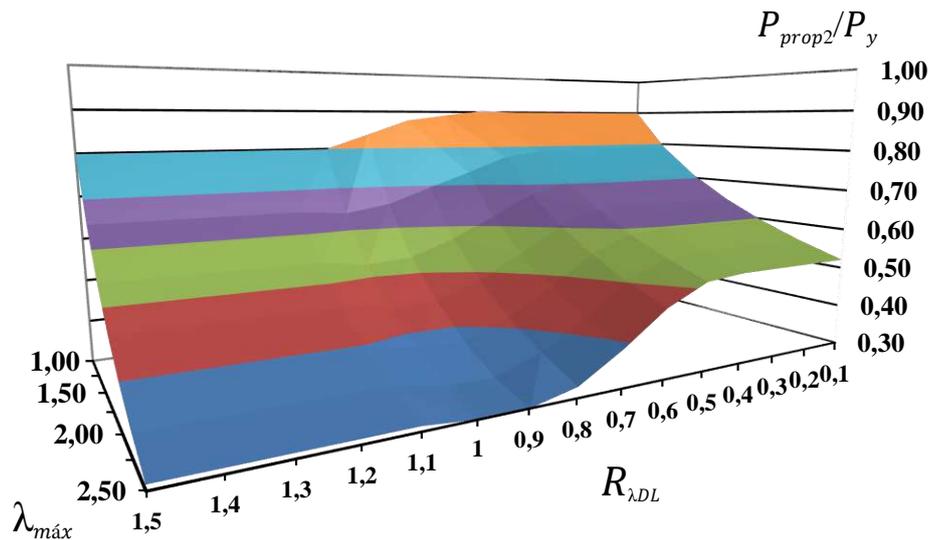


Figura 4.27 - Superfície contínua de resistência gerada pela P_{prop2} .

4.3.2 Proposta 3 – Baseada em uma única relação de b_f/b_w (P_{prop3})

Apesar da proposta 1-2 apresentar ótimos resultados, ainda é possível assimilar o comportamento de interação LD em perfis U enrijecidos de forma ainda mais simplificada, sendo resumida em um trecho de equações em vez de dois trechos. Todavia, isso será penalizado com um desvio padrão maior.

Para atingir o objetivo especificado nessa proposta 2, que chamaremos de P_{prop3} foi traçado a variação dos coeficientes A e B da Equação 27.

$$\frac{P_{prop3}}{P_y} = \left(1 - \frac{A}{\lambda_{m\acute{a}x.}^B}\right) \frac{1}{\lambda_{m\acute{a}x.}^B} \quad \text{sendo } \lambda_{m\acute{a}x.} = \text{m\acute{a}x.}\{\lambda_L, \lambda_D\} \text{ e } \frac{P_{prop3}}{P_y} \leq 1 \quad (27)$$

De forma a conseguir uma formulação única, ou seja, sem a necessidade de dividir por trechos os intervalos, foi utilizado o valor de b_f/b_w que apresentou um melhor

comportamento médio, ou seja, apresentando uma boa média e desvio padrão. O valor de b_f/b_w adotado para esse fim foi igual a 0,66.

Sendo assim, a variação dos coeficientes A e B da Equação 27 estão apresentadas nas Figuras 4.26 e 4.27, pelo qual apresenta a variação dos coeficientes A e B com a variação de $R_{\lambda DL}$. Para se obter esses gráficos, o método utilizado foi o mesmo utilizado na para chegar na equação anterior ($P_{prop1-2}$).

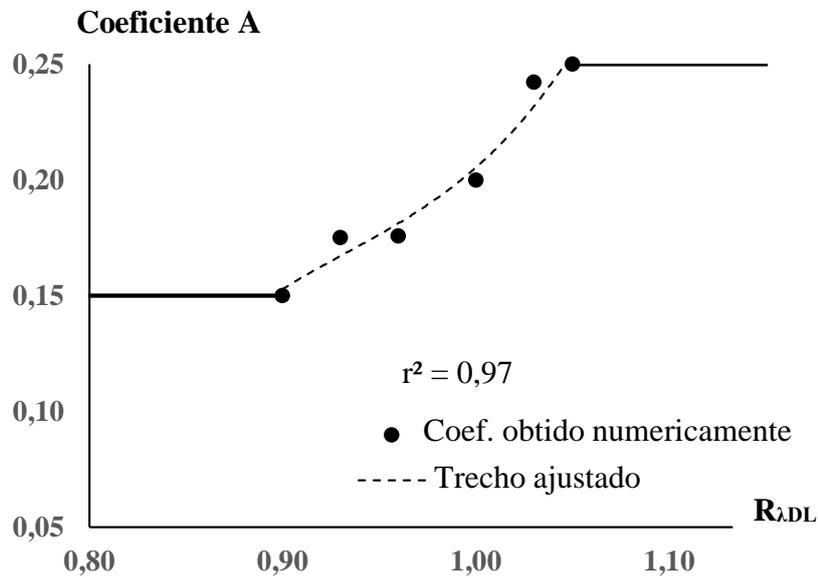


Figura 4.28 - Trecho ajustado para variação do coeficiente A com a variação de $R_{\lambda DL}$ com relação b_f/b_w igual a 0,66.

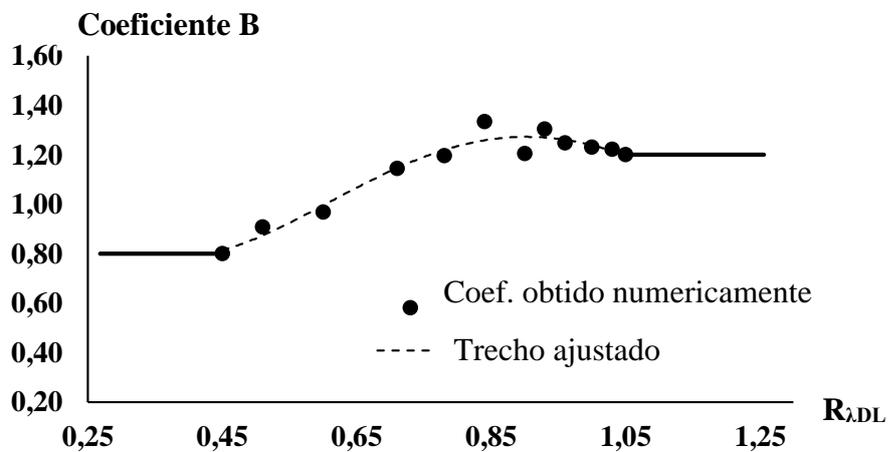


Figura 4.29 - Trecho ajustado para variação do coeficiente B com a variação de $R_{\lambda DL}$ com relação b_f/b_w igual a 0,66.

As equações 28 e 29 são geradas segundo os trechos ajustados mostrados nas Figuras 4.26 e 4.27.

$$A = \begin{cases} 0,15 & R_{\lambda DL} < 0,90 \\ 20,64R_{\lambda DL}^3 - 57,75R_{\lambda DL}^2 + 54,33R_{\lambda DL} - 17,02 & 0,90 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05 \\ 0,25 & R_{\lambda DL} > 1,05 \end{cases} \quad (28)$$

$$B = \begin{cases} 0,80 & R_{\lambda DL} < 0,45 \\ 7,17R_{\lambda DL}^4 - 25,76R_{\lambda DL}^3 + 31,07R_{\lambda DL}^2 - 14,21R_{\lambda DL} + 2,97 & 0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05 \\ 1,20 & R_{\lambda DL} > 1,05 \end{cases} \quad (29)$$

Nota-se que, para esse caso foram ajustados nas extremidades de modo a coincidirem com valores adotados no MRD local e distorcional (Equações 7 e 8) mencionadas por SCHAFER (2002), sendo os valores do coeficiente A equivalentes a 0,15 (local) e 0,25 (distorcional) e o coeficiente B igual 0,8 (local) e 1,20 (distorcional). Esses ajustes ocasionaram uma perda de precisão baixa na solução proposta e, por outro lado, asseguraram a representação coerente do comportamento médio para a totalidade dos resultados de SCHAFER (2002).

Assim como nos casos anteriores, ao ajustes e arredondamentos utilizados para facilitar a aplicação prática, gerou-se uma discordância no ponto com valor de $R_{\lambda DL} = 0,45$, no polinômio B (Equação 28), sendo verificado que para esse valor de $R_{\lambda DL}$ o polinômio da Equação 28 resulta em 0,81, porém, essa discordância é insignificante em nada a qualidade dos resultados gerados.

A verificação das cargas últimas numéricas (P_{unum}) com a equação proposta P_{prop3} (Equações 26, 27 e 28) pode ser verificada na Tabela A.6 (apêndices) e resumida na Figura 4.28.

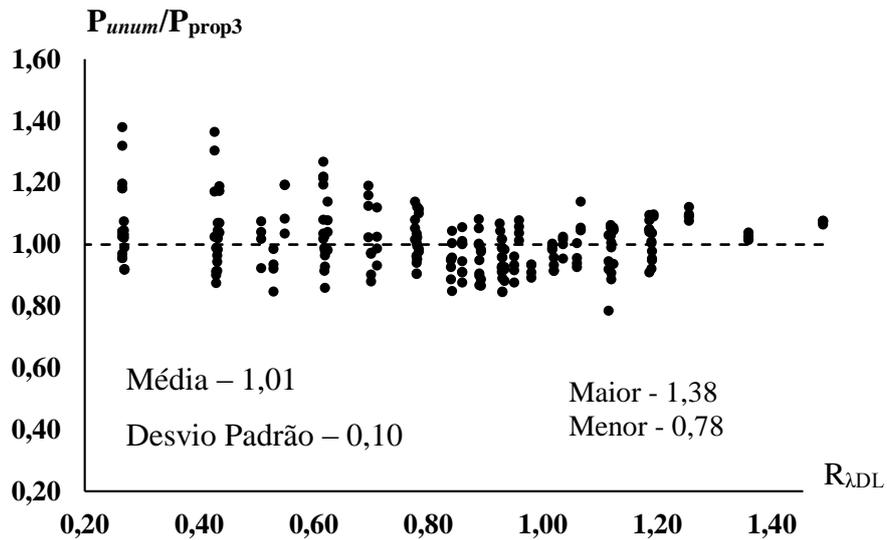


Figura 4.30 - Relação entre as cargas últimas numéricas (P_{unum}) e P_{prop3} (Equação 26) com a variação de $R_{\lambda DL}$.

Após verificar a comprovação da calibração adequada dos resultados numéricos propostos (P_{prop3}) com os resultados de análise numérica, é necessário fazer a verificação das colunas experimentais com a equação proposta, como pode ser verificado na Tabela A.7 (apêndices) e Figura 4.29.

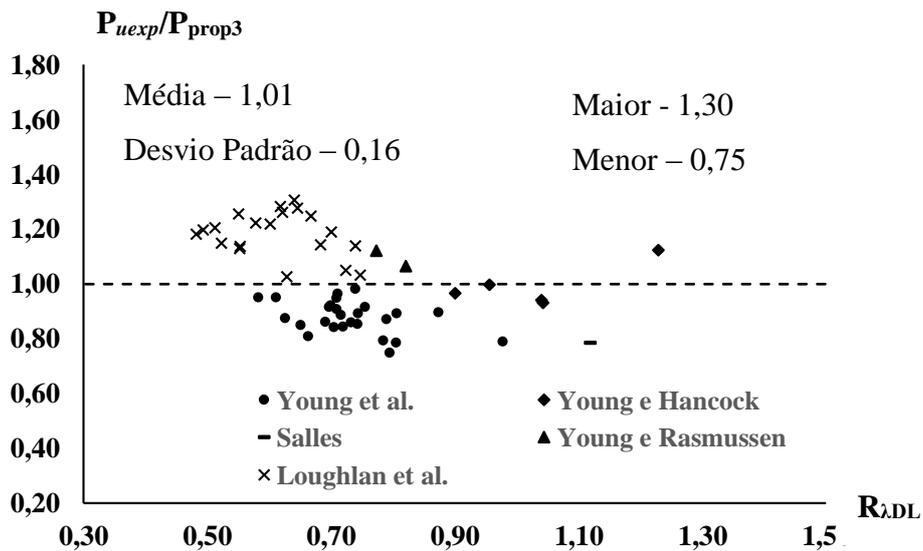


Figura 4.31 - Relação entre as cargas últimas experimentais (P_{uexp}) e P_{prop3} (Equação 26) com a variação de $R_{\lambda DL}$.

A superfície gerada pela equação P_{prop3} está representada na Figura 4.32, sendo possível observar os fenômenos de interações verdadeiras devido à queda da relação

P_{prop3}/P_y para valores de $R_{\lambda DL}$ próximos de 1,0. Adicionalmente, percebe-se que a queda de P_{prop3}/P_y se inicia para valores de $R_{\lambda DL}$ mais baixos conforme λ_{max} aumenta, ocasionado pelas interações secundárias.

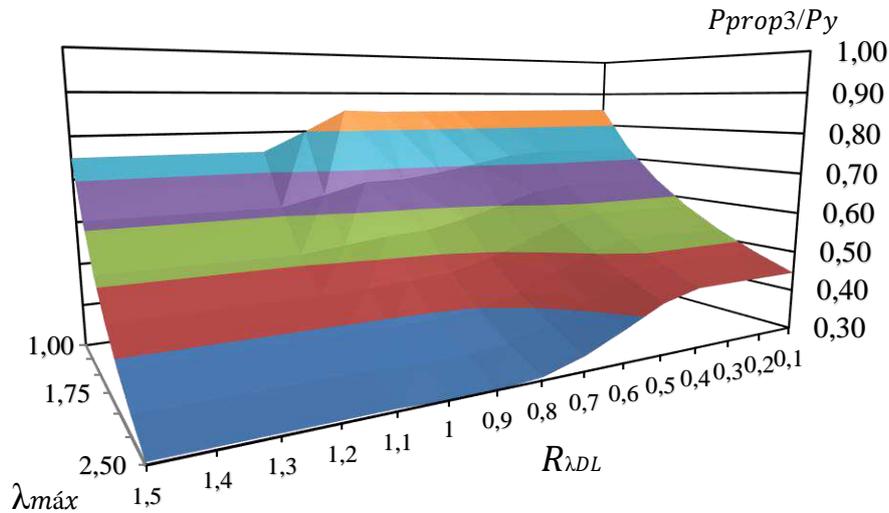


Figura 4.32 - Superfície contínua de resistência gerada pela P_{prop3} .

A validação de todas as equações propostas ($P_{prop1-2}$, P_{prop3} e P_{nDL*}) para efeito de dimensionamento será feita mais adiante, através dos cálculos dos coeficientes de ponderação da resistência.

4.4 Estudo paramétrico com a variação da variação D/b_w

Um dos últimos parâmetros a serem analisados é a influência da relação D/b_w na carga última das colunas e a verificação do intervalo no qual existe pouca perturbação dessa variável nas formulações das propostas $P_{prop1-2}$ e P_{prop3} . Porém, de forma a simplificar a análise, esse parâmetro foi verificado apenas no intervalo $0,1 \leq D/b_w \leq 0,3$, pois a utilização fora desse intervalo é muito pouco usual.

As Equações $P_{prop1-2}$ e P_{prop3} foram feitas com relação de D/b_w próximas de 0,1 e com isso, para essa etapa do estudo foi feito um aumento gradual desse parâmetro, de forma a verificar a influência do mesmo nas formulações já propostas. Por fim, o parâmetro $\lambda_{mínLD-G}$ (Equação 5) manteve-se novamente abaixo de 0,5 de forma a evitar a interferência significativa da flambagem global.

As colunas selecionadas para essa análise foram as mesmas colunas utilizadas para formulação de P_{prop} , sendo fixado apenas o parâmetro b_f/b_w no valor de 0,95 e os

outros parâmetros, como $\lambda_{\text{máx}}$, $R_{\lambda\text{DL}}$ e o parâmetro D/b_w foram variados. Esse último parâmetro variou nos valores de 0,09, 0,20, 0,25 e 0,30.

Os resultados da variação do parâmetro D/b_w pode ser observado na Tabela A.8 (apêndices), sendo que para as colunas em que não se conseguiu a convergência numérica foi utilizado N/C (não convergiu) e para as colunas que não foi possível isolar a influência do de flambagem global, mesmo após de variação de todas as dimensões do perfil, foi descrito como $\lambda_{\text{mínLD-G}} \text{ alto}$ ($\lambda_{\text{mínLD-G}} \geq 0,5$). Os resultados podem ser melhor visualizados nas Figuras 4.30 e 4.31.

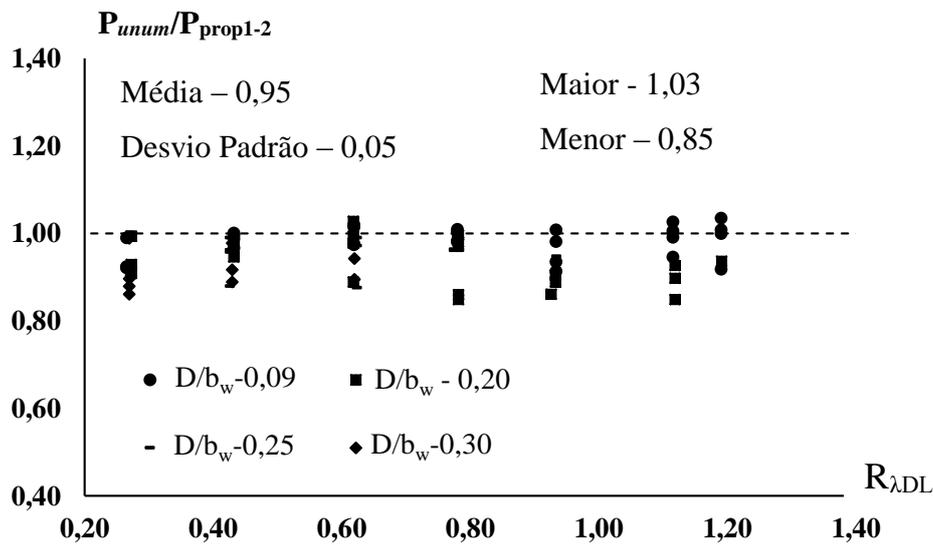


Figura 4.33 - Relação entre as cargas últimas numéricas (P_{unum}) e as formulação $P_{\text{prop1-2}}$ com a variação do parâmetro D/b_w .

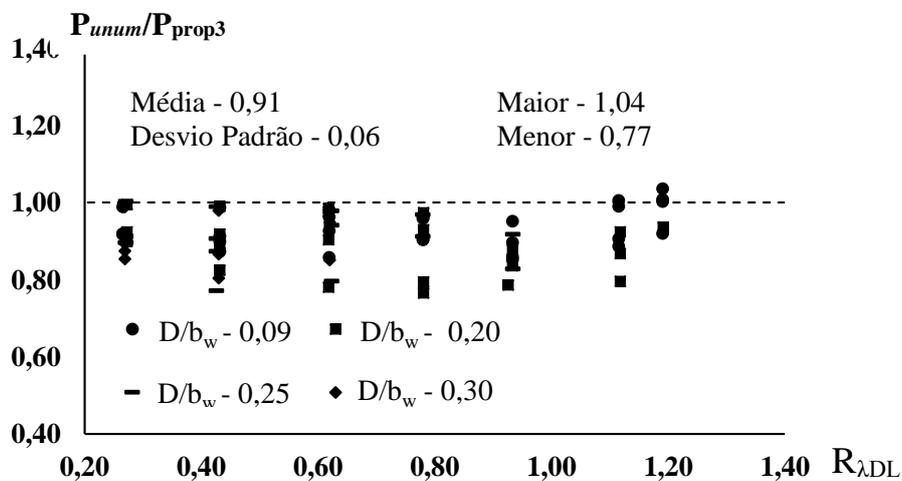


Figura 4.34 - Relação entre as cargas últimas numéricas (P_{unum}) e as formulação P_{prop3} com a variação do parâmetro D/b_w .

Nota-se que as formulações propostas $P_{prop1-2}$ e P_{prop3} para o parâmetro D/b_w variando entre 0,09 e 0,30 apresentam variações pouco significativas na relação com as cargas últimas obtidas numericamente. Isso se comprova pelo baixo desvio padrão apresentado nos dois casos, mostrando assim, a baixa variação entre eles e indicando a pouca influência desse parâmetro na carga última (dentro desse intervalo considerado).

Percebe-se também que as cargas últimas tendem a valores um pouco menores que os previstos pelas formulações propostas ($P_{prop1-2}$ e P_{prop3}), porém, sem perda significativa. A diminuição de capacidade de carga deve-se à perda de eficiência dos enrijecedores ocasionada pela flambagem local dos enrijecedores que é constatada partir de uma relação D/b_w igual a 0,20. Esse fenômeno está mostrado na Figura 4.35.

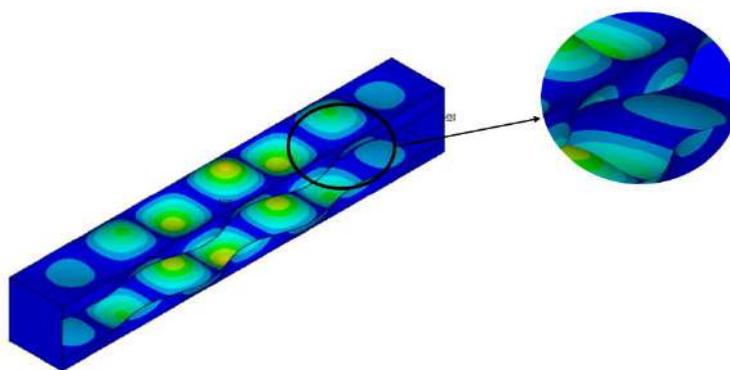


Figura 4.35 – Flambagem local dos enrijecedores para uma relação de D/b_w igual a 0,2 (análise de flambagem elástica).

Conclui-se então que as formulações propostas $P_{prop1-2}$ e P_{prop3} podem ser utilizadas em intervalo de D/b_w entre 0,09 (valor esse que será arredondado para 0,10) e 0,30, sem a necessidade de ser considerado esse parâmetro nas formulações propostas. Essa conclusão é válida desde que seja garantido o valor de $\lambda_{mínLD-G}$ inferior a 0,5, de modo a garantir que os efeitos da flambagem global não interfiram no comportamento.

4.5 Coeficiente de ponderação da resistência

A última etapa de validação de formulações proposta é o estudo de confiabilidade das equações propostas, sendo necessário calcular o coeficiente de ponderação da resistência. Para isso, segue-se a recomendação da norma brasileira NBR 14762:2010 (ABNT 2010), dirigida aos casos de dimensionamento em ensaios experimentais.

A equação do coeficiente de ponderação da resistência, γ é dada pela Equação 30.

$$\gamma = \frac{1}{X_m X_f e^{-\beta_0 \sqrt{\delta_m^2 + \delta_f^2 + C_p \delta_t^2 + 0,044}}} \quad (30)$$

Sendo para o caso de colunas:

$X_m = 1,10$ (valor médio do fator do material, pelo qual corresponde à média da relação entre a resistência dos protótipos, determinada por ensaio, e a resistência nominal específica);

$\delta_m = 0,10$ (coeficiente de variação do fator do material);

$X_f = 1,00$ (valor médio do fator de fabricação, o qual corresponde à média da relação entre a propriedade geométrica de interesse calculada com as dimensões da seção transversal medidas nos protótipos e correspondente valor calculado com as dimensões nominais);

$\delta_f = 0,05$ (coeficiente de variação do material);

n = número de ensaios;

$m = n - 1$ (grau de liberdade);

$$C_p = \begin{cases} n \geq 4 \rightarrow C_p = m(1 + 1/n)/(m - 2) \\ n = 3 \rightarrow C_p = 5,7 \end{cases}$$

$\beta_0 = 2,5$ (índice de confiabilidade-alvo);

δ_t = relação entre a média e o desvio padrão, não podendo ser menor que 6,5%.

Os valores dos coeficientes adotados são para casos de barras submetidas a tração ou à compressão presentes na NBR 14762:2010 (ABNT 2010).

Os valores de X_m e δ_m são utilizados para tipos de aço com tensões de escoamento tradicionais, podendo, variar para outros valores para o caso de aços de alta resistência, como mencionado por PHAM e HANCOCK (2012). Porém, como esse trabalho visa a aplicação em aços de escoamento mais usuais (tradicionais), será adotado os valores dos coeficientes presentes na NBR 14762 (ABNT, 2010).

Sendo assim, é possível calcular os coeficientes de ponderação da resistência das duas equações propostas ($P_{prop1-2}$ e P_{prop3}), além da proposta de MARTINS *et al.* (2017) (P_{nLD*}). Os resultados podem ser verificados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Coeficiente de ponderação da resistência para cada equação proposta.

Equação	γ	média	desv.pad.	n	m	X_m	δ_m	X_f	δ_f	C_p	β_0	δ_t
$P_{prop1-2}$	1,13	0,98	0,09	54	53	1,10	0,10	1,00	0,05	1,06	2,5	0,09
P_{prop3}	1,22	1,01	0,16	54	53	1,10	0,10	1,00	0,05	1,06	2,5	0,16
P_{nLD*}	1,21	0,99	0,15	54	53	1,10	0,10	1,00	0,05	1,06	2,5	0,15

A formulação P_{prop3} e P_{nLD*} ultrapassa levemente o coeficiente de ponderação previsto pela NBR 14762 (ABNT, 2010) que é de 1,20 para o caso de colunas. Porém, não ultrapassa de forma significativa.

A única das três propostas que apresenta o coeficiente de ponderação da resistência inferior ao definido na norma é a equação $P_{prop1-2}$, igual a 1,13, ou seja, apresenta uma considerável folga nesse coeficiente.

Conclui-se igualmente que todas as soluções propostas ($P_{prop1-2}$ e P_{prop3}) e a existente (P_{nLD*}) atendem ao coeficiente de ponderação da resistência adotado na NBR 14762 (ABNT, 2010).

4.6 Metodologia simplificada adotada em projetos de engenharia

Na prática de engenharia de projetos trabalha-se com a consideração das cargas críticas (local e distorcional) na condição de colunas biapoiada e com empenamento livre nas extremidades. Essa condição permite o cálculo de cargas críticas local e distorcional de forma simples com auxílio dos programas computacionais GBTUL (BEBIANO *et al.*, 2010) ou CUFMS (LI e SCHAFER, 2010), por exemplo. Permite, ainda adotar as soluções diretas do método da seção efetiva (BATISTA, 2010) para a flambagem local e solução proposta por CARDOSO *et al.*(2017) para cálculo direto da carga crítica de flambagem distorcional.

Para flambagem global, são utilizadas as fórmulas analíticas presentes em THIMOSHENKO e GERE (1961) e já inseridas na NBR 14762 (ABNT, 2010), sendo as mesmas admitindo o cálculo das forças críticas com as condições de contorno reais das colunas.

Utilizando essas metodologias mencionadas, sendo a carga crítica local calculada pelo Método da Seção Efetiva (BATISTA, 2010), a carga crítica distorcional utilizando a formulação de CARDOSO *et al.*(2017) (ambas considerando a de condições biapoiadas) e a carga crítica de flambagem global foi utilizada as fórmulas analíticas presentes na NBR 14762 (ABNT, 2010), considerando a condição real da coluna (biengastada).

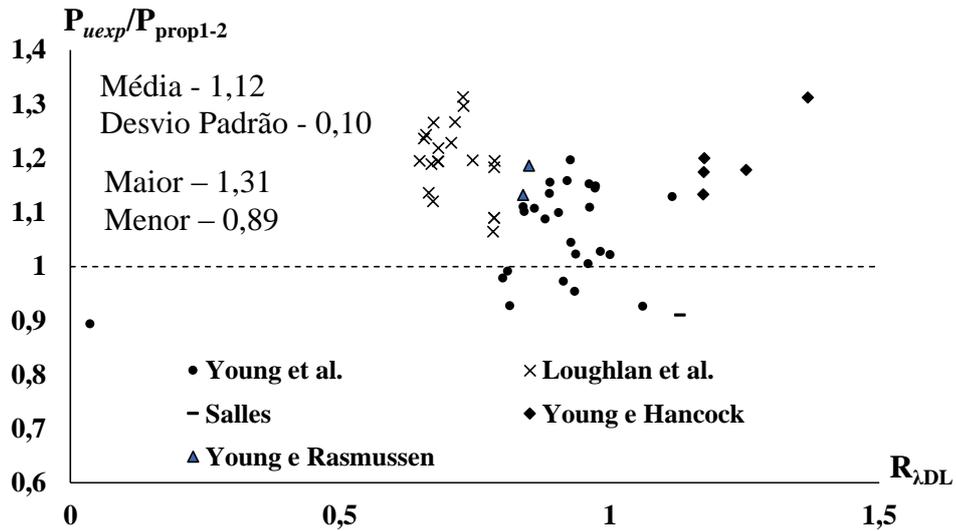


Figura 4.36 – Variação da relação $P_{uexp}/P_{prop1-2}$ com a variação de $R_{\lambda DL}$, utilizando os λ_L e λ_D na condição biapoiada.

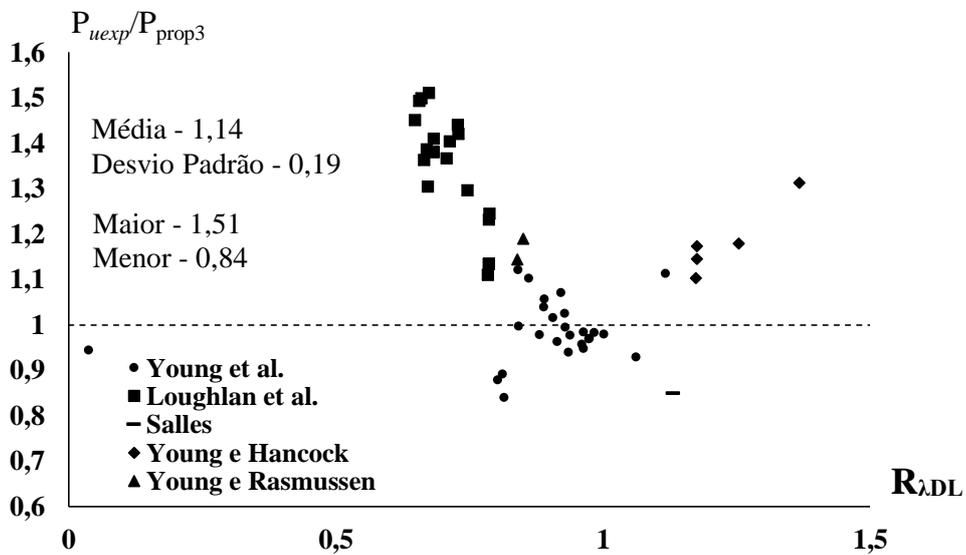


Figura 4.37 - Variação da relação P_{uexp}/P_{prop3} com a variação de $R_{\lambda DL}$, utilizando os λ_L e λ_D na condição biapoiada.

Percebe-se através das análises nas Figuras 4.36 e 4.37, que as duas formulações propostas ($P_{prop1-2}$ e P_{prop3}) levam a resultados conservadores, pois um mesmo perfil com condição biapoiada tende a carga crítica mais baixa se comparados com condição biengastada. Como consequência tem-se um aumento de esbeltez e uma diminuição da carga crítica prevista pelas duas equações propostas.

Vale ressaltar também que a maioria das colunas considerada nesse estudo apresentam comprimentos elevados (maioria acima de 1000 mm). Por isso, ocorreria a condição das cargas críticas tenderem a valores nas condições biapoiadas. Esse fato explicaria o motivo pelo qual a proposta $P_{prop1-2}$ se adequou razoavelmente bem a essa metodologia simplificada. Caso houvessem colunas mais curtas, as cargas críticas tenderiam a aumentar se compararmos com uma mesma seção biapoiada, e com isso, as equações propostas dariam valores ainda mais conservadores.

Conclui-se que essa metodologia simplificada de projeto conduz a resultados bastante conservadores. Porém, tais conclusões ainda precisam de um maior número de validações.

5 Conclusões

Este trabalho teve o intuito de estudar o comportamento da interação local-distorcional em perfis formados a frio de seção U enrijecido visando conseguir propor formulações que lidam com esse fenômeno.

Com isso, algumas conclusões do comportamento devem ser destacadas e são mencionadas a seguir:

- (i) A interação pode ocorrer sem perda significativa de carga, sendo portanto, necessário analisar a geometria da mesma para verificar o grau de interação através do parâmetro $R_{\lambda DL}$;
- (ii) A interação secundária por bifurcação distorcional (biengastada) é a que apresenta maior perda de carga em relação a equação que é prevista sem considerar a interferência LD (P_{nL}), fato esse já verificado por outros autores;
- (iii) As colunas com maior esbeltez máxima ($\lambda_{m\acute{a}x}$) possuem maior possibilidade de desenvolver a interação local-distorcional, pois possuem o ramo elástico maior, com isso, atingem cargas últimas mais altas e conseqüentemente, possibilitam o desenvolvimento da interação LD secundária;
- (iv) A metodologia paramétrica para estudo do comportamento de interação LD se mostrou eficiente e sistemático, podendo assim, ser testado para perfis com diferentes seções;
- (v) O parâmetro b_f/b_w tem influência significativa na carga última das colunas e devem ser consideradas para ter uma melhor precisão dos resultados;
- (vi) O parâmetro D/b_w apresentou pouca influência na carga última quando analisado no intervalo entre 0,10 e 0,30, sendo assim, não necessita ser considerados nas formulações propostas desde que não ocorra a influência da flambagem global;
- (vii) As análises simplificadas de projeto, ou seja, levando em consideração as cargas críticas (local e distorcional) na condição biapoiada e carga global na condição real das colunas, conduzem a valores conservadores quando utilizado as duas equações propostas neste trabalho, porém, é necessário um número maior de verificações para um número maior de colunas;

No decorrer do trabalho foram propostas duas equações, sendo chamadas de $P_{prop1-2}$ e P_{prop3} , essa última apresenta maior facilidade e rapidez de aplicação, porém, gera como

consequência um maior desvio padrão entre os dados experimentais analisados. As equações são resumidas a seguir:

1) Equação $P_{prop1-2}$ é dada por:

$$\frac{P_{prop1-2}}{P_y} = \left(1 - \frac{A}{\lambda_{máx}^B}\right) \left(\frac{1}{\lambda_{máx}^B}\right), \text{ sendo } \frac{P_{prop1-2}}{P_y} \leq 1,0$$

Para $0,4 \leq b_f/b_w \leq 0,65$ e $0,10 \leq D/b_w \leq 0,30$

$$A = \begin{cases} 0,10 & R_{\lambda DL} < 0,60 \\ 4,11R_{\lambda DL}^3 - 8,65R_{\lambda DL}^2 + 6,17R_{\lambda DL} - 1,38 & 0,60 \leq R_{\lambda DL} \leq 0,95 \\ 0,20 & R_{\lambda DL} > 0,95 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 0,65 & R_{\lambda DL} < 0,45 \\ -12,86R_{\lambda DL}^3 + 27,17R_{\lambda DL}^2 - 17,03R_{\lambda DL} + 4 & 0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05 \\ 1,20 & R_{\lambda DL} > 1,05 \end{cases}$$

Para $0,65 < b_f/b_w \leq 1,0$ e $0,10 \leq D/b_w \leq 0,30$

$$A = \begin{cases} 0,15 & R_{\lambda DL} < 0,60 \\ 1,89R_{\lambda DL}^3 - 4,09R_{\lambda DL}^2 + 3,1R_{\lambda DL} - 0,65 & 0,60 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,0 \\ 0,25 & R_{\lambda DL} > 1,0 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 0,80 & R_{\lambda DL} < 0,25 \\ -2,28R_{\lambda DL}^3 + 3,65R_{\lambda DL}^2 - 0,78R_{\lambda DL} + 0,8 & 0,25 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,20 \\ 1,20 & R_{\lambda DL} > 1,20 \end{cases}$$

2) A Equação P_{prop3} é dada por:

$$\frac{P_{prop3}}{P_y} = \left(1 - \frac{A}{\lambda_{máx}^B}\right) \left(\frac{1}{\lambda_{máx}^B}\right), \text{ sendo } \frac{P_{prop3}}{P_y} \leq 1,0$$

Sendo:

Para $0,4 \leq b_f/b_w \leq 1,0$ e $0,10 \leq D/b_w \leq 0,30$

$$A = \begin{cases} 0,15 & R_{\lambda DL} < 0,90 \\ 20,64R_{\lambda DL}^3 - 57,75R_{\lambda DL}^2 + 54,33R_{\lambda DL} - 17,02 & 0,90 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05 \\ 0,25 & R_{\lambda DL} > 1,05 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 0,80 & R_{\lambda DL} < 0,45 \\ 7,17R_{\lambda DL}^4 - 25,76R_{\lambda DL}^3 + 31,07R_{\lambda DL}^2 - 14,21R_{\lambda DL} + 2,97 & 0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05 \\ 1,20 & R_{\lambda DL} > 1,05 \end{cases}$$

Após análise do coeficiente de ponderação da resistência, as duas equações propostas ($P_{prop1-2}$ e P_{prop3}) apresentaram coeficiente de ponderação da resistência próximo ao valor da NBR 14762 (ABNT, 2010) que é 1,20. A equação proposta por

MARTINS *et al.* (2017) também apresentou coeficiente de ponderação da resistência satisfatório.

Conclui-se que as propostas ($P_{prop1-2}$ e P_{prop3}) aqui apresentadas descrevem o comportamento de interação local-distorcional em perfis formados a frio de seção U enrijecido sob compressão axial de maneira eficiente.

6 Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões para trabalhos futuros complementar as análises feitas durante esse trabalho, estão descritos a seguir:

- (i) Realização de mais experimentos e verificação da equações propostas para essas colunas, principalmente no ramo de bifurcação secundária local;
- (ii) Verificar a validade das equações propostas para outras seções;
- (iii) Fazer uma análise paramétrica do comprimento das colunas, de forma a inserir aos poucos a flambagem global, gerando assim, uma equação geral para o comportamento de interação LG, LDG e DG;
- (iv) Verificar para qual intervalo do parâmetro $\lambda_{\text{mínLD-G}}$ as equações propostas ($P_{\text{prop1-2}}$ e P_{prop3}) são válidas.

7 Referências bibliográficas

ABNT. NBR 14762: Dimensionamento de Estruturas de Aço constituídas por Perfis Formado a Frio. Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

BATISTA, E. M., 2010, "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, n. 4–5, pp. 345–356.

CARDOSO, D.C.T; SALLES, G.C; BATISTA, E.M; GONÇALVES, P.B., 2017, "Explicit Equations for distortional buckling of cold-formed steel lipped channel columns". *Thin-Walled Structures*, v. 119, pp. 925-933.

BEBIANO, R.; SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D., 2010, GBT theoretical background. Disponível em: <<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt/>>. Acesso em: 8 fev. 2018.

DINIS, P. B.; CAMOTIM, D.; SILVESTRE, N., 2007, "FEM-based analysis of the local-plate/distortional mode interaction in cold-formed steel lipped channel columns". *Computers and Structures*, v. 85, n. 19–20, pp. 1461–1474.

FENA, R. P. T., 2011, *Interação Local / Distorcional Em Colunas De Aço Enformadas a Frio Com Secção Em " Hat "*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

FEREGUETTI, P., 2016, *Dimensionamento via mrd de colunas de aço em pff com enrijecedores intermediários sob falha distorcional*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

KWON, Y. B.; HANCOCK, G. J., 1992, "Tests of cold-formed channels with local and distortional buckling". *Journal of Structural Engineering*, v. 118, pp. 1786–1803.

KWON, Y. B.; KIM, B. S.; HANCOCK, G. J., 2009, "Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction". *Journal of Constructional Steel Research*, v. 65, n. 2, pp. 278–289.

LAU, S. C. W.; HANCOCK, G. J., 1986, "Buckling of Thin Flat-Walled Structures by a Spline Finite Strip Method". *Thin-Walled Structures*, v. 4, pp. 269–294.

LI, Z.; SCHAFER, B. W., 2010, "Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: Conventional and constrained finite strip

methods". In: Twentieth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, pp. 1–15.

LOUGHLAN, J.; YIDRIS, N.; JONES, K., 2012, "The failure of thin-walled lipped channel compression members due to coupled local-distortional interactions and material yielding". *Thin-Walled Structures*, v. 61, pp. 14–21.

MARTINS, A. D.; CAMOTIM, D.; DINIS, P.B.; YOUNG, B., 2015a, "Local-Distortional Interaction in Cold-formed Steel Columns: Mechanics, Testing, Numerical Simulation and Design". *Structures*, v. 4, pp. 38–57.

MARTINS, A. D.; DINIS, P.B.; CAMOTIM, D.; PROVIDÊNCIA, P., 2015b, "On the relevance of local-distortional interaction effects in the behaviour and design of cold-formed steel columns". *Computers and Structures*, v. 160, pp. 57–89.

MARTINS, A. D.; CAMOTIM, D.; DINIS, P.B., 2017, "On the direct strength design of cold-formed steel columns failing in local-distortional interactive modes". *Thin-Walled Structures*, v. 120, n. March, pp. 432–445.

PASTOR, M. M, CASAFONT, M., BONADA, J., ROURE, F., 2014, "Imperfection amplitudes for nonlinear analysis of open thin-walled steel cross-sections used in rack column uprights". *Thin Walled Structures*, v. 76, pp. 28–41.

PERFIL NORTE, 2011. Catálogo Perfil Norte. Disponível em: <<http://www.perfilnorte.com>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

PHAM, C. H.; HANCOCK, G.J., 2012, "Direct strength design of cold-formed c-sections for shear and combined actions". *Journal of Structural Engineering*, v. 138, n. 6, pp. 759–768.

RIKS, E., 1979, "An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems". *Internacional Journal of solids and structures*, v. 15, pp. 529–551.

SALLES, G. C., 2017, *Investigação analítica, numérica e experimental do modo de flambagem distorcional em perfis formados a frio*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

SANTOS, E. S. DOS., 2014, *Interação entre os modos de flambagem local-distorcional-global em perfis de aço formados a frio com seção u enrijecido na compressão axial*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

SWANSON ANALYSIS SYSTEM (SAS), 2009, ANSYS, Reference Manual, version 12.0.1.

SCHAFFER, B. W., 1997, *Cold-Formed Steel Behaviour and Design: Analytical and Numerical Modeling of Elements and Members with Longitudinal Stiffeners*. Ph.D. Thesis. Cornell University, Ithaca, New York, USA.

SCHAFFER, B. W. Local, 2002, "Distortional, and Euler Buckling of Thin-Walled Columns". *Journal of Structural Engineering*, v. 128, n. 3, pp. 289–299.

SCHAFFER, B. W.; PEKOZ, T., 1998a, "Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions". In: St. Louis: Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.

SCHAFFER, B. W.; PEKOZ, T., 1998b, "Computational modeling of cold-formed steel : characterizing geometric imperfections and residual stresses". *Journal of Constructional Steel Research*, v. 47, pp. 193–210.

SENA, J. L., 2017, *Análise da flambagem elástica de perfis de aço formados a Frio com seções assimétricas na compressão axial e na flexão oblíqua*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

SILVA, A. C. C., 2017, *Dimensionamento à flambagem distorcional via mrd de colunas metálicas perfuradas em perfil rack*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D., 2010, "On the mechanics of distortion in thin-walled open sections". *Thin Walled Structures*, v. 48, n. 7, pp. 469–481.

SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D.; DINIS, P. B., 2012, "Post-buckling behaviour and direct strength design of lipped channel columns experiencing local/distortional interaction". *Journal of Constructional Steel Research*, v. 73, pp. 12–30.

SIMULIA. Abaqus/CAE User's Manual 6.12, 2012.

THIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M., 1963, *Theory of Elastic Stability*. Singapore: McGraw-Hill, INC.

VON KÁRMÁN, T.; SECHLER, E. .; DONNEL, L., 1932, "The strength of thin plates in compression". *Transaction ASME*, v. 54, p. APM 54-5.

WINTER, G., 1947, "Strength of thin-walled compression flanges". *Transaction ASME*, v. 112.

WINTER, G., 1968, "Thin-Walled Structures-Theoretical Solutions and Test Results". In: Preliminary Publications of the Eight Congress (IABSE).

YOUNG, B.; RASMUSSEN, K. J. R., 1998, "Design of lipped channel columns". *Journal of Structural Engineering*, v. 124, pp. 140–148.

YOUNG, B.; SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D., 2013, "Cold-Formed Steel Lipped Channel Columns Influenced by Local-Distortional Interaction: Strength and DSM Design". *Journal of Structural Engineering*, v. 139, pp. 1059–1074.

YU, W., 2000, *Cold-formed steel design*. 3 ed. Nova York: John Wiley & Sons, INC.

APÊNDICES

As Tabelas mencionadas no decorrer do trabalho estão apresentadas a seguir:

Tabela A.1 - Comparação entre as cargas últimas numéricas (P_u) e P_{uprop1} dado pela

Equação 22.

$\lambda D/\lambda L$	P_u	A	B	FATOR	P_{uprop1}	P_u/P_{prop1}
0,27	7165,1	0,16	0,81	0,44	7692,277	0,93
0,27	5398,9	0,16	0,81	0,52	5806,709	0,93
0,27	3738,9	0,16	0,81	0,64	4020,379	0,93
0,27	2366,7	0,16	0,81	0,84	2363,035	1,00
0,43	31545,0	0,16	0,96	0,39	31455,54	1,00
0,43	24560,9	0,16	0,96	0,47	24573,01	1,00
0,43	17164,6	0,16	0,96	0,61	17643,59	0,97
0,43	10832,8	0,16	0,96	0,84	10836,81	1,00
0,53	55246,7	0,16	1,07	0,35	55852,07	0,99
0,53	46235,1	0,16	1,07	0,44	44651,23	1,04
0,53	33292,6	0,16	1,07	0,58	33156,17	1,00
0,53	21289,6	0,16	1,07	0,84	21359,36	1,00
0,62	86503,1	0,15	1,18	0,32	87989,14	0,98
0,62	74235,4	0,15	1,18	0,41	72329,23	1,03
0,62	56565,7	0,15	1,18	0,56	55443,54	1,02
0,62	36698,8	0,15	1,18	0,85	37393,19	0,98
0,70	128003,5	0,17	1,27	0,30	128843,2	0,99
0,70	106584,2	0,17	1,27	0,39	107418,7	0,99
0,70	87248,3	0,17	1,27	0,54	84257,78	1,04
0,70	57191,9	0,17	1,27	0,83	57591,38	0,99
0,78	182758,8	0,18	1,34	0,28	180149,8	1,01
0,78	150889,9	0,18	1,34	0,37	152125	0,99
0,78	123709,4	0,18	1,34	0,52	121016,8	1,02
0,78	85009,3	0,18	1,34	0,82	85011,93	1,00
0,84	246160,2	0,19	1,38	0,27	230658,4	1,07
0,84	192022,2	0,19	1,38	0,36	196627,2	0,98
0,84	157180,3	0,19	1,38	0,51	158030,1	0,99
0,84	111752,7	0,19	1,38	0,81	111428,6	1,00
0,86	268405,3	0,20	1,39	0,26	261366	1,03
0,86	216290,0	0,20	1,39	0,35	223482,6	0,97
0,86	176091,3	0,20	1,39	0,51	179235,6	0,98
0,86	127156,6	0,20	1,39	0,80	127026,2	1,00
0,89	300209,9	0,21	1,40	0,26	291787,9	1,03
0,89	241097,1	0,21	1,40	0,35	249799,4	0,97
0,89	196607,4	0,21	1,40	0,50	201296,9	0,98

Continua na próxima página

$\lambda D/\lambda L$	P_u	A	B	FATOR	P_{uprop1}	P_u/P_{prop1}
0,89	144826,0	0,21	1,40	0,79	142591,4	1,02
0,93	367858,1	0,22	1,41	0,26	359871,1	1,02
0,93	291446,3	0,22	1,41	0,35	307675,2	0,95
0,93	229462,7	0,22	1,41	0,49	247834,4	0,93
0,93	173577,6	0,22	1,41	0,78	173522,1	1,00
0,95	431169,6	0,23	1,41	0,26	388713,4	1,11
0,95	341529,8	0,23	1,41	0,34	331605,8	1,03
0,95	255511,2	0,23	1,41	0,49	265910,6	0,96
0,95	186690,5	0,23	1,41	0,77	185128	1,01
0,98	504398,4	0,25	1,41	0,25	462724,6	1,09
0,98	406068,4	0,25	1,41	0,33	394006,9	1,03
0,98	309405,8	0,25	1,41	0,48	314904,5	0,98
0,98	220110,0	0,25	1,41	0,74	217428,1	1,01
1,02	589128,5	0,25	1,39	0,26	542171,4	1,09
1,02	473899,1	0,25	1,39	0,34	460339,2	1,03
1,02	362882,9	0,25	1,39	0,49	366663,2	0,99
1,02	250587,3	0,25	1,39	0,75	250752,2	1,00
1,06	664095,3	0,25	1,37	0,27	623570,7	1,06
1,06	547451,3	0,25	1,37	0,35	526890	1,04
1,06	419954,0	0,25	1,37	0,49	415670,2	1,01
1,06	283536,3	0,25	1,37	0,75	282589,6	1,00
1,12	772836,0	0,25	1,31	0,28	779256,6	0,99
1,12	615298,6	0,25	1,31	0,36	649845,4	0,95
1,12	519254,1	0,25	1,31	0,50	505857,9	1,03
1,12	338669,2	0,25	1,31	0,75	336519,8	1,01
1,19	1121160,0	0,25	1,20	0,31	1119364	1,00
1,19	834661,8	0,25	1,20	0,39	907864	0,92
1,19	709927,8	0,25	1,20	0,52	685727,3	1,04
1,19	444906,4	0,25	1,20	0,75	440945,9	1,01
1,36	2272487,4	0,25	1,20	0,30	2239752	1,01
1,36	1851082,9	0,25	1,20	0,39	1819396	1,02
1,36	1404357,4	0,25	1,20	0,52	1368029	1,03
1,36	912437,6	0,25	1,20	0,75	879444,4	1,04
1,49	3290664,3	0,25	1,20	0,31	3067461	1,07
1,49	2690764,3	0,25	1,20	0,39	2498438	1,08
1,49	2024693,5	0,25	1,20	0,52	1880818	1,08
1,49	1285018,9	0,25	1,20	0,75	1207625	1,06

Tabela A.2 - Comparação entre as cargas últimas experimentais e os autores das colunas experimentais utilizadas para validação do modelo e P_{uprop1} dado pela Equação 22.

AUTOR	$R_{\lambda DL}$	A	B	$\lambda_{\min LD-G}$	P_{uexp}/P_{prop1}
1-YOUNG et al. (2013)	0,78	0,19	1,34	0,65	0,89
2-YOUNG et al. (2013)	0,80	0,19	1,36	0,68	0,87
3-YOUNG et al. (2013)	0,79	0,19	1,35	0,76	0,83
4-YOUNG et al. (2013)	0,74	0,18	1,31	0,22	0,99
5-YOUNG et al. (2013)	0,70	0,18	1,27	0,24	0,98
6-YOUNG et al. (2013)	0,73	0,18	1,30	0,21	1,00
7-YOUNG et al. (2013)	0,74	0,18	1,30	0,42	1,06
8-YOUNG et al. (2013)	0,71	0,18	1,28	0,39	1,05
9-YOUNG et al. (2013)	0,71	0,18	1,28	0,39	1,03
10-YOUNG et al. (2013)	0,72	0,18	1,29	0,20	0,99
11-YOUNG et al. (2013)	0,66	0,17	1,23	0,21	0,96
12-YOUNG et al. (2013)	0,61	0,15	1,17	0,24	1,03
13-YOUNG et al. (2013)	0,58	0,15	1,14	0,25	1,03
14-YOUNG et al. (2013)	0,63	0,16	1,19	0,23	0,95
15-YOUNG et al. (2013)	0,69	0,17	1,26	0,23	0,96
16-YOUNG et al. (2013)	0,65	0,16	1,21	0,24	0,96
17-YOUNG et al. (2013)	0,79	0,19	1,35	0,66	0,91
18-YOUNG et al. (2013)	0,75	0,18	1,32	0,67	0,96
19-YOUNG et al. (2013)	0,81	0,19	1,36	0,83	0,94
20-YOUNG et al. (2013)	0,70	0,17	1,26	0,48	0,94
21-YOUNG et al. (2013)	0,70	0,17	1,27	0,45	0,95
22-YOUNG et al. (2013)	0,72	0,18	1,28	0,47	0,91
23-YOUNG et al. (2013)	0,87	0,21	1,39	0,45	0,96
24-YOUNG et al. (2013)	0,74	0,18	1,31	0,48	0,93
25-YOUNG et al. (2013)	0,71	0,18	1,28	0,49	0,94
26-YOUNG et al. (2013)	0,98	0,25	1,41	0,85	0,85
1-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	0,77	0,19	1,33	0,51	1,21
2-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	0,82	0,19	1,37	0,74	1,15
1-SALLES (2017)	1,12	0,25	1,31	0,56	0,85
1-YOUNG E HANCOCK (1992)	1,23	0,25	1,20	0,15	1,12
2-YOUNG E HANCOCK (1992)	1,04	0,25	1,38	0,15	1,11
3-YOUNG E HANCOCK (1992)	1,04	0,25	1,38	0,07	1,09
4-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,90	0,22	1,40	0,12	1,11
5-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,96	0,24	1,41	0,15	1,15
1-LOUGHLAN et al. (2012)	0,55	0,15	1,10	0,32	1,33
2-LOUGHLAN et al. (2012)	0,55	0,15	1,10	0,28	1,47
3-LOUGHLAN et al. (2012)	0,51	0,15	1,05	0,26	1,42
4-LOUGHLAN et al. (2012)	0,49	0,15	1,03	0,23	1,41
5-LOUGHLAN et al. (2012)	0,48	0,15	1,02	0,20	1,39

Continua na próxima página

AUTOR	$R_{\lambda DL}$	A	B	$\lambda_{\min LD-G}$	P_{uexp}/P_{prop1}
6-LOUGHLAN et al. (2012)	0,62	0,16	1,18	0,38	1,42
7-LOUGHLAN et al. (2012)	0,60	0,15	1,16	0,35	1,37
8-LOUGHLAN et al. (2012)	0,58	0,15	1,13	0,31	1,39
9-LOUGHLAN et al. (2012)	0,55	0,15	1,10	0,28	1,29
10-LOUGHLAN et al. (2012)	0,52	0,15	1,06	0,25	1,31
11-LOUGHLAN et al. (2012)	0,67	0,17	1,23	0,50	1,36
12-LOUGHLAN et al. (2012)	0,70	0,17	1,27	0,42	1,30
13-LOUGHLAN et al. (2012)	0,65	0,16	1,21	0,39	1,40
14-LOUGHLAN et al. (2012)	0,64	0,16	1,20	0,34	1,43
15-LOUGHLAN et al. (2012)	0,62	0,15	1,18	0,29	1,41
16-LOUGHLAN et al. (2012)	0,75	0,18	1,31	0,56	1,10
17-LOUGHLAN et al. (2012)	0,74	0,18	1,30	0,51	1,22
18-LOUGHLAN et al. (2012)	0,72	0,18	1,29	0,45	1,12
19-LOUGHLAN et al. (2012)	0,68	0,17	1,25	0,41	1,22
20-LOUGHLAN et al. (2012)	0,63	0,16	1,19	0,36	1,09

Tabela A.3 - Comparação entre as cargas últimas experimentais ($P_{uexp.}$) e P_{nLD*} .

AUTOR	$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x.}$	$\lambda_{m\acute{i}nLD-G}$	$P_{uexp.}/P_{nLD*}$
1-YOUNG et al. (2013)	0,78	2,39	0,65	0,78
2-YOUNG et al. (2013)	0,80	2,28	0,68	0,76
3-YOUNG et al. (2013)	0,79	2,14	0,76	0,73
4-YOUNG et al. (2013)	0,74	3,13	0,22	0,87
5-YOUNG et al. (2013)	0,70	3,12	0,24	0,90
6-YOUNG et al. (2013)	0,73	3,29	0,21	0,89
7-YOUNG et al. (2013)	0,74	1,67	0,42	0,91
8-YOUNG et al. (2013)	0,71	1,79	0,39	0,89
9-YOUNG et al. (2013)	0,71	1,77	0,39	0,86
10-YOUNG et al. (2013)	0,72	3,32	0,20	0,89
11-YOUNG et al. (2013)	0,66	3,36	0,21	0,93
12-YOUNG et al. (2013)	0,61	1,72	0,24	0,86
13-YOUNG et al. (2013)	0,58	1,73	0,25	0,87
14-YOUNG et al. (2013)	0,63	1,71	0,23	0,78
15-YOUNG et al. (2013)	0,69	2,26	0,23	0,92
16-YOUNG et al. (2013)	0,65	2,28	0,24	0,94
17-YOUNG et al. (2013)	0,79	1,11	0,66	0,84
18-YOUNG et al. (2013)	0,75	1,12	0,67	0,88
19-YOUNG et al. (2013)	0,81	1,06	0,83	0,87
20-YOUNG et al. (2013)	0,70	0,94	0,48	0,93
21-YOUNG et al. (2013)	0,70	0,96	0,45	0,93
22-YOUNG et al. (2013)	0,72	0,93	0,47	0,91
23-YOUNG et al. (2013)	0,87	1,06	0,45	0,88
24-YOUNG et al. (2013)	0,74	1,09	0,48	0,87
25-YOUNG et al. (2013)	0,71	1,09	0,49	0,89
26-YOUNG et al. (2013)	0,98	0,87	0,85	0,88
1-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	0,77	1,61	0,51	1,08
2-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	0,82	1,56	0,74	1,04
1-SALLES (2017)	1,12	2,26	0,56	0,79
1-YOUNG E HANCOCK (1992)	1,23	3,32	0,15	1,12
2-YOUNG E HANCOCK (1992)	1,04	2,81	0,15	1,39
3-YOUNG E HANCOCK (1992)	1,04	2,75	0,07	1,37
4-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,90	2,68	0,12	1,25
5-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,96	2,68	0,15	1,36
1-LOUGHLAN et al. (2012)	0,55	2,61	0,32	1,02
2-LOUGHLAN et al. (2012)	0,55	2,66	0,28	1,12
3-LOUGHLAN et al. (2012)	0,51	2,69	0,26	1,12
4-LOUGHLAN et al. (2012)	0,49	2,70	0,23	1,14
5-LOUGHLAN et al. (2012)	0,48	2,67	0,20	1,14
6-LOUGHLAN et al. (2012)	0,62	2,22	0,38	1,09
7-LOUGHLAN et al. (2012)	0,60	2,23	0,35	1,05

Continua na próxima página

AUTOR	$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x.}$	$\lambda_{m\acute{i}nLD-G}$	$P_{uexp.}/P_{nLD*}$
8-LOUGHLAN et al. (2012)	0,58	2,25	0,31	1,08
9-LOUGHLAN et al. (2012)	0,55	2,29	0,28	1,03
10-LOUGHLAN et al. (2012)	0,52	2,27	0,25	1,07
11-LOUGHLAN et al. (2012)	0,67	1,84	0,50	1,06
12-LOUGHLAN et al. (2012)	0,70	1,85	0,42	1,11
13-LOUGHLAN et al. (2012)	0,65	1,88	0,39	1,10
14-LOUGHLAN et al. (2012)	0,64	1,89	0,34	1,13
15-LOUGHLAN et al. (2012)	0,62	1,92	0,29	1,13
16-LOUGHLAN et al. (2012)	0,75	1,50	0,56	0,90
17-LOUGHLAN et al. (2012)	0,74	1,49	0,51	1,00
18-LOUGHLAN et al. (2012)	0,72	1,50	0,45	0,92
19-LOUGHLAN et al. (2012)	0,68	1,52	0,41	1,02
20-LOUGHLAN et al. (2012)	0,63	1,54	0,36	0,94

Tabela A.4 - Relação entre as cargas últimas numéricas (P_u) e $P_{prop1-2}$. dado pela Equação 25.

$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x.}$	b_f/b_w	$0,38 < b_f/b_w < 0,65$		$0,65 < b_f/b_w < 1,00$		$P_u/P_{prop1-2}$
			A	B	A	B	
0,27	2,50	0,95	0,10	0,65	0,15	0,81	0,93
0,27	2,00	0,95	0,10	0,65	0,15	0,81	0,92
0,27	1,50	0,95	0,10	0,65	0,15	0,81	0,92
0,27	1,00	0,95	0,10	0,65	0,15	0,81	0,99
0,43	2,50	0,95	0,10	0,68	0,15	0,96	1,00
0,43	2,00	0,95	0,10	0,68	0,15	0,96	0,99
0,43	1,50	0,95	0,10	0,68	0,15	0,96	0,97
0,43	1,00	0,95	0,10	0,68	0,15	0,96	0,99
0,53	2,50	0,95	0,10	0,69	0,15	1,07	0,99
0,53	2,00	0,95	0,10	0,69	0,15	1,07	1,03
0,53	1,50	0,95	0,10	0,69	0,15	1,07	1,00
0,53	1,00	0,95	0,10	0,69	0,15	1,07	0,99
0,62	2,50	0,95	0,10	0,82	0,15	1,18	0,98
0,62	2,00	0,95	0,10	0,82	0,15	1,18	1,02
0,62	1,50	0,95	0,10	0,82	0,15	1,18	1,02
0,62	1,00	0,95	0,10	0,82	0,15	1,18	0,98
0,70	2,50	0,95	0,11	0,98	0,16	1,27	0,99
0,70	2,00	0,95	0,11	0,98	0,16	1,27	0,99
0,70	1,50	0,95	0,11	0,98	0,16	1,27	1,03
0,70	1,00	0,95	0,11	0,98	0,16	1,27	0,99
0,78	2,50	0,95	0,11	1,14	0,18	1,34	1,01
0,78	2,00	0,95	0,11	1,14	0,18	1,34	0,99
0,78	1,50	0,95	0,11	1,14	0,18	1,34	1,02
0,78	1,00	0,95	0,11	1,14	0,18	1,34	0,99
0,84	2,50	0,95	0,13	1,24	0,19	1,38	1,07
0,84	2,00	0,95	0,13	1,24	0,19	1,38	0,97
0,84	1,50	0,95	0,13	1,24	0,19	1,38	0,99
0,84	1,00	0,95	0,13	1,24	0,19	1,38	1,00
0,86	2,50	0,95	0,14	1,27	0,19	1,39	1,03
0,86	2,00	0,95	0,14	1,27	0,19	1,39	0,97
0,86	1,50	0,95	0,14	1,27	0,19	1,39	0,98
0,86	1,00	0,95	0,14	1,27	0,19	1,39	0,99
0,89	2,50	0,95	0,16	1,30	0,20	1,40	1,03
0,89	2,00	0,95	0,16	1,30	0,20	1,40	0,96
0,89	1,50	0,95	0,16	1,30	0,20	1,40	0,97
0,89	1,00	0,95	0,16	1,30	0,20	1,40	1,01
0,93	2,50	0,95	0,19	1,32	0,22	1,41	1,02
0,93	2,00	0,95	0,19	1,32	0,22	1,41	0,95
0,93	1,50	0,95	0,19	1,32	0,22	1,41	0,92
0,93	1,00	0,95	0,19	1,32	0,22	1,41	0,99
0,95	2,50	0,95	0,20	1,32	0,23	1,41	1,11

Continua na próxima página

$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x.}$	b_f/b_w	$0,38 < b_f/b_w < 0,65$		$0,65 < b_f/b_w < 1,00$		$P_u/P_{prop1-2}$
			A	B	A	B	
0,95	2,00	0,95	0,20	1,32	0,23	1,41	1,03
0,95	1,50	0,95	0,20	1,32	0,23	1,41	0,96
0,95	1,00	0,95	0,20	1,32	0,23	1,41	1,00
0,98	2,54	0,95	0,20	1,30	0,25	1,41	1,09
0,98	2,03	0,95	0,20	1,30	0,25	1,41	1,03
0,98	1,52	0,95	0,20	1,30	0,25	1,41	0,98
0,98	1,02	0,95	0,20	1,30	0,25	1,41	1,01
1,02	2,50	0,95	0,20	1,25	0,25	1,39	1,09
1,02	2,00	0,95	0,20	1,25	0,25	1,39	1,03
1,02	1,50	0,95	0,20	1,25	0,25	1,39	0,99
1,02	1,00	0,95	0,20	1,25	0,25	1,39	1,00
1,06	2,50	0,95	0,20	1,20	0,25	1,37	1,06
1,06	2,00	0,95	0,20	1,20	0,25	1,37	1,04
1,06	1,50	0,95	0,20	1,20	0,25	1,37	1,01
1,06	1,00	0,95	0,20	1,20	0,25	1,37	1,00
1,12	2,50	0,95	0,20	1,20	0,25	1,31	0,99
1,12	2,00	0,95	0,20	1,20	0,25	1,31	0,95
1,12	1,50	0,95	0,20	1,20	0,25	1,31	1,03
1,12	1,00	0,95	0,20	1,20	0,25	1,31	1,01
1,19	2,50	0,95	0,20	1,20	0,25	1,20	1,00
1,19	2,00	0,95	0,20	1,20	0,25	1,20	0,92
1,19	1,50	0,95	0,20	1,20	0,25	1,20	1,04
1,19	1,00	0,95	0,20	1,20	0,25	1,20	1,01
1,36	2,50	0,95	0,20	1,20	0,25	1,20	1,01
1,36	2,00	0,95	0,20	1,20	0,25	1,20	1,02
1,36	1,50	0,95	0,20	1,20	0,25	1,20	1,03
1,36	1,00	0,95	0,20	1,20	0,25	1,20	1,04
1,49	2,50	0,95	0,20	1,20	0,25	1,20	1,07
1,49	2,00	0,95	0,20	1,20	0,25	1,20	1,08
1,49	1,50	0,95	0,20	1,20	0,25	1,20	1,08
1,49	1,00	0,95	0,20	1,20	0,25	1,20	1,06
0,27	1,00	0,80	0,10	0,65	0,15	0,80	1,03
0,27	1,50	0,80	0,10	0,65	0,15	0,80	0,97
0,27	2,00	0,80	0,10	0,65	0,15	0,80	0,96
0,27	2,50	0,80	0,10	0,65	0,15	0,80	0,96
0,43	1,00	0,80	0,10	0,68	0,15	0,96	1,03
0,43	1,50	0,80	0,10	0,68	0,15	0,96	1,02
0,43	2,00	0,80	0,10	0,68	0,15	0,96	1,04
0,43	2,50	0,80	0,10	0,68	0,15	0,96	1,05
0,62	1,00	0,80	0,10	0,82	0,15	1,18	1,03
0,62	1,50	0,80	0,10	0,82	0,15	1,18	1,09
0,62	2,00	0,80	0,10	0,82	0,15	1,18	1,09
0,62	2,50	0,80	0,10	0,82	0,15	1,18	1,05
0,78	1,00	0,80	0,11	1,14	0,18	1,34	1,04

Continua na próxima página

$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x.}$	b_f/b_w	$0,38 < b_f/b_w < 0,65$		$0,65 < b_f/b_w < 1,00$		$P_u/P_{prop1-2}$
			A	B	A	B	
0,78	1,50	0,80	0,11	1,14	0,18	1,34	1,10
0,78	2,00	0,80	0,11	1,14	0,18	1,34	1,05
0,78	2,50	0,80	0,11	1,14	0,18	1,34	1,05
0,93	1,00	0,80	0,20	1,32	0,22	1,41	1,05
0,93	1,50	0,80	0,20	1,32	0,22	1,41	1,01
0,93	2,00	0,80	0,20	1,32	0,22	1,41	0,99
0,93	2,50	0,80	0,20	1,32	0,22	1,41	1,05
1,12	1,00	0,80	0,20	1,20	0,25	1,31	1,03
1,12	1,50	0,80	0,20	1,20	0,25	1,31	0,98
1,12	2,00	0,80	0,20	1,20	0,25	1,31	0,98
1,12	2,50	0,80	0,20	1,20	0,25	1,31	0,86
1,19	1,00	0,80	0,20	1,20	0,25	1,20	1,04
1,19	1,50	0,80	0,20	1,20	0,25	1,20	0,98
1,19	2,00	0,80	0,20	1,20	0,25	1,20	0,95
1,19	2,50	0,80	0,20	1,20	0,25	1,20	0,95
0,27	1,00	0,66	0,10	0,65	0,15	0,80	1,04
0,27	1,50	0,66	0,10	0,65	0,15	0,80	1,07
0,27	2,00	0,66	0,10	0,65	0,15	0,80	1,03
0,27	2,50	0,66	0,10	0,65	0,15	0,80	1,02
0,43	1,00	0,66	0,10	0,68	0,15	0,96	1,04
0,43	1,50	0,66	0,10	0,68	0,15	0,96	1,13
0,43	2,00	0,66	0,10	0,68	0,15	0,96	1,13
0,43	2,50	0,66	0,10	0,68	0,15	0,96	1,13
0,51	1,00	0,66	0,10	0,67	0,15	1,05	1,04
0,51	1,50	0,66	0,10	0,67	0,15	1,05	1,15
0,51	2,00	0,66	0,10	0,67	0,15	1,05	1,14
0,51	2,50	0,66	0,10	0,67	0,15	1,05	1,07
0,62	1,00	0,66	0,10	0,83	0,15	1,18	1,04
0,62	1,50	0,66	0,10	0,83	0,15	1,18	1,20
0,62	2,00	0,66	0,10	0,83	0,15	1,18	1,19
0,62	2,50	0,66	0,10	0,83	0,15	1,18	1,12
0,71	1,00	0,66	0,11	1,00	0,17	1,28	1,04
0,71	1,50	0,66	0,11	1,00	0,17	1,28	1,19
0,71	2,00	0,66	0,11	1,00	0,17	1,28	1,08
0,71	2,50	0,66	0,11	1,00	0,17	1,28	1,05
0,78	1,00	0,66	0,11	1,15	0,18	1,34	1,06
0,78	1,50	0,66	0,11	1,15	0,18	1,34	1,19
0,78	2,00	0,66	0,11	1,15	0,18	1,34	1,09
0,78	2,50	0,66	0,11	1,15	0,18	1,34	1,07
0,84	1,00	0,66	0,13	1,25	0,19	1,38	1,05
0,84	1,50	0,66	0,13	1,25	0,19	1,38	1,12
0,84	2,00	0,66	0,13	1,25	0,19	1,38	1,05
0,84	2,50	0,66	0,13	1,25	0,19	1,38	0,95
0,89	1,00	0,66	0,15	1,30	0,20	1,40	1,07

Continúa na próxima página

$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x.}$	b_f/b_w	$0,38 < b_f/b_w < 0,65$		$0,65 < b_f/b_w < 1,00$		$P_u/P_{prop1-2}$
			A	B	A	B	
0,89	1,50	0,66	0,15	1,30	0,20	1,40	1,08
0,89	2,00	0,66	0,15	1,30	0,20	1,40	1,17
0,89	2,50	0,66	0,15	1,30	0,20	1,40	1,23
0,93	1,00	0,66	0,19	1,32	0,22	1,41	1,06
0,93	1,50	0,66	0,19	1,32	0,22	1,41	1,04
0,93	2,00	0,66	0,19	1,32	0,22	1,41	1,03
0,93	2,50	0,66	0,19	1,32	0,22	1,41	1,22
0,96	1,00	0,66	0,20	1,31	0,23	1,41	1,11
0,96	1,50	0,66	0,20	1,31	0,23	1,41	1,11
0,96	2,00	0,66	0,20	1,31	0,23	1,41	1,19
0,96	2,50	0,66	0,20	1,31	0,23	1,41	1,24
1,02	1,00	0,66	0,20	1,25	0,25	1,39	1,03
1,02	1,50	0,66	0,20	1,25	0,25	1,39	1,07
1,02	2,00	0,66	0,20	1,25	0,25	1,39	1,13
1,02	2,50	0,66	0,20	1,25	0,25	1,39	1,16
1,07	1,00	0,66	0,20	1,20	0,25	1,36	1,14
1,07	1,50	0,66	0,20	1,20	0,25	1,36	1,10
1,07	2,00	0,66	0,20	1,20	0,25	1,36	1,16
1,07	2,50	0,66	0,20	1,20	0,25	1,36	1,20
1,12	1,00	0,66	0,20	1,20	0,25	1,31	1,06
1,12	1,50	0,66	0,20	1,20	0,25	1,31	1,07
1,12	2,00	0,66	0,20	1,20	0,25	1,31	1,13
1,12	2,50	0,66	0,20	1,20	0,25	1,31	1,13
1,19	1,00	0,66	0,20	1,20	0,25	1,21	1,08
1,19	1,50	0,66	0,20	1,20	0,25	1,21	1,10
1,19	2,00	0,66	0,20	1,20	0,25	1,20	1,10
1,19	2,50	0,66	0,20	1,20	0,25	1,20	1,09
1,26	1,00	0,66	0,20	1,20	0,25	1,20	1,08
1,26	1,50	0,66	0,20	1,20	0,25	1,20	1,10
1,26	2,00	0,66	0,20	1,20	0,25	1,20	1,12
1,26	2,50	0,66	0,20	1,20	0,25	1,20	1,09
0,27	1,00	0,52	0,10	0,65	0,15	0,80	0,98
0,27	1,50	0,52	0,10	0,65	0,15	0,80	1,07
0,27	2,00	0,52	0,10	0,65	0,15	0,80	1,05
0,27	2,50	0,52	0,10	0,65	0,15	0,80	0,89
0,43	1,00	0,52	0,10	0,67	0,15	0,96	0,98
0,43	1,50	0,52	0,10	0,67	0,15	0,96	1,07
0,43	2,00	0,52	0,10	0,67	0,15	0,96	1,06
0,43	2,50	0,52	0,10	0,67	0,15	0,96	0,94
0,55	1,00	0,52	0,10	0,71	0,15	1,10	0,98
0,55	1,50	0,52	0,10	0,71	0,15	1,10	1,06
0,55	2,00	0,52	0,10	0,71	0,15	1,10	1,01
0,55	2,50	0,52	0,10	0,71	0,15	1,10	0,88
0,62	1,00	0,52	0,10	0,82	0,15	1,18	0,98

Continua na próxima página

$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x.}$	b_f/b_w	$0,38 < b_f/b_w < 0,65$		$0,65 < b_f/b_w < 1,00$		$P_u/P_{prop1-2}$
			A	B	A	B	
0,62	1,50	0,52	0,10	0,82	0,15	1,18	1,09
0,62	2,00	0,52	0,10	0,82	0,15	1,18	1,03
0,62	2,50	0,52	0,10	0,82	0,15	1,18	0,88
0,70	1,00	0,52	0,11	0,97	0,16	1,26	0,98
0,70	1,50	0,52	0,11	0,97	0,16	1,26	1,09
0,70	2,00	0,52	0,11	0,97	0,16	1,26	1,03
0,70	2,50	0,52	0,11	0,97	0,16	1,26	0,97
0,78	1,00	0,52	0,11	1,14	0,18	1,34	0,98
0,78	1,50	0,52	0,11	1,14	0,18	1,34	1,08
0,78	2,00	0,52	0,11	1,14	0,18	1,34	1,01
0,78	2,50	0,52	0,11	1,14	0,18	1,34	0,97
0,86	1,00	0,52	0,14	1,27	0,19	1,39	0,99
0,86	1,50	0,52	0,14	1,27	0,19	1,39	1,05
0,86	2,00	0,52	0,14	1,27	0,19	1,39	1,00
0,86	2,50	0,52	0,14	1,27	0,19	1,39	1,01
0,89	1,00	0,52	0,16	1,30	0,20	1,40	0,99
0,89	1,50	0,52	0,16	1,30	0,20	1,40	0,99
0,89	2,00	0,52	0,16	1,30	0,20	1,40	0,91
0,89	2,50	0,52	0,16	1,30	0,20	1,40	0,89
0,93	1,00	0,52	0,19	1,32	0,22	1,41	1,00
0,93	1,50	0,52	0,19	1,32	0,22	1,41	1,06
0,93	2,00	0,52	0,19	1,32	0,22	1,41	0,97
0,93	2,50	0,52	0,19	1,32	0,22	1,41	1,10
1,04	1,00	0,52	0,20	1,22	0,25	1,38	0,96
1,04	1,50	0,52	0,20	1,22	0,25	1,38	1,00
1,04	2,00	0,52	0,20	1,22	0,25	1,38	1,01
1,04	2,50	0,52	0,20	1,22	0,25	1,38	0,95
1,12	1,00	0,52	0,20	1,20	0,25	1,30	0,99
1,12	1,50	0,52	0,20	1,20	0,25	1,30	1,01
1,12	2,00	0,52	0,20	1,20	0,25	1,30	1,02
1,12	2,50	0,52	0,20	1,20	0,25	1,30	0,92
1,19	1,00	0,52	0,20	1,20	0,25	1,20	0,98
1,19	1,50	0,52	0,20	1,20	0,25	1,20	1,01
1,19	2,00	0,52	0,20	1,20	0,25	1,20	1,02
1,19	2,50	0,52	0,20	1,20	0,25	1,20	0,89
0,27	1,00	0,38	0,10	0,65	0,15	0,80	0,97
0,27	1,50	0,38	0,10	0,65	0,15	0,80	1,07
0,27	2,00	0,38	0,10	0,65	0,15	0,80	1,16
0,27	2,50	0,38	0,10	0,65	0,15	0,80	1,18
0,43	1,00	0,38	0,10	0,65	0,15	0,95	0,97
0,43	1,50	0,38	0,10	0,65	0,15	0,95	1,06
0,43	2,00	0,38	0,10	0,65	0,15	0,95	1,15
0,43	2,50	0,38	0,10	0,65	0,15	0,95	1,17
0,62	1,00	0,38	0,10	0,81	0,15	1,18	0,96

Continúa na próxima página

$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x.}$	b_f/b_w	$0,38 < b_f/b_w < 0,65$		$0,65 < b_f/b_w < 1,00$		$P_u/P_{prop1-2}$
			A	B	A	B	
0,62	1,50	0,38	0,10	0,81	0,15	1,18	1,09
0,62	2,00	0,38	0,10	0,81	0,15	1,18	1,08
0,62	2,50	0,38	0,10	0,81	0,15	1,18	0,98
0,78	1,00	0,38	0,12	1,15	0,18	1,34	0,94
0,78	1,50	0,38	0,12	1,15	0,18	1,34	1,06
0,78	2,00	0,38	0,12	1,15	0,18	1,34	1,03
0,78	2,50	0,38	0,12	1,15	0,18	1,34	0,91
0,93	1,00	0,38	0,19	1,32	0,22	1,41	0,94
0,93	1,50	0,38	0,19	1,32	0,22	1,41	1,02
0,93	2,00	0,38	0,19	1,32	0,22	1,41	1,06
0,93	2,50	0,38	0,19	1,32	0,22	1,41	0,97

Tabela A.5 - Relação entre as cargas últimas experimentais ($P_{uexp.}$) e $P_{prop1-2}$. dado pela Equação 25.

AUTOR	$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x.}$	b_f/b_w	$\lambda_{m\acute{i}nLD-G}$	$P_{uexp.}/P_{prop1-2}$
1-YOUNG et al. (2013)	0,78	2,39	0,78	0,65	0,88
2-YOUNG et al. (2013)	0,80	2,28	0,81	0,68	0,87
3-YOUNG et al. (2013)	0,79	2,14	0,85	0,76	0,82
4-YOUNG et al. (2013)	0,74	3,13	0,86	0,22	0,98
5-YOUNG et al. (2013)	0,70	3,12	0,86	0,24	0,98
6-YOUNG et al. (2013)	0,73	3,29	0,91	0,21	1,00
7-YOUNG et al. (2013)	0,74	1,67	0,74	0,42	1,05
8-YOUNG et al. (2013)	0,71	1,79	0,69	0,39	1,04
9-YOUNG et al. (2013)	0,71	1,77	0,69	0,39	1,02
10-YOUNG et al. (2013)	0,72	3,32	0,95	0,20	0,98
11-YOUNG et al. (2013)	0,66	3,36	0,94	0,21	0,96
12-YOUNG et al. (2013)	0,61	1,72	0,62	0,24	0,83
13-YOUNG et al. (2013)	0,58	1,73	0,62	0,25	0,83
14-YOUNG et al. (2013)	0,63	1,71	0,67	0,23	0,94
15-YOUNG et al. (2013)	0,69	2,26	0,68	0,23	0,96
16-YOUNG et al. (2013)	0,65	2,28	0,68	0,24	0,95
17-YOUNG et al. (2013)	0,79	1,11	0,89	0,66	0,91
18-YOUNG et al. (2013)	0,75	1,12	0,90	0,67	0,95
19-YOUNG et al. (2013)	0,81	1,06	1,00	0,83	0,93
20-YOUNG et al. (2013)	0,70	0,94	0,45	0,48	0,88
21-YOUNG et al. (2013)	0,70	0,96	0,49	0,45	0,88
22-YOUNG et al. (2013)	0,72	0,93	0,52	0,47	0,85
23-YOUNG et al. (2013)	0,87	1,06	0,81	0,45	0,95
24-YOUNG et al. (2013)	0,74	1,09	0,75	0,48	0,92
25-YOUNG et al. (2013)	0,71	1,09	0,76	0,49	0,93
26-YOUNG et al. (2013)	0,98	0,87	0,99	0,85	0,83
1-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	0,77	1,61	0,50	0,51	1,06
2-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	0,82	1,56	0,51	0,74	1,03
1-SALLES (2017)	1,12	2,26	1,00	0,56	0,85
1-YOUNG E HANCOCK (1992)	1,23	3,32	0,75	0,15	1,12
2-YOUNG E HANCOCK (1992)	1,04	2,81	0,75	0,15	1,11
3-YOUNG E HANCOCK (1992)	1,04	2,75	0,74	0,07	1,09
4-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,90	2,68	0,74	0,12	1,11
5-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,96	2,68	0,74	0,15	1,15
1-LOUGHLAN et al. (2012)	0,55	2,61	0,35	0,32	0,92
2-LOUGHLAN et al. (2012)	0,55	2,66	0,35	0,28	1,01
3-LOUGHLAN et al. (2012)	0,51	2,69	0,35	0,26	0,98
4-LOUGHLAN et al. (2012)	0,49	2,70	0,35	0,23	0,98
5-LOUGHLAN et al. (2012)	0,48	2,67	0,35	0,20	0,98
6-LOUGHLAN et al. (2012)	0,62	2,22	0,37	0,38	1,06
7-LOUGHLAN et al. (2012)	0,60	2,23	0,37	0,35	1,01

Continua na próxima página

AUTOR	$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{\text{máx.}}$	b_f/b_w	$\lambda_{\text{mínLD-G}}$	$P_{\text{uexp.}}/P_{\text{prop1-2}}$
8-LOUGHLAN et al. (2012)	0,58	2,25	0,37	0,31	1,01
9-LOUGHLAN et al. (2012)	0,55	2,29	0,37	0,28	0,93
10-LOUGHLAN et al. (2012)	0,52	2,27	0,38	0,25	0,96
11-LOUGHLAN et al. (2012)	0,67	1,84	0,39	0,50	1,10
12-LOUGHLAN et al. (2012)	0,70	1,85	0,39	0,42	1,07
13-LOUGHLAN et al. (2012)	0,65	1,88	0,39	0,39	1,11
14-LOUGHLAN et al. (2012)	0,64	1,89	0,39	0,34	1,13
15-LOUGHLAN et al. (2012)	0,62	1,92	0,39	0,29	1,10
16-LOUGHLAN et al. (2012)	0,75	1,50	0,62	0,56	0,97
17-LOUGHLAN et al. (2012)	0,74	1,49	0,63	0,51	1,06
18-LOUGHLAN et al. (2012)	0,72	1,50	0,63	0,45	0,97
19-LOUGHLAN et al. (2012)	0,68	1,52	0,63	0,41	1,04
20-LOUGHLAN et al. (2012)	0,63	1,54	0,63	0,36	0,91

Tabela A.6 - Relação entre as cargas últimas numéricas (P_u) e P_{prop3} . dado pela Equação

26.

$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x}$	b_f/b_w	A	B	FATOR	$P_{prop3}(N)$	P_u/P_{prop3}
0,27	2,50	0,95	0,15	0,80	0,45	7795,9	0,92
0,27	2,00	0,95	0,15	0,80	0,52	5879,0	0,92
0,27	1,50	0,95	0,15	0,80	0,64	4067,2	0,92
0,27	1,00	0,95	0,15	0,80	0,85	2391,1	0,99
0,43	2,50	0,95	0,15	0,80	0,45	36096,1	0,87
0,43	2,00	0,95	0,15	0,80	0,52	27289,2	0,90
0,43	1,50	0,95	0,15	0,80	0,64	18802,6	0,91
0,43	1,00	0,95	0,15	0,80	0,85	10960,1	0,99
0,53	2,50	0,95	0,15	0,90	0,41	65239,8	0,85
0,53	2,00	0,95	0,15	0,90	0,49	50227,0	0,92
0,53	1,50	0,95	0,15	0,90	0,62	35591,8	0,94
0,53	1,00	0,95	0,15	0,90	0,85	21619,8	0,98
0,62	2,50	0,95	0,15	1,02	0,37	100695,2	0,86
0,62	2,00	0,95	0,15	1,02	0,45	79994,1	0,93
0,62	1,50	0,95	0,15	1,02	0,59	58697,7	0,96
0,62	1,00	0,95	0,15	1,02	0,85	37425,9	0,98
0,70	2,50	0,95	0,15	1,13	0,34	145603,1	0,88
0,70	2,00	0,95	0,15	1,13	0,43	118099,0	0,90
0,70	1,50	0,95	0,15	1,13	0,57	89637,1	0,97
0,70	1,00	0,95	0,15	1,13	0,85	58951,0	0,97
0,78	2,50	0,95	0,15	1,22	0,31	202052,7	0,90
0,78	2,00	0,95	0,15	1,22	0,40	166658,5	0,91
0,78	1,50	0,95	0,15	1,22	0,56	129055,7	0,96
0,78	1,00	0,95	0,15	1,22	0,85	88350,3	0,96
0,84	2,50	0,95	0,15	1,26	0,30	259528,6	0,95
0,84	2,00	0,95	0,15	1,26	0,39	216393,1	0,89
0,84	1,50	0,95	0,15	1,26	0,55	169707,2	0,93
0,84	1,00	0,95	0,15	1,26	0,85	117345,6	0,95
0,86	2,50	0,95	0,15	1,27	0,30	295073,4	0,91
0,86	2,00	0,95	0,15	1,27	0,39	246829,3	0,88
0,86	1,50	0,95	0,15	1,27	0,55	193176,3	0,91
0,86	1,00	0,95	0,15	1,27	0,85	134572,6	0,94
0,89	2,50	0,95	0,15	1,27	0,30	331668,3	0,91
0,89	2,00	0,95	0,15	1,27	0,39	277735,7	0,87
0,89	1,50	0,95	0,15	1,27	0,54	218611,4	0,90
0,89	1,00	0,95	0,15	1,27	0,85	152743,1	0,95
0,93	2,50	0,95	0,18	1,27	0,29	410326,2	0,90
0,93	2,00	0,95	0,18	1,27	0,38	341729,6	0,85
0,93	1,50	0,95	0,18	1,27	0,53	267348,1	0,86
0,93	1,00	0,95	0,18	1,27	0,82	182795,9	0,95
0,95	2,50	0,95	0,19	1,27	0,29	445493,4	0,97
0,95	2,00	0,95	0,19	1,27	0,38	369656,4	0,92
0,95	1,50	0,95	0,19	1,27	0,53	287413,4	0,89

Continua na próxima página

$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x}$	b_f/b_w	A	B	FATOR	$P_{prop3}(N)$	P_u/P_{prop3}
0,95	1,00	0,95	0,19	1,27	0,81	195278,6	0,96
0,98	2,54	0,95	0,21	1,25	0,29	535881,1	0,94
0,98	2,03	0,95	0,21	1,25	0,38	442924,2	0,92
0,98	1,52	0,95	0,21	1,25	0,52	342431,8	0,90
0,98	1,02	0,95	0,21	1,25	0,78	230270,2	0,96
1,02	2,50	0,95	0,24	1,23	0,30	626683,2	0,94
1,02	2,00	0,95	0,24	1,23	0,38	513238,4	0,92
1,02	1,50	0,95	0,24	1,23	0,52	391454,4	0,93
1,02	1,00	0,95	0,24	1,23	0,76	255190,8	0,98
1,06	2,50	0,95	0,25	1,20	0,31	717373,9	0,93
1,06	2,00	0,95	0,25	1,20	0,39	583784,0	0,94
1,06	1,50	0,95	0,25	1,20	0,52	439424,5	0,96
1,06	1,00	0,95	0,25	1,20	0,75	282633,3	1,00
1,12	2,50	0,95	0,25	1,20	0,31	852130,3	0,91
1,12	2,00	0,95	0,25	1,20	0,39	693795,3	0,89
1,12	1,50	0,95	0,25	1,20	0,52	524327,4	0,99
1,12	1,00	0,95	0,25	1,20	0,75	336596,5	1,01
1,19	2,50	0,95	0,25	1,20	0,31	1117711,7	1,00
1,19	2,00	0,95	0,25	1,20	0,39	906888,6	0,92
1,19	1,50	0,95	0,25	1,20	0,52	685324,4	1,04
1,19	1,00	0,95	0,25	1,20	0,75	440944,2	1,01
1,36	2,50	0,95	0,25	1,20	0,30	2239752,4	1,01
1,36	2,00	0,95	0,25	1,20	0,39	1819396,0	1,02
1,36	1,50	0,95	0,25	1,20	0,52	1368028,5	1,03
1,36	1,00	0,95	0,25	1,20	0,75	879444,4	1,04
1,49	2,50	0,95	0,25	1,20	0,31	3067461,3	1,07
1,49	2,00	0,95	0,25	1,20	0,39	2498437,6	1,08
1,49	1,50	0,95	0,25	1,20	0,52	1880817,6	1,08
1,49	1,00	0,95	0,25	1,20	0,75	1207625,4	1,06
0,27	1,00	0,80	0,15	0,80	0,85	2431,7	1,03
0,27	1,50	0,80	0,15	0,80	0,64	4132,6	0,97
0,27	2,00	0,80	0,15	0,80	0,52	6000,9	0,96
0,27	2,50	0,80	0,15	0,80	0,45	7915,8	0,96
0,43	1,00	0,80	0,15	0,80	0,85	10813,3	1,03
0,43	1,50	0,80	0,15	0,80	0,64	18537,5	0,96
0,43	2,00	0,80	0,15	0,80	0,52	26894,9	0,94
0,43	2,50	0,80	0,15	0,80	0,45	35717,0	0,91
0,62	1,00	0,80	0,15	1,02	0,85	38831,6	1,03
0,62	1,50	0,80	0,15	1,02	0,59	61747,5	1,03
0,62	2,00	0,80	0,15	1,02	0,46	84682,7	0,99
0,62	2,50	0,80	0,15	1,02	0,37	107127,0	0,91
0,78	1,00	0,80	0,15	1,22	0,85	100518,0	1,01
0,78	1,50	0,80	0,15	1,22	0,56	148226,0	1,03
0,78	2,00	0,80	0,15	1,22	0,40	190777,6	0,96
0,78	2,50	0,80	0,15	1,22	0,31	230241,1	0,94

Continua na próxima página

$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x}$	b_f/b_w	A	B	FATOR	$P_{prop3}(N)$	P_u/P_{prop3}
0,93	1,00	0,80	0,18	1,27	0,82	223878,7	1,01
0,93	1,50	0,80	0,18	1,27	0,53	329399,5	0,94
0,93	2,00	0,80	0,18	1,27	0,38	420806,6	0,89
0,93	2,50	0,80	0,18	1,27	0,29	505672,4	0,93
1,12	1,00	0,80	0,25	1,20	0,75	541394,7	1,03
1,12	1,50	0,80	0,25	1,20	0,52	848670,8	0,95
1,12	2,00	0,80	0,25	1,20	0,39	1131827,5	0,92
1,12	2,50	0,80	0,25	1,20	0,31	1391660,7	0,78
1,19	1,00	0,80	0,25	1,20	0,75	703101,0	1,04
1,19	1,50	0,80	0,25	1,20	0,52	1102301,7	0,98
1,19	2,00	0,80	0,25	1,20	0,39	1461614,8	0,95
1,19	2,50	0,80	0,25	1,20	0,31	1789881,6	0,95
0,27	1,00	0,66	0,15	0,80	0,85	2298,0	1,04
0,27	1,50	0,66	0,15	0,80	0,65	3921,0	1,07
0,27	2,00	0,66	0,15	0,80	0,53	5676,3	1,03
0,27	2,50	0,66	0,15	0,80	0,45	7533,6	1,02
0,43	1,00	0,66	0,15	0,80	0,85	11310,2	1,04
0,43	1,50	0,66	0,15	0,80	0,65	19215,5	1,07
0,43	2,00	0,66	0,15	0,80	0,52	27935,0	1,02
0,43	2,50	0,66	0,15	0,80	0,45	37020,0	0,98
0,51	1,00	0,66	0,15	0,87	0,85	48628,6	1,04
0,51	1,50	0,66	0,15	0,87	0,63	80570,8	1,07
0,51	2,00	0,66	0,15	0,87	0,50	113849,9	1,02
0,51	2,50	0,66	0,15	0,87	0,42	149074,8	0,92
0,62	1,00	0,66	0,15	1,03	0,85	47985,2	1,04
0,62	1,50	0,66	0,15	1,03	0,59	75187,2	1,14
0,62	2,00	0,66	0,15	1,03	0,45	102261,6	1,08
0,62	2,50	0,66	0,15	1,03	0,37	129181,9	0,98
0,71	1,00	0,66	0,15	1,15	0,85	168322,7	1,02
0,71	1,50	0,66	0,15	1,15	0,57	253998,6	1,12
0,71	2,00	0,66	0,15	1,15	0,42	333634,6	0,99
0,71	2,50	0,66	0,15	1,15	0,33	410148,2	0,93
0,78	1,00	0,66	0,15	1,22	0,85	146702,1	1,02
0,78	1,50	0,66	0,15	1,22	0,55	216179,2	1,12
0,78	2,00	0,66	0,15	1,22	0,40	278588,0	1,00
0,78	2,50	0,66	0,15	1,22	0,31	336576,2	0,95
0,84	1,00	0,66	0,15	1,26	0,85	353653,3	1,00
0,84	1,50	0,66	0,15	1,26	0,55	509683,2	1,04
0,84	2,00	0,66	0,15	1,26	0,39	648868,9	0,96
0,84	2,50	0,66	0,15	1,26	0,30	778482,2	0,85
0,89	1,00	0,66	0,15	1,27	0,85	459050,2	1,00
0,89	1,50	0,66	0,15	1,27	0,54	662891,7	1,00
0,89	2,00	0,66	0,15	1,27	0,39	842286,2	1,05
0,89	2,50	0,66	0,15	1,27	0,30	1009020,1	1,08
0,93	1,00	0,66	0,18	1,27	0,82	440145,4	1,01
0,93	1,50	0,66	0,18	1,27	0,53	644229,1	0,97

Continua na próxima página

$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x}$	b_f/b_w	A	B	FATOR	$P_{prop3}(N)$	P_u/P_{prop3}
0,93	2,00	0,66	0,18	1,27	0,38	824141,8	0,93
0,93	2,50	0,66	0,18	1,27	0,29	1227900,4	1,07
0,96	1,00	0,66	0,19	1,26	0,81	433123,1	1,06
0,96	1,50	0,66	0,19	1,26	0,53	645026,7	1,03
0,96	2,00	0,66	0,19	1,26	0,38	831067,6	1,07
0,96	2,50	0,66	0,19	1,26	0,30	1005731,7	1,08
1,02	1,00	0,66	0,23	1,23	0,76	854237,2	1,01
1,02	1,50	0,66	0,23	1,23	0,52	1307711,2	1,00
1,02	2,00	0,66	0,23	1,23	0,38	1710709,0	1,01
1,02	2,50	0,66	0,23	1,23	0,30	2091172,5	1,00
1,07	1,00	0,66	0,25	1,20	0,75	404420,4	1,14
1,07	1,50	0,66	0,25	1,20	0,52	633986,6	1,04
1,07	2,00	0,66	0,25	1,20	0,39	841512,9	1,05
1,07	2,50	0,66	0,25	1,20	0,31	1041118,4	1,05
1,12	1,00	0,66	0,25	1,20	0,75	1325487,9	1,06
1,12	1,50	0,66	0,25	1,20	0,52	2082492,6	1,03
1,12	2,00	0,66	0,25	1,20	0,39	3434725,5	1,06
1,12	2,50	0,66	0,25	1,20	0,31	4216831,7	1,03
1,19	1,00	0,66	0,25	1,20	0,75	1955900,3	1,08
1,19	1,50	0,66	0,25	1,20	0,52	3029032,6	1,10
1,19	2,00	0,66	0,25	1,20	0,39	4584278,9	1,10
1,19	2,50	0,66	0,25	1,20	0,31	5630221,9	1,09
1,26	1,00	0,66	0,25	1,20	0,75	3822025,8	1,08
1,26	1,50	0,66	0,25	1,20	0,52	5987448,6	1,10
1,26	2,00	0,66	0,25	1,20	0,39	7910733,3	1,12
1,26	2,50	0,66	0,25	1,20	0,31	9751370,2	1,09
0,27	1,00	0,52	0,15	0,80	0,85	2122,6	1,04
0,27	1,50	0,52	0,15	0,80	0,64	3598,3	1,18
0,27	2,00	0,52	0,15	0,80	0,52	5214,0	1,20
0,27	2,50	0,52	0,15	0,80	0,45	6917,6	1,04
0,43	1,00	0,52	0,15	0,80	0,85	12624,2	1,04
0,43	1,50	0,52	0,15	0,80	0,64	21644,7	1,17
0,43	2,00	0,52	0,15	0,80	0,53	31184,6	1,19
0,43	2,50	0,52	0,15	0,80	0,45	41458,6	1,07
0,55	1,00	0,52	0,15	0,92	0,85	67559,2	1,03
0,55	1,50	0,52	0,15	0,92	0,62	110655,7	1,19
0,55	2,00	0,52	0,15	0,92	0,49	154958,9	1,19
0,55	2,50	0,52	0,15	0,92	0,40	200390,9	1,08
0,62	1,00	0,52	0,15	1,02	0,85	69743,4	1,03
0,62	1,50	0,52	0,15	1,02	0,60	109581,4	1,22
0,62	2,00	0,52	0,15	1,02	0,46	149747,8	1,21
0,62	2,50	0,52	0,15	1,02	0,37	189267,9	1,08
0,70	1,00	0,52	0,15	1,13	0,85	193527,3	1,02
0,70	1,50	0,52	0,15	1,13	0,57	294924,2	1,19
0,70	2,00	0,52	0,15	1,13	0,43	390908,2	1,16
0,70	2,50	0,52	0,15	1,13	0,34	482321,6	1,12

Continua na próxima página

$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{m\acute{a}x}$	b_f/b_w	A	B	FATOR	$P_{prop3}(N)$	P_u/P_{prop3}
0,78	1,00	0,52	0,15	1,22	0,85	355787,9	1,02
0,78	1,50	0,52	0,15	1,22	0,56	520530,6	1,14
0,78	2,00	0,52	0,15	1,22	0,40	672700,4	1,08
0,78	2,50	0,52	0,15	1,22	0,31	815983,5	1,05
0,86	1,00	0,52	0,15	1,27	0,85	679103,7	1,00
0,86	1,50	0,52	0,15	1,27	0,54	982759,9	1,06
0,86	2,00	0,52	0,15	1,27	0,39	1249104,3	1,00
0,86	2,50	0,52	0,15	1,27	0,30	1496149,7	1,01
0,89	1,00	0,52	0,15	1,27	0,85	901557,3	0,98
0,89	1,50	0,52	0,15	1,27	0,54	1296889,0	0,98
0,89	2,00	0,52	0,15	1,27	0,39	1643726,7	0,89
0,89	2,50	0,52	0,15	1,27	0,30	1968893,2	0,87
0,93	1,00	0,52	0,18	1,27	0,82	1192702,9	0,98
0,93	1,50	0,52	0,18	1,27	0,53	1750739,4	1,03
0,93	2,00	0,52	0,18	1,27	0,38	2399021,8	0,94
0,93	2,50	0,52	0,18	1,27	0,29	3836535,2	1,05
1,04	1,00	0,52	0,25	1,21	0,75	2856316,8	1,03
1,04	1,50	0,52	0,25	1,21	0,52	4477065,8	1,03
1,04	2,00	0,52	0,25	1,21	0,38	5916412,1	1,03
1,04	2,50	0,52	0,25	1,21	0,30	7246224,9	0,96
1,12	1,00	0,52	0,25	1,20	0,75	4924133,2	1,05
1,12	1,50	0,52	0,25	1,20	0,52	7666497,3	1,05
1,12	2,00	0,52	0,25	1,20	0,39	10139907,4	1,05
1,12	2,50	0,52	0,25	1,20	0,31	12450120,1	0,94
1,19	1,00	0,52	0,25	1,20	0,75	8810104,6	1,05
1,19	1,50	0,52	0,25	1,20	0,52	13772245,3	1,05
1,19	2,00	0,52	0,25	1,20	0,39	18235981,1	1,04
1,19	2,50	0,52	0,25	1,20	0,31	22435718,2	0,91
0,27	1,00	0,38	0,15	0,80	0,85	1716,2	1,03
0,27	1,50	0,38	0,15	0,80	0,64	2928,2	1,18
0,27	2,00	0,38	0,15	0,80	0,53	4223,5	1,32
0,27	2,50	0,38	0,15	0,80	0,45	5625,8	1,38
0,43	1,00	0,38	0,15	0,80	0,85	13352,9	1,03
0,43	1,50	0,38	0,15	0,80	0,64	22855,4	1,17
0,43	2,00	0,38	0,15	0,80	0,53	32983,3	1,30
0,43	2,50	0,38	0,15	0,80	0,45	43823,8	1,36
0,62	1,00	0,38	0,15	1,02	0,85	93390,5	1,02
0,62	1,50	0,38	0,15	1,02	0,60	147796,2	1,22
0,62	2,00	0,38	0,15	1,02	0,46	201155,7	1,27
0,62	2,50	0,38	0,15	1,02	0,37	254653,2	1,19
0,78	1,00	0,38	0,15	1,22	0,85	817408,7	0,98
0,78	1,50	0,38	0,15	1,22	0,55	1200038,5	1,11
0,78	2,00	0,38	0,15	1,22	0,40	1558752,6	1,10
0,78	2,50	0,38	0,15	1,22	0,31	1883235,0	0,98
0,93	1,00	0,38	0,18	1,27	0,82	3219382,7	0,93
0,93	1,50	0,38	0,18	1,27	0,53	4709423,9	1,00

Continua na próxima página

$R_{\lambda DL}$	$\lambda_{\text{máx}}$	b_f/b_w	A	B	FATOR	$P_{\text{prop3}}(N)$	P_u/P_{prop3}
0,93	2,00	0,38	0,18	1,27	0,38	6023047,9	1,03
0,93	2,50	0,38	0,18	1,27	0,30	7211907,7	0,93

Tabela A.7 - Relação entre as cargas últimas experimentais (P_u) e P_{prop3} dado pela

Equação 26.

AUTOR	A	B	FATOR	$P_{\lambda DL}*(N)$	$\lambda_{\min LD-G}$	$P_{uexp.}/P_{prop3}$
1-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,22	0,33	50364,0	0,65	0,79
2-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,24	0,34	53567,7	0,68	0,79
3-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,23	0,37	56170,4	0,76	0,75
4-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,18	0,25	79846,3	0,22	0,85
5-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,14	0,26	84441,0	0,24	0,84
6-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,17	0,24	78843,8	0,21	0,86
7-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,18	0,50	110984,8	0,42	0,98
8-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,15	0,47	106726,8	0,39	0,96
9-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,14	0,48	109238,4	0,39	0,95
10-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,16	0,24	110036,3	0,20	0,84
11-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,08	0,26	116992,9	0,21	0,81
12-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,01	0,53	152796,5	0,24	0,95
13-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	0,97	0,54	153740,0	0,25	0,95
14-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,03	0,53	162777,8	0,23	0,88
15-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,12	0,38	150523,0	0,23	0,86
16-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,07	0,39	154981,5	0,24	0,85
17-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,23	0,77	188363,9	0,66	0,87
18-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,20	0,76	186763,7	0,67	0,91
19-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,24	0,80	196026,8	0,83	0,89
20-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,13	0,90	270955,8	0,48	0,92
21-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,13	0,88	278542,2	0,45	0,92
22-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,15	0,91	286574,8	0,47	0,89
23-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,27	0,80	331214,3	0,45	0,90
24-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,18	0,78	335263,1	0,48	0,89
25-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,15	1,14	0,79	340920,1	0,49	0,91
26-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,20	1,25	0,90	269136,9	0,85	0,79
1-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	0,15	1,21	0,52	91224,3	0,51	1,12
2-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	0,15	1,25	0,53	92666,0	0,74	1,06
1-SALLES (2017)	0,25	1,20	0,34	42525,6	0,56	0,79
1-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,25	1,20	0,22	44058,3	0,15	1,12
2-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,26	1,21	0,27	52916,8	0,15	0,94
3-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,26	1,21	0,27	55282,9	0,07	0,93
4-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,15	1,27	0,27	55342,6	0,12	0,97
5-YOUNG E HANCOCK (1992)	0,19	1,26	0,27	55394,0	0,15	1,00
1-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	0,93	0,38	25318,7	0,32	1,14
2-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	0,92	0,38	25106,9	0,28	1,25
3-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	0,87	0,39	26042,9	0,26	1,20
4-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	0,85	0,40	26523,2	0,23	1,20
5-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	0,84	0,41	26955,0	0,20	1,18
6-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,03	0,41	23631,3	0,38	1,26
7-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,00	0,42	24108,5	0,35	1,22
8-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	0,96	0,43	24555,6	0,31	1,22
9-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	0,93	0,43	24881,2	0,28	1,13

Continua na próxima página

AUTOR	A	B	FATOR	$P_{\lambda DL}*(N)$	$\lambda_{\min LD-G}$	P_{uexp}/P_{prop3}
10-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	0,89	0,45	25703,3	0,25	1,15
11-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,09	0,48	23372,7	0,50	1,25
12-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,13	0,46	22500,1	0,42	1,19
13-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,06	0,47	23386,6	0,39	1,28
14-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,05	0,47	23066,3	0,34	1,30
15-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,02	0,47	23224,2	0,29	1,28
16-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,19	0,56	28198,6	0,56	1,03
17-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,18	0,56	28393,0	0,51	1,14
18-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,16	0,56	28373,9	0,45	1,05
19-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,11	0,57	28634,1	0,41	1,14
20-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	0,15	1,03	0,58	29057,0	0,36	1,03

Tabela A.8 - Relação entre as cargas últimas numéricas (P_u) e as formulações $P_{prop1-2}$ e P_{prop3} com a variação D/b_w

$R_{\lambda DL}$	b_f/b_w	D/b_w	$P_{prop1-2}$			P_{prop3}		
			A	B	$P_u/P_{prop1-2}$	A	B	P_u/P_{prop3}
0,27	0,95	0,09	0,15	0,81	0,99	0,15	0,80	0,99
0,27	0,95	0,09	0,15	0,81	0,92	0,15	0,80	0,92
0,27	0,95	0,09	0,15	0,81	0,92	0,15	0,80	0,92
0,27	0,95	0,09	0,15	0,81	0,92	0,15	0,80	0,92
0,43	0,95	0,09	0,15	0,96	0,99	0,15	0,80	0,99
0,43	0,95	0,09	0,15	0,96	0,97	0,15	0,80	0,91
0,43	0,95	0,09	0,15	0,96	1,00	0,15	0,80	0,90
0,43	0,95	0,09	0,15	0,96	1,00	0,15	0,80	0,87
0,62	0,95	0,09	0,14	1,18	0,97	0,15	1,02	0,98
0,62	0,95	0,09	0,14	1,18	1,01	0,15	1,02	0,96
0,62	0,95	0,09	0,14	1,18	1,02	0,15	1,02	0,93
0,62	0,95	0,09	0,14	1,18	0,98	0,15	1,02	0,86
0,78	0,95	0,09	0,17	1,33	0,98	0,15	1,22	0,96
0,78	0,95	0,09	0,17	1,33	1,01	0,15	1,22	0,96
0,78	0,95	0,09	0,17	1,33	0,98	0,15	1,22	0,91
0,78	0,95	0,09	0,17	1,33	1,00	0,15	1,22	0,90
0,93	0,95	0,09	0,21	1,40	0,98	0,18	1,27	0,95
0,93	0,95	0,09	0,21	1,40	0,91	0,18	1,27	0,86
0,93	0,95	0,09	0,21	1,40	0,94	0,18	1,27	0,85
0,93	0,95	0,09	0,21	1,40	1,01	0,18	1,27	0,90
1,12	0,95	0,09	0,25	1,31	1,01	0,25	1,20	1,01
1,12	0,95	0,09	0,25	1,31	1,03	0,25	1,20	0,99
1,12	0,95	0,09	0,25	1,31	0,95	0,25	1,20	0,89
1,12	0,95	0,09	0,25	1,31	0,99	0,25	1,20	0,91
1,19	0,95	0,09	0,25	1,20	1,01	0,25	1,20	1,01
1,19	0,95	0,09	0,25	1,20	1,03	0,25	1,20	1,04
1,19	0,95	0,09	0,25	1,20	0,92	0,25	1,20	0,92
1,19	0,95	0,09	0,25	1,20	1,00	0,25	1,20	1,00
0,27	0,95	0,20	0,15	0,81	0,99	0,15	0,80	0,99
0,27	0,95	0,20	0,15	0,81	0,93	0,15	0,80	0,92
0,27	0,95	0,20	0,15	0,81	0,91	0,15	0,80	0,91
0,27	0,95	0,20	0,15	0,81	0,91	0,15	0,80	0,90
0,43	0,95	0,20	0,15	0,96	0,99	0,15	0,80	0,99
0,43	0,95	0,20	0,15	0,96	0,97	0,15	0,80	0,92
0,43	0,95	0,20	0,15	0,96	0,99	0,15	0,80	0,89
0,43	0,95	0,20	0,15	0,96	0,95	0,15	0,80	0,83
0,62	0,95	0,20	0,14	1,17	0,98	0,15	1,02	0,99
0,62	0,95	0,20	0,14	1,17	1,03	0,15	1,02	0,98
0,62	0,95	0,20	0,14	1,17	0,99	0,15	1,02	0,90
0,62	0,95	0,20	0,14	1,17	0,89	0,15	1,02	0,78
0,78	0,95	0,20	0,17	1,33	1,00	0,15	1,22	0,97
0,78	0,95	0,20	0,17	1,33	0,98	0,15	1,22	0,93

Continua na próxima página

$R_{\lambda DL}$	b_f/b_w	D/b_w	$P_{prop1-2}$			P_{prop3}		
			A	B	$P_u/P_{prop1-2}$	A	B	P_u/P_{prop3}
0,78	0,95	0,20	0,17	1,33	0,86	0,15	1,22	0,79
0,78	0,95	0,20	0,17	1,33	0,85	0,15	1,22	0,77
0,93	0,95	0,20	0,21	1,40	0,91	0,18	1,27	0,88
0,93	0,95	0,20	0,21	1,40	0,89	0,18	1,27	0,84
0,93	0,95	0,20	0,21	1,40	0,86	0,18	1,27	0,79
0,93	0,95	0,20	0,21	1,40	N/C	0,18	1,27	N/C
1,12	0,95	0,20	0,25	1,30	0,93	0,25	1,20	0,92
1,12	0,95	0,20	0,25	1,30	0,90	0,25	1,20	0,87
1,12	0,95	0,20	0,25	1,30	0,85	0,25	1,20	0,80
1,12	0,95	0,20	0,25	1,30	N/C	0,25	1,20	N/C
1,19	0,95	0,20	0,25	1,20	0,94	0,25	1,20	0,94
1,19	0,95	0,20	0,25	1,19	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,19	0,95	0,20	0,25	1,19	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,19	0,95	0,20	0,25	1,19	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,2	$\lambda_{minLD-G}$ alto
0,27	0,95	0,25	0,15	0,81	1,00	0,15	0,80	1,00
0,27	0,95	0,25	0,15	0,81	0,92	0,15	0,80	0,91
0,27	0,95	0,25	0,15	0,81	0,90	0,15	0,80	0,90
0,27	0,95	0,25	0,15	0,81	0,90	0,15	0,80	0,90
0,43	0,95	0,25	0,15	0,95	0,99	0,15	0,80	0,99
0,43	0,95	0,25	0,15	0,95	0,96	0,15	0,80	0,91
0,43	0,95	0,25	0,15	0,95	0,96	0,15	0,80	0,87
0,43	0,95	0,25	0,15	0,95	0,88	0,15	0,80	0,77
0,62	0,95	0,25	0,14	1,18	0,97	0,15	1,03	0,98
0,62	0,95	0,25	0,14	1,18	0,99	0,15	1,03	0,94
0,62	0,95	0,25	0,14	1,18	0,88	0,15	1,03	0,80
0,62	0,95	0,25	0,14	1,18	N/C	0,15	1,03	N/C
0,78	0,95	0,25	0,17	1,33	0,99	0,15	1,22	0,97
0,78	0,95	0,25	0,17	1,33	0,96	0,15	1,22	0,91
0,78	0,95	0,25	0,17	1,33	N/C	0,15	1,22	N/C
0,78	0,95	0,25	0,17	1,33	N/C	0,15	1,22	N/C
0,93	0,95	0,25	0,21	1,40	0,95	0,18	1,27	0,92
0,93	0,95	0,25	0,21	1,40	0,88	0,18	1,27	0,83
0,93	0,95	0,25	0,21	1,40	N/C	0,18	1,27	N/C
0,93	0,95	0,25	0,21	1,40	N/C	0,18	1,27	N/C
1,12	0,95	0,25	0,25	1,30	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,12	0,95	0,25	0,25	1,30	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,12	0,95	0,25	0,25	1,30	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,12	0,95	0,25	0,25	1,30	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto

Continua na próxima página

$R_{\lambda DL}$	b_f/b_w	D/b_w	$P_{prop1-2}$			P_{prop3}		
			A	B	$P_u/P_{prop1-2}$	A	B	P_u/P_{prop3}
1,19	0,95	0,25	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,19	0,95	0,25	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,19	0,95	0,25	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,19	0,95	0,25	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
0,27	0,95	0,30	0,15	0,81	0,99	0,15	0,80	0,99
0,27	0,95	0,30	0,15	0,81	0,90	0,15	0,80	0,89
0,27	0,95	0,30	0,15	0,81	0,88	0,15	0,80	0,87
0,27	0,95	0,30	0,15	0,81	0,86	0,15	0,80	0,85
0,43	0,95	0,30	0,15	0,96	0,98	0,15	0,80	0,98
0,43	0,95	0,30	0,15	0,96	0,92	0,15	0,80	0,87
0,43	0,95	0,30	0,15	0,96	0,89	0,15	0,80	0,80
0,43	0,95	0,30	0,15	0,96	N/C	0,15	0,80	N/C
0,62	0,95	0,30	0,14	1,18	0,94	0,15	1,02	0,95
0,62	0,95	0,30	0,14	1,18	0,90	0,15	1,02	0,85
0,62	0,95	0,30	0,14	1,18	N/C	0,15	1,02	N/C
0,62	0,95	0,30	0,14	1,18	N/C	0,15	1,02	N/C
0,78	0,95	0,30	0,17	1,33	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,15	1,21	$\lambda_{minLD-G}$ alto
0,78	0,95	0,30	0,17	1,33	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,15	1,21	$\lambda_{minLD-G}$ alto
0,78	0,95	0,30	0,17	1,33	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,15	1,21	$\lambda_{minLD-G}$ alto
0,78	0,95	0,30	0,17	1,33	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,15	1,21	$\lambda_{minLD-G}$ alto
0,93	0,95	0,30	0,21	1,40	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,18	1,27	$\lambda_{minLD-G}$ alto
0,93	0,95	0,30	0,21	1,40	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,18	1,27	$\lambda_{minLD-G}$ alto
0,93	0,95	0,30	0,21	1,40	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,18	1,27	$\lambda_{minLD-G}$ alto
0,93	0,95	0,30	0,21	1,40	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,18	1,27	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,12	0,95	0,30	0,25	1,30	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,12	0,95	0,30	0,25	1,30	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,12	0,95	0,30	0,25	1,30	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,12	0,95	0,30	0,25	1,30	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,19	0,95	0,30	0,25	1,21	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto

Continua na próxima página

$R_{\lambda DL}$	b_f/b_w	D/b_w	$P_{prop1-2}$			P_{prop3}		
			A	B	$P_u/P_{prop1-2}$	A	B	P_u/P_{prop3}
1,19	0,95	0,30	0,25	1,21	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,19	0,95	0,30	0,25	1,21	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto
1,19	0,95	0,30	0,25	1,21	$\lambda_{minLD-G}$ alto	0,25	1,20	$\lambda_{minLD-G}$ alto

Tabela A.9 – Cálculo das cargas últimas com as formulações propostas utilizando simplificações de projeto.

AUTOR	biapoiadas				$P_{uexp}/P_{prop1-2}$	P_{uexp}/P_{prop3}
	λ_L	λ_D	λ_G	$R_{\lambda DL}$		
1-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	2,58	2,07	1,22	0,80	0,98	0,88
2-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	2,52	2,05	1,25	0,81	0,99	0,89
3-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	2,34	1,91	1,30	0,82	0,93	0,84
4-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	3,15	3,04	0,52	0,96	1,11	0,95
5-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	3,15	3,04	0,52	0,96	1,15	0,98
6-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	3,32	3,24	0,51	0,97	1,14	0,97
7-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	1,71	1,58	0,52	0,92	1,16	1,07
8-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	1,83	1,63	0,49	0,89	1,15	1,06
9-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	1,81	1,61	0,49	0,89	1,13	1,04
10-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	3,35	3,27	0,47	0,98	1,15	0,97
11-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	3,39	3,15	0,46	0,93	1,20	1,02
12-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	1,75	1,51	0,25	0,86	1,11	1,10
13-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	1,76	1,48	0,25	0,84	1,11	1,12
14-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	1,73	1,57	0,25	0,91	1,10	1,01
15-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	2,28	2,01	0,36	0,88	1,09	0,98
16-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	2,30	1,94	0,36	0,84	1,10	1,00
17-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	1,16	1,11	0,58	0,96	1,00	0,96
18-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	1,17	1,09	0,57	0,93	1,04	0,99
19-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	1,11	1,04	0,71	0,94	1,02	0,98
20-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,96	0,04	0,31	0,04	0,89	0,94
21-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,98	0,89	0,30	0,92	0,97	0,96
22-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,94	0,88	0,31	0,94	0,95	0,94
23-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	1,07	1,20	0,42	1,12	1,13	1,11
24-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	1,10	1,10	0,39	1,00	1,02	0,98
25-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	1,10	1,08	0,38	0,98	1,03	0,98
26-YOUNG <i>et al.</i> (2013)	0,92	0,98	0,73	1,06	0,93	0,93
1-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	1,66	1,41	0,64	0,85	1,19	1,19
2-YOUNG E RASMUSSEN (1998)	1,65	1,39	0,95	0,84	1,13	1,14
1-SALLES (2017)	2,14	2,42	1,13	1,13	0,91	0,85
1-YOUNG E HANCOCK (1992)	2,78	3,81	0,40	1,37	1,31	1,31
2-YOUNG E HANCOCK (1992)	2,77	3,47	0,40	1,25	1,18	1,18
3-YOUNG E HANCOCK (1992)	2,75	3,23	0,20	1,17	1,13	1,10
4-YOUNG E HANCOCK (1992)	2,74	3,22	0,29	1,18	1,17	1,14
5-YOUNG E HANCOCK (1992)	2,73	3,21	0,39	1,18	1,20	1,17
1-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	2,71	1,80	0,46	0,67	1,14	1,36
2-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	2,72	1,83	0,41	0,67	1,27	1,51
3-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	2,72	1,76	0,36	0,65	1,20	1,45
4-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	2,73	1,80	0,31	0,66	1,24	1,50
5-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	2,72	1,78	0,26	0,66	1,24	1,49
6-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	2,32	1,59	0,53	0,68	1,22	1,41
7-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	2,32	1,58	0,47	0,68	1,19	1,38

Continua na próxima página

AUTOR	biapoiadas				$P_{uexp}/P_{prop1-2}$	P_{uexp}/P_{prop3}
	λ_L	λ_D	λ_G	$R_{\lambda DL}$		
8-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	2,31	1,55	0,41	0,67	1,19	1,39
9-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	2,31	1,56	0,35	0,67	1,12	1,30
10-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	2,31	1,57	0,29	0,68	1,19	1,38
11-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	1,95	1,38	0,61	0,71	1,23	1,37
12-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	1,95	1,46	0,55	0,75	1,20	1,30
13-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	1,95	1,39	0,47	0,71	1,27	1,40
14-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	1,94	1,42	0,41	0,73	1,31	1,44
15-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	1,94	1,42	0,34	0,73	1,30	1,42
16-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	1,59	1,24	0,63	0,78	1,06	1,11
17-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	1,58	1,24	0,56	0,79	1,18	1,23
18-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	1,58	1,24	0,49	0,79	1,09	1,13
19-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	1,58	1,24	0,42	0,79	1,20	1,24
20-LOUGHLAN <i>et al.</i> (2012)	1,58	1,24	0,35	0,79	1,09	1,13