



DIMENSIONAMENTO À FLAMBAGEM DISTORCIONAL VIA MRD DE  
COLUNAS METÁLICAS PERFURADAS EM PERFIL RACK

Ana Carolina Campilho da Silva

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.

Orientador: Alexandre Landesmann

Rio de Janeiro

Março de 2017

DIMENSIONAMENTO À FLAMBAGEM DISTORCIONAL VIA MRD DE  
COLUNAS METÁLICAS PERFURADAS EM PERFIL RACK

Ana Carolina Campilho da Silva

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. Alexandre Landesmann, D.Sc.

---

Prof. Eduardo de Miranda Batista, D.Sc.

---

Prof. Eliane Maria Lopes Carvalho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2017

Silva, Ana Carolina Campilho da

Dimensionamento à Flambagem Distorcional via MRD de Colunas Metálicas Perfuradas em Perfil Rack / Ana Carolina Campilho da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XI, 96 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Alexandre Landesmann

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 72-78.

1. Flambagem Distorcional. 2. Colunas de Perfis Formados a Frio. 3. Análise Numérica. I. Landesmann, Alexandre. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*A DEUS, Nossa Senhora e aos meus  
pais, Wanda e Edinaldo, pelo  
constante apoio e incentivo.*

## **Agradecimentos**

A Deus, que sempre me deu a força necessária para seguir em frente e, a Nossa Senhora, que intercedeu por mim durante todos os momentos dessa jornada.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram e forneceram toda a base que permitiu alcançar mais este objetivo, principalmente nos momentos em que eu não acreditava que seria possível conseguir, evitando que os muitos obstáculos me desestimulassem ou fizessem desistir, sendo um exemplo de dedicação e perseverança.

Ao meu orientador, professor Alexandre Landesmann, pela dedicação, paciência, amizade, incentivo e experiências transmitidas durante a elaboração de cada etapa desta dissertação.

Aos professores do PEC pelos importantes ensinamentos transmitidos ao longo deste período de convivência.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado, seja me apoiando, oferecendo ajuda, ouvindo nos momentos mais difíceis ou incentivando, e tornaram o caminho mais suave.

Aos colegas do Laboratório de Estruturas e Materiais (LabEst) da COPPE/UFRJ, em especial, o Orlando Caldas, e a todos os demais envolvidos direta ou indiretamente neste trabalho.

À COPPE, por oferecer a oportunidade deste trabalho.

*“A verdadeira coragem é ir atrás de seus sonhos mesmo quando todos dizem que ele é impossível”*

*Cora Coralina*

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”*

*Madre Teresa de Calcutá*

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

## DIMENSIONAMENTO À FLAMBAGEM DISTORCIONAL VIA MRD DE COLUNAS METÁLICAS PERFURADAS EM PERFIL RACK

Ana Carolina Campilho da Silva

Março/2017

Orientador: Alexandre Landesmann

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho objetiva a verificação das curvas distorcionais do MRD quanto às condições de segurança no dimensionamento de colunas de seção rack comerciais com e sem perfurações sob a ação de uma carga de compressão centrada e nos comprimentos em que ocorra a flambagem distorcional, empregando para tal análises numéricas computacionais via MEF. Tais seções são amplamente utilizadas em sistemas de estocagem industrial, conhecidas como porta-*pallets* e, possuem ainda furações, que influenciam na resistência e dimensionamento. Esses furos permitem o encaixe das peças constituintes da estrutura e a obtenção de diferentes configurações estruturais, de forma que o aprimoramento das análises das colunas os considerando permite um dimensionamento mais preciso e pode vir a gerar uma redução ainda maior dos custos na fabricação e montagem, aumentando assim os benefícios da utilização desses perfis. A primeira etapa consiste na avaliação do comportamento modal da seção maciça, além da determinação dos comprimentos e das cargas críticas do modo de flambagem distorcional através do *GBTul*. Após essa fase é realizada a modelagem das colunas maciças e perfuradas com elementos de casca no *ANSYS*, aplicando-se as imperfeições iniciais para efetuar as análises não-lineares de pós-flambagem elástica e elasto-plástica, obtendo a carga última. Finalmente, os resultados numéricos obtidos nesta dissertação são comparados com as previsões obtidas através do Método da Resistência Direta (MRD), que consta na ABNT NBR 14762:2010 (Anexo C), além da proposta de SCHAFER & MOEN (2008,2011), presente atualmente na AISI S100:2016, e de LANDESMANN *et al* (2017).

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

DSM DESIGN OF STEEL PERFORATED STORAGE-RACK COLUMNS  
UNDERGOING DISTORTIONAL BUCKLING

Ana Carolina Campilho da Silva

March/2017

Advisor: Alexandre Landesmann

Department: Civil Engineering

The present work aims to verify the distortional curves of the MRD regarding the safety conditions in the design of commercial rack section columns with and without perforations under the action of a centered compression load and the lengths in which the distortional buckling occurs, employing for this purpose computational numerical analyzes via MEF. These sections are widely used in industrial storage systems, known as pallet carriers, and also have drills, which influence the resistance and dimensioning. These holes allow the fitting of the constituent parts of the structure and the achievement of different structural configurations, so that the improvement of the analysis of the columns considering them allows a more precise dimensioning and can generate an even greater reduction of the costs in the manufacture and assembly, Thus increasing the benefits of using these profiles. The first step consists in evaluating the modal behavior of the solid section, in addition to determining the lengths and critical loads of the distortional buckling mode through *GBTul*. After this phase, the modeling of solid and perforated columns with shell elements in the *ANSYS* is performed, applying the initial imperfections to perform the non-linear analyzes of elastic-elastic and elastic-plastic buckling, obtaining the ultimate load. Finally, the numerical results obtained in this dissertation are compared with the predictions obtained through the Direct Resistance Method (DSM), which is included in ABNT NBR 14762: 2010 (Annex C), in addition to the proposal of SCHAFFER & MOEN (2008,2011), currently present in AISI S100: 2016, and by LANDESMANN et. al (2017).



# Sumário

<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Sistemas de Armazenamento Industrial.....	2
1.1.1 Tipos de Sistemas de Armazenamento Industrial .....	3
1.1.2 Estruturas Porta- <i>pallets</i> .....	5
1.1.3 Prescrições existentes.....	6
1.2 Motivação .....	7
1.3 Objetivo .....	8
1.4 Metodologia .....	9
1.5 Estrutura do trabalho.....	9
<b>2 Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>11</b>
2.1 Equilíbrio e estabilidade estrutural .....	11
2.1.1 Flambagem.....	12
2.1.2 Pós-flambagem e carga última .....	18
2.2 Métodos de Dimensionamento .....	24
2.2.1 Método da Largura Efetiva (MLE) .....	24
2.2.2 Método da Seção Efetiva (MSE).....	25
2.2.3 Método da Resistência Direta (MRD).....	25
<b>3 Análise de Flambagem .....</b>	<b>33</b>
3.1 Colunas maciças .....	33
3.2 Colunas perfuradas .....	44
<b>4 Análise de Pós-Flambagem.....</b>	<b>47</b>
4.1 Análise em Elementos Finitos .....	47
4.2 Pós-flambagem elástica .....	49
4.3 Pós-flambagem elasto-plástica e carga última.....	55
4.4 Dimensionamento via Método da Resistência Direta.....	63
<b>5 Conclusões .....</b>	<b>69</b>
5.1 Sugestões de trabalhos futuros.....	70
<b>6 Bibliografia.....</b>	<b>72</b>
<b>Apêndice A .....</b>	<b>79</b>
<b>Apêndice B .....</b>	<b>88</b>

# SÍMBOLOS

## Letras Maiúsculas

$A_g$	Área bruta da seção transversal
$A_{net}$	Área líquida da seção transversal
$A_{furos}$	Área dos furos da seção transversal
$E$	Módulo de elasticidade
$f_y$	Tensão de escoamento
$I$	Inércia
$L$	Comprimento da coluna
$L_D$	Comprimento da coluna associado a flambagem distorcional das colunas maciças
$L_{D.P}$	Comprimento da coluna associado a flambagem distorcional das colunas perfuradas
$N_d$	Número de modos de deformação no <i>GBTul</i>
$P$	carga axial de compressão
$P/P_{cr}$	Carga aplicada normalizada
$P_{b1.L}$	Menor carga de bifurcação local
$P_{b1.G}$	Menor carga de bifurcação global
$P_{cr}$	Carga crítica (ou de bifurcação)
$P_{cr.D}$	Carga crítica distorcional
$P_{cr.D.M}$	Carga crítica distorcional da coluna maciça obtida no ANSYS
$P_{cr.D.P}$	Carga crítica distorcional da coluna perfurada obtida no ANSYS
$P_{D2}$	Carga axial nominal da flambagem distorcional em $\lambda_{d2}$
$P_E, P_e$	Carga crítica de <i>Euler</i>
$P_{n.D}$	Capacidade nominal da coluna na flambagem distorcional obtida através do dimensionamento via MRD segundo a ABNT NBR 14762:2010 (Anexo C)
$P_{n.D}^{M\&S}$	Capacidade nominal da coluna na flambagem distorcional obtida através do dimensionamento via MRD segundo a AISI S100:2016 (proposta de SCHAFER & MOEN (2008,2011) para seções perfuradas)
$P_{n.D}^L$	Capacidade nominal da coluna na flambagem distorcional obtida através do dimensionamento via MRD segundo a proposta de LANDESMANN <i>et. al</i> (2017)
$P_u$	Carga última
$P_{y^*}$	Carga de escoamento relativa a área bruta em seções maciças e a área líquida em seções perfuradas
$P_y$	Carga de escoamento da área bruta ( $P_y = A f_y$ )
$P_{ynet}$	Carga de escoamento da área líquida ( $P_{ynet} = A_{net} f_y$ )

### **Letras minúsculas**

$m$	Número de nós intermediários no $GBTul$
$n$	Número de paredes no $GBTul$
$q$	Deslocamento lateral no meio da coluna
$t$	Espessura

### **Letras gregas**

$\delta_0$	imperfeição inicial
$\lambda$	esbeltez
$\lambda_D, \lambda_{d1}, \lambda_{d2}$	esbeltez associada a flambagem distorcional
$ \delta $	Máximo deslocamento transversal absoluto
$ \delta /t$	Deslocamento normalizado
$\nu$	coeficiente de Poisson

# 1 Introdução

---

A contínua evolução da indústria nas últimas décadas impulsionou o desenvolvimento dos processos logísticos e diversas inovações tecnológicas, buscando materiais com baixos custos de produção, fácil controle de qualidade e elevada versatilidade, além de peso reduzido da estrutura. Esse é o caso dos perfis formados a frio (PFF), os quais são de ampla utilização em coberturas, galpões e sistemas de armazenagem industrial, conforme ilustra a Figura 1.1.



**Figura 1.1. Exemplos de utilização dos PFF: (a) coberturas, (b) galpões (METALFORTE, 2016)<sup>1</sup>, (c) sistemas de armazenagem industrial – porta-pallets (MECALUX, 2016)<sup>2</sup>.**

Os PFFs são normalmente constituídos por elementos que apresentam elevadas relações largura/espessura e obtidos através da conformação ou dobramento de chapas ou bobinas, em prensas perfiladeiras ou em dobradeiras, respectivamente, sendo o segundo método mais usual. O processo de perfilação (ou contínuo), ilustrado pela Figura 1.2(a), consiste no deslocamento longitudinal de uma chapa de aço sobre os roletes de uma linha de perfilação, de maneira a conferir gradativamente uma forma definitiva para o perfil. Tal processo é adequado para a produção em série e usual entre os fabricantes de PFFs. O processo de conformação (ou descontínuo), mostrado na Figura 1.2(b), utiliza-se de uma prensa dobradeira, na qual a chapa de aço é prensada segundo o número de dobras necessárias para a obtenção da geometria desejada. Este

---

<sup>1</sup>Acessado em 16 de março de 2016 (<http://www.metalforte.com.br/produtos>).

<sup>2</sup>Acessado em 16 de março de 2016 (<http://www.mecalux.com.br/armazenagem-industrial/sistemas-armazenagem>).

segundo processo é usual para a fabricação de pequenas quantidades de perfis e comum entre os fabricantes de estruturas metálicas, sendo apresentadas na Figura 1.3 as seções transversais mais comumente utilizadas.

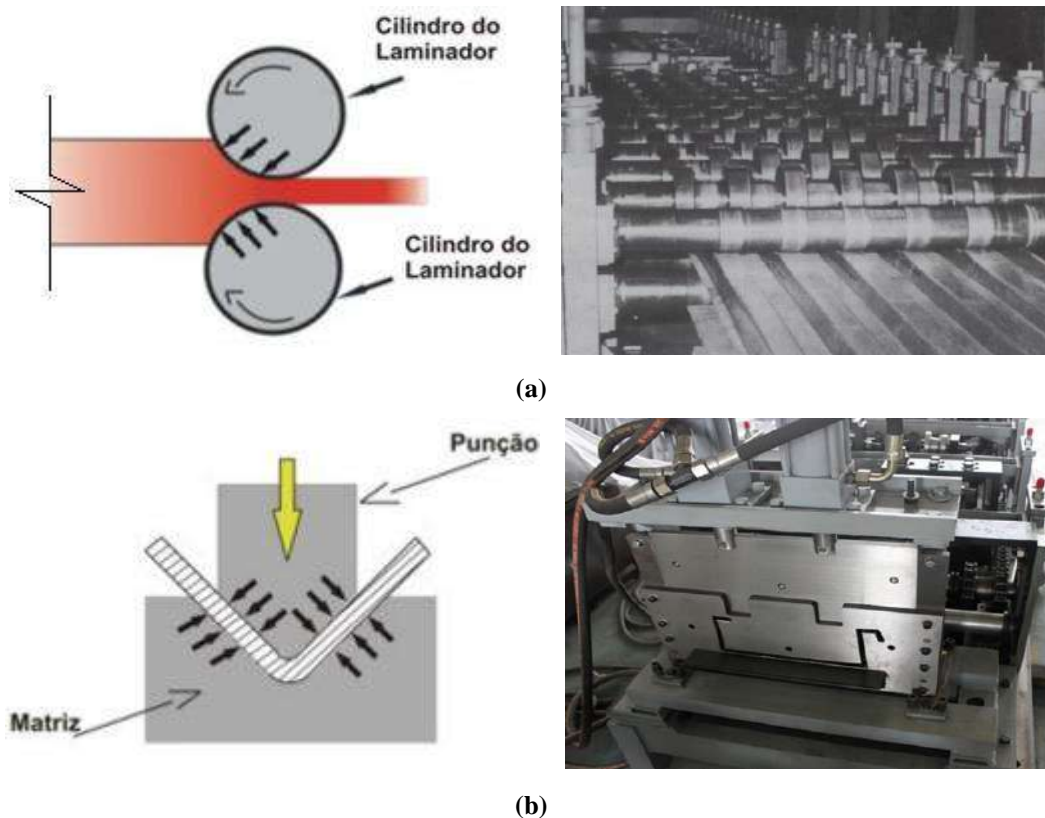


Figura 1.2. Processos de fabricação dos PFFs: (a) máquina de perfilação, (b) prensa dobradeira, e respectivas representações esquemáticas dos processos de fabricação.

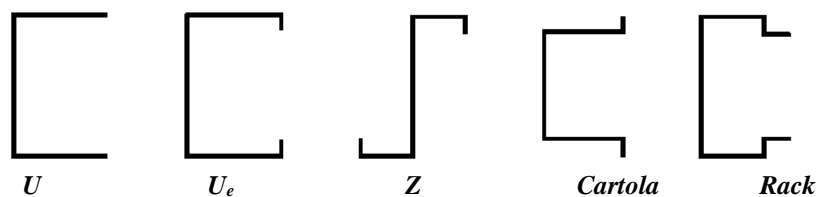


Figura 1.3. Exemplos de seções transversais de PFF fabricadas pelo processo de conformação.

## 1.1 Sistemas de Armazenamento Industrial

Os sistemas de armazenagem industrial empregam os PFFs em diversas soluções desde 1930 (GODLEY, 1991), onde as estruturas eram compostas por cantoneiras de aço formado a frio com perfurações ao longo do comprimento e conexões simples, possibilitando uma grande variedade de configurações. Com o crescimento da utilização e, sobretudo, devido à baixa rigidez à torção das cantoneiras, as configurações obtidas para alcançar a estabilidade dessas estruturas tornaram-se cada vez mais onerosas. Deste

modo, tornou-se necessária a utilização de novas seções, com a evolução natural para as seções  $U_e$  e, posteriormente, para as seções rack, cujas mesas e enrijecedores de bordo facilitam a instalação dos contraventamentos.

A grande diversidade do uso dos sistemas de armazenagem<sup>3</sup>, gera a necessidade da criação de projetos cada vez mais complexos e específicos. Dessa forma, as seções rack permanecem em constante aperfeiçoamento, adquirindo diferentes configurações, conforme ilustra a Figura 1.4, que também compara com proposta de seção  $U_e$ .

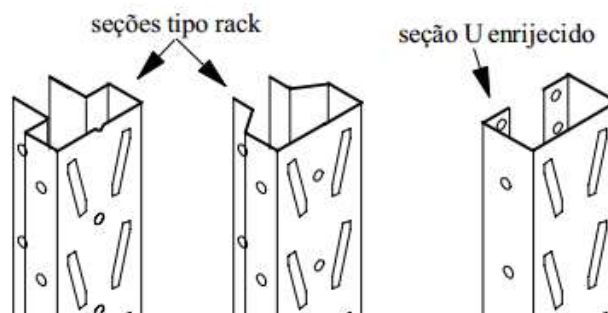


Figura 1.4. Colunas de seção tipo rack e  $U_e$  (CAMPOS, 2003).

### 1.1.1 Tipos de Sistemas de Armazenamento Industrial

Racionalizar a altura do sistema foi a solução encontrada para reduzir o espaço e armazenar uma maior quantidade de produtos. O conceito de “verticalização de cargas” possui como objetivo o aproveitamento máximo dos espaços, contribuindo dessa forma para a redução dos custos unitários de estocagem e o descongestionamento das áreas de movimentação (GUERRA, 2014).

Existem diversos tipos de sistemas de armazenamento industrial, variando de acordo com o produto a ser armazenado, espaço disponível e logística a ser empregada, de forma que, uma infinidade de perfis rack podem ser utilizados para atender adequadamente as demandas. Alguns fatores permitem diferenciá-los, tais como a altura entre as vigas, profundidade, forma de armazenagem, utilização de equipamentos (empilhadeiras) e estocagem manual, classificando-os em dois grandes grupos: os sistemas estáticos e dinâmicos.

Segundo RIBEIRO (2006), os sistemas estáticos caracterizam-se pela utilização de empilhadeiras para a movimentação individual dos *pallets* na estrutura, tanto para o

---

<sup>3</sup> Dependendo da fase da produção, os produtos podem ficar armazenados por curtos ou longos períodos, além da armazenagem e retirada de acordo com a demanda do processo de produção e do mercado consumidor.

carregamento quanto para o descarregamento. Possuem essa denominação pois os produtos estocados não se locomovem de forma automatizada e a rotatividade é pequena. Entre os principais sistemas estáticos, é possível citar: *porta-pallets*, *drive-in*, *drive-through* e *cantilever*, ilustrados pela Figura 1.5(a,b,c).

Os sistemas dinâmicos são caracterizados pela alta rotatividade dos produtos estocados e apresentam grande acessibilidade a fim de facilitar a movimentação dos *pallets*, sendo necessários dois corredores de acesso para as empilhadeiras, um para carregamento e outro para descarregamento. Os principais sistemas dinâmicos são o *flow-rack* e o *push-back* (RIBEIRO, 2006), conforme apresentados na Figura 1.5(d,e).



**Figura 1.5. Estruturas (a) *porta-pallets*, (b) *drive-in*, *drive-through*, (c) *cantilever*, (MECALUX,2016)<sup>2</sup> (d) *flow-rack* (ÁGUIA SISTEMAS, 2016)<sup>4</sup> e (e) *push-back* (MECALUX, 2016)<sup>2</sup>.**

<sup>4</sup> Acessado em 16 de março de 2016 (<http://www.aguiasistemas.com.br/productos/flow-rack-detail>).

O item a seguir (1.1.2) enfatiza as estruturas porta-*pallets* que apresenta configurações geométricas de seção transversal que serão, em parte, objeto de análise nesta dissertação e ilustradas no capítulo 3.

### 1.1.2 Estruturas Porta-*pallets*

Porta-*pallets* é um sistema de armazenagem direto e unitário, vantajoso no controle de estoques devido a sua grande funcionalidade e praticidade, além do baixo custo de implantação em comparação com os demais sistemas (MIRANDA, 2011), conforme mostrado na Figura 1.6(a). Trata-se de uma estrutura cujos elementos possuem elevada esbeltez e imperfeições geométricas devidas à fabricação e montagem (SILVA, 2011), onde as prateleiras são constituídas por um par de vigas que se encaixam nas colunas, tal como ilustra a Figura 1.6(b,c), com possibilidade de regulagem de altura devido às furações. Tais perfurações influenciam significativamente no comportamento isolado dos elementos, assim como no comportamento global do sistema.



**Figura 1.6.** (a) Estrutura de armazenagem industrial – porta-*pallets* – (b) e (c) chapas da conexão viga-coluna (METALSHOP, 2016)<sup>5</sup>.

A crescente utilização dos perfis de seção tipo rack em sistemas de armazenamento industrial, como as estruturas porta-*pallets*, torna fundamental avaliações adequadas do comportamento desses perfis. Estes, devido a suas características (chapas finas com elevada esbeltez e perfurações), desenvolvem fenômenos de instabilidade que variam com a sua forma, comprimento e condição de apoio, dentre outros fatores, podendo apresentar os modos de flambagem local,

<sup>5</sup> Acessado em 16 de março de 2016 (<http://www.metalshop.com.br/produtos.php>).



distorcional e global, além das resultantes da interação entre esses modos principais. A resistência “exata” da coluna, devido aos fatores expostos anteriormente, nem sempre é obtida analiticamente. Com a facilidade de fabricação e execução, há demanda por seções complexas, objetivando o aumento da resistência e a redução do peso da estrutura, de maneira que os métodos tradicionais de dimensionamento precisam ter sua aplicabilidade verificada. Recentemente, foram publicados trabalhos experimentais com comparação e validação através de modelos em elementos finitos, ilustrando essa importância: (i) BONADA *et al.* (2015) analisaram a influência da combinação de cargas axiais com momentos fletores devido a excentricidade na aplicação da carga; (ii) FIROUZIANHAJI *et al.* (2015) estudaram o comportamento não-linear de conexões viga/coluna típicas e (iii) TROUNCER & RASMUNSEN (2015) investigaram os efeitos dos momentos de 2ª ordem gerados por instabilidades locais ou distorção dos pilares. Entretanto, não foram analisados os efeitos isolados de colunas rack perfuradas com a geometria adotada neste trabalho sob o efeito de compressão centrada e modo de flambagem distorcional.

### 1.1.3 Prescrições existentes

Os fabricantes de estruturas de armazenamento industrial, ou racks, desenvolveram metodologias próprias com o objetivo de elaborar prescrições específicas para o dimensionamento desses sistemas, citando-se:

- (i) AISI S100:2016 – *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members – American Iron and Steel Institute*;
- (ii) ANSI MH16.1: 2012 – *Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks – Material Handling Industry – American National Standard*;
- (iii) AS 4084:2012 *Steel storage racking – Australian Standard*, baseada principalmente no RMI (2008), excetuando a combinação de cargas, tolerâncias e folgas que são baseadas na FEM;
- (iv) FEM 9831/2012 – *Basis of calculations for storage and retrieval machines – Tolerances, deformations and clearances in the storage system Part 1: General, Single deep and Double deep Beam Pallet racking*;
- (v) EN 15512:2009 – *Steel Static Storage Systems - Adjustable pallet racking systems - Principles for structural design*;

- (vi) EN 15620:2008 – *Steel Static Storage Systems - Adjustable Pallet Racking - Tolerances, Deformations and Clearances*;
- (vii) RMI (2008) – *Specification for the Design, Testing, and Utilization of Industrial Steel Storage Racks – Rack Manufacturers Institute*;
- (viii) AISI MH 26.2:2007 – *Design, Testing and Utilization of Welded-Wire Rack Decking – Material Handling Industry – American National Standard*;
- (ix) EUROCODE 3 (1993) - *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings – European Standard*;
- (x) FEM 9.311/1978 – *Rules for the design of storage and retrieval machines; Structures*;
- (xi) SEMA (*Storage Equipment Manufacturers Association*) – manuais: *Code of Practice for the Design of Adjustable Pallet Racking; Code of Practice for the Design of Static Racking, Code of Practice for the Use of Static Pallet Racking e Guidelines Numbers 1,2 and 6*.

No Brasil, a ABNT NBR 15524:2007 apresenta o projeto, dimensionamento, montagem e utilização para as estruturas porta-*pallets* e originou-se de um manual<sup>6</sup> de especificações para projeto, testes e utilização de sistemas de armazenagem da ABLM (Associação Brasileira de Movimentação e Logística). Além dessa norma, o dimensionamento deve obedecer também às prescrições da ABNT NBR 14762:2010, na qual consta, no Anexo C, o Método da Resistência Direta (MRD).

## 1.2 Motivação

As estruturas porta-*pallets* são utilizadas objetivando atender as demandas de armazenamento e, por questões de otimização, geram seções transversais complexas e uma infinidade de tipos de perfis, dentre eles os caracterizados como seções rack. Essas barras, constituídas por chapas finas com perfurações e elevada esbeltez, desenvolvem fenômenos de instabilidade que variam com a sua forma, comprimento e condição de apoio, dentre outros fatores, podendo apresentar os diversos modos de flambagem e respectivas interações entre esses modos.

---

<sup>6</sup> Acessado em 20 de março de 2016 (<http://www.abml.org.br/manuais>).

O Método da Resistência Direta (MRD) fornece curvas e expressões que possibilitam estimar a resistência de diversas seções nos modos de flambagem local, distorcional, global e interações entre estes. Trata-se de um método simples e eficiente, pois fornece estimativas para a resistência última precisas e seguras, baseadas no comportamento da seção transversal na flambagem e na tensão de escoamento do aço utilizado.

Entretanto, as expressões normativas baseadas nesse método e compiladas no Anexo C da ABNT NBR 14762:2010 não consideram a influência das perfurações, incluídas recentemente na AISI S100:2016. Dessa forma, com o aumento expressivo do uso de diversas seções rack para grandes estruturas de armazenamento industrial, como as porta-*pallets*, torna-se fundamental verificar se os métodos de dimensionamento atuais satisfazem as condições de segurança para essas estruturas.

Apesar dos estudos de análise numérica e/ou experimental para seções perfuradas realizados por SCHAFFER & MOEN (2006, 2008, 2009, 2011), CASAFONT *et al.* (2011), TROUNCER & RASMUSSEN (2013) e, para seções maciças, por SILVESTRE *et al.* (2005), SILVESTRE & CAMOTIM (2006), LANDESMANN & CAMOTIM (2011, 2013), GARCIA *et al.* (2014) e LANDESMANN *et. al* (2017), os mesmos não contemplam a diversidade de características existentes nas seções rack utilizadas nas estruturas porta-*pallets* (seções complexas e perfuradas, conforme apresentado no capítulo 3 e ilustrado pela Figura 3.1). Dessa forma, a necessidade de avaliar a segurança das colunas de seção tipo rack maciças<sup>7</sup> e perfuradas, sujeitas ao modo de flambagem distorcional e não consideradas na curva normativa do MRD, proporciona a motivação para a investigação relatada neste trabalho.

### 1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é verificar o desempenho das curvas de dimensionamento via MRD para colunas em seção rack com e sem perfurações, comerciais, sob a ação de uma carga de compressão centrada e sujeita a flambagem distorcional “pura”<sup>8</sup>, utilizando para tal análises numéricas computacionais via MEF.

---

<sup>7</sup> Consideram-se maciças as seções sem perfurações.

<sup>8</sup> Utiliza-se a palavra “pura” a fim de indicar que não ocorre a influência de qualquer flambagem/deformação local ou global, selecionando-se para tal, colunas com cargas críticas de flambagem local e global significativamente mais elevadas do que os seus homólogos distorcionais.

Além disso, objetiva-se avaliar o comportamento de flambagem e pós-flambagem, a participação modal com a caracterização dos principais modos, a curva  $P_{cr}$  versus  $L$  (carga crítica versus comprimento) e realizar as análises de pós-flambagem elástica e elasto-plástica.

## 1.4 Metodologia

As análises propostas abrangem as seguintes etapas: (i) seleção de colunas, análise linear de estabilidade e participação modal através do programa *GBTul* (BEBIANO *et al.*, 2010ab), (ii) análise não-linear física e geométrica, utilizando modelos de elementos finitos de casca (*Shell181*) no programa *ANSYS* (SAS, 2009), visando avaliar a pós-flambagem elástica e elasto-plástica, (iii) análise da coluna utilizando o critério de falha de *von Mises* e obtenção da carga última ( $P_u$ ), possibilitando a verificação e comparação das curvas  $P_u/P_y$  versus  $\lambda_D$  com as curvas distorcionais do MRD e, (iv) avaliação dos resultados a fim de verificar se as recomendações normativas (ABNT NBR 14762:2010) estimam adequadamente (segurança e precisão) a resistência das colunas, além do dimensionamento através da AISI S100:2016 (curvas propostas por MOEN & SCHAFER (2008, 2011)) e da proposta de LANDESMANN *et. al* (2017).

## 1.5 Estrutura do trabalho

Inicialmente, no capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica relativa a trabalhos numéricos e experimentais anteriores sobre flambagem, pós-flambagem, resistência última e dimensionamento através do Método da Resistência Direta (MRD), além de ilustrar o comportamento de colunas maciças e perfuradas sujeitas à compressão centrada sob o modo de flambagem distorcional.

No capítulo 3 é descrito o procedimento de seleção de colunas comerciais de seção rack que possuam (i) flambagem distorcional pura e (ii) cargas críticas local e global significativamente maiores que a distorcional. Com o propósito de explicitar a distinção entre o modo de flambagem local e distorcional nas colunas tipo rack, é apresentada uma discussão dos resultados de flambagem obtidos através do GBT (*Generalized Beam Theory*), cujo comportamento modal permite ilustrar os significados

das palavras "local" e "distorcional" adotadas neste trabalho. Ao final, é apresentada a flambagem distorcional em colunas perfuradas, bem como a redução da carga crítica distorcional obtida em relação às colunas maciças.

Em seguida, no capítulo 4, são descritos os parâmetros utilizados nas análises de elementos finitos via ANSYS (SAS, 2009), além de: (i) abordar o comportamento das colunas na pós-flambagem elástica e elasto-plástica e (ii) dos resultados obtidos de carga última, realizando um comparativo entre colunas maciças e perfuradas.

No capítulo 5 é exposto o dimensionamento das seções estudadas através do Método da Resistência Direta (MRD), além de verificar as prescrições da AISI S100:2016 para o dimensionamento de seções perfuradas (MOEN & SCHAFER, 2008, 2011). Em seguida, é analisada a proposta de curva de LANDESMANN *et. al* (2017).

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

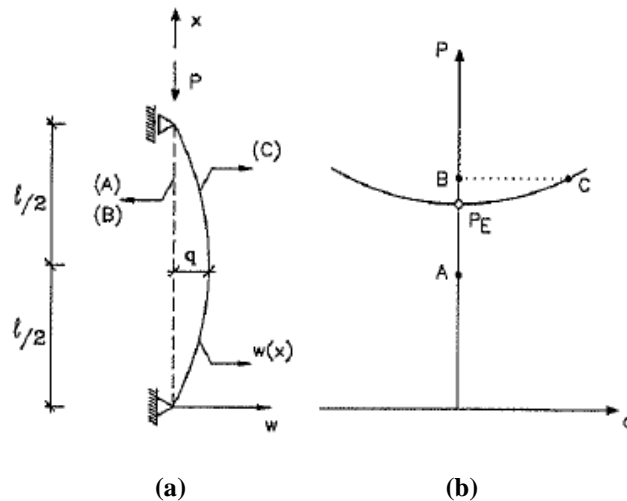
---

Este capítulo apresenta inicialmente conceitos de estabilidade e equilíbrio, com destaque para os modos de flambagem e para os principais trabalhos anteriores relativos à flambagem distorcional, comportamento de pós-flambagem e resistência última. Os métodos e padrões de dimensionamento vigentes são abordados ao final do capítulo, com destaque para o MRD.

### 2.1 Equilíbrio e estabilidade estrutural

Além dos requisitos de segurança relativos à resistência e à deformação, os projetos estruturais devem considerar os aspectos de estabilidade, em especial nos casos de peças esbeltas, tais como as colunas de PFF. Dessa forma, é importante compreender os conceitos de equilíbrio estável e instável. Considerando-se uma estrutura sob a ação de forças externas que induzem a uma condição de equilíbrio específica, a estabilidade deste conjunto é avaliada através do comportamento estrutural apresentado após uma ligeira perturbação gerada pela aplicação de uma carga externa. O equilíbrio é avaliado como estável ou instável se a estrutura retorna ou não à sua posição original após o término da perturbação (REIS & CAMOTIM, 2001). O conceito de estabilidade para colunas é objeto de estudo desde o século XVIII, sendo exemplificado através de um dos primeiros artigos relativos aos problemas de bifurcação em barras comprimidas isoladas, realizado em 1744 pelo matemático suíço Leonard Euler (THOMPSON, 1982) e denominado de coluna de *Euler*. As premissas adotadas para essa teoria são: uma coluna elástica, perfeitamente reta, comprimento ( $L$ ), extremidades apoiadas e carregada axialmente (carga  $P$ ), conforme ilustra a Figura 2.1(a). A trajetória de equilíbrio, onde  $q$  é o valor do deslocamento lateral no meio do comprimento da coluna sob a ação de uma carga  $P$ , é apresentado na Figura 2.1(b).

Observa-se que, no ponto onde  $q=0$  e  $P=P_E$ , definido graficamente na Figura 2.1(b), ocorre uma bifurcação de equilíbrio gerada pela interseção da trajetória fundamental ( $q=0$ ) com a trajetória de pós flambagem ( $q\neq 0$ ). Tal ponto é designado como carga crítica de *Euler* ou carga de bifurcação ( $P_E=\pi^2EI/L^2$ ), onde ocorre a bifurcação da configuração de equilíbrio, definindo se a coluna permanecerá retilínea ou apresentará algum deslocamento.



**Figura 2.1. Coluna de Euler e configurações de equilíbrio: (a) geometria e carga aplicada e (b) trajetória de equilíbrio (REIS & CAMOTIM, 2001).**

Os pontos A, B e C da trajetória de equilíbrio, indicados na Figura 2.1(b), ilustram três configurações diferentes da coluna, onde B e C são pontos que correspondem ao mesmo carregamento. Após uma perturbação, gerada por um acréscimo de carga no ponto A, a coluna retorna a sua posição original, caracterizando o equilíbrio estável. Entretanto, no ponto B, a coluna distancia-se da sua posição original, configurando o equilíbrio instável. O último caso ocorre se for introduzida uma nova perturbação em C, levando a configuração de equilíbrio estável (REIS & CAMOTIM, 2001). Assim, verifica-se que a carga crítica é a menor carga que permite uma transição do estado de equilíbrio de uma coluna, entre estável e instável. (IYENGAR, 1986).

### 2.1.1 Flambagem

Flambagem é a perda da forma original de um membro e resulta da deformação elástica ou inelástica (ZIEMIAN, 2010). Trata-se de um fenômeno comum nos PFF's e ocorre quando um elemento é submetido a um carregamento maior do que a sua carga crítica, alterando a sua forma e resistência original. Esse fenômeno de instabilidade pode se apresentar sob diversas formas, tais como local, distorcional e global (flexão ou flexo-torção), além das combinações resultantes dessas principais.

As seções transversais de PFF's têm sido estudadas desde 1940, quando os métodos existentes não conseguiam prever o modo de flambagem distorcional analiticamente. Os primeiros estudos que apresentam características desse modo de

flambagem datam da década de 1970, quando DESMOND (1977) e THOMASSON (1978) realizaram testes experimentais obtendo um tipo de flambagem caracterizado como flambagem “enrijecida” e “local-torsional”, respectivamente, descrevendo o que posteriormente é denominado como flambagem distorcional. Nas décadas de 80 e 90, com o avanço da tecnologia, intensificaram-se os estudos sobre esse modo de flambagem.

HANCOCK (1984) realizou ensaios experimentais com colunas apoiadas e comparou com os resultados teóricos comprovando a ocorrência do modo de flambagem distorcional e que as tensões são similares nas seções maciças e perfuradas se considerada a área líquida da seção. Além disso, analisou o comportamento das seções  $U_e$  e rack (com e sem enrijecedor de borda), conforme ilustra a Figura 2.2, bem como a influência da existência de enrijecedores, observando que a presença desses aumenta o comprimento crítico distorcional. Posteriormente, LAU & HANCOCK (1987) desenvolveram expressões analíticas para a obtenção da tensão crítica elástica no modo de flambagem distorcional para qualquer geometria de seção transversal de colunas de paredes finas tipo  $U$  submetidas à compressão uniforme.

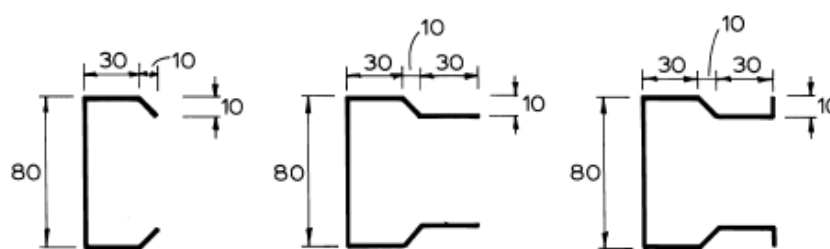
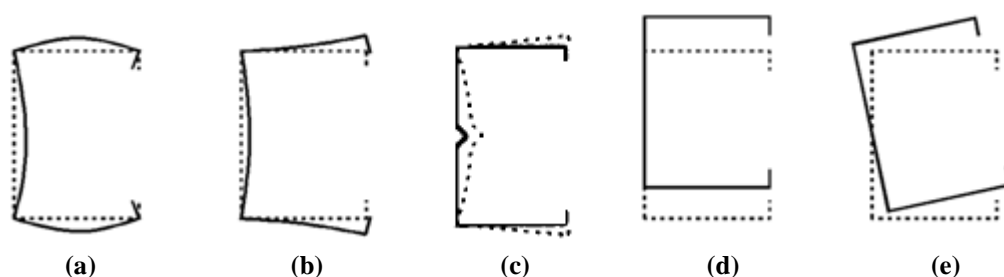


Figura 2.2. Seção  $U_e$  e racks analisadas por HANCOCK (1984)

Conceitualmente, a flambagem local é caracterizada pela alteração da forma das paredes, que sofrem translações normais ao seu plano médio, com os pontos de dobramento e ângulos das arestas da seção inalterados, conforme apresenta a Figura 2.3(a). A flambagem distorcional é obtida pelo deslocamento das arestas da seção e envolve a alteração na forma transversal (HANCOCK, 2003), além de apresentar rotação nos pontos de junção das arestas, tais como a alma com a mesa, em membros típicos (SCHAFER, 2000), como ilustrado pela Figura 2.3(b) ou, quando houverem enrijecedores intermediários, este apresentar movimento normal ao plano onde estiver localizado (HANCOCK *et al.*, 1994; SCHAFER, 2000), conforme verifica-se na Figura 2.3(c). Esse tipo de flambagem ocorre em seções transversais abertas e com



enrijecedores intermediários ou de borda (MOEN & SCHAFER, 2011). A flambagem global do perfil compreende duas formas: (i) por flexão, gerado pelo momento durante a compressão da coluna e caracterizado pelo deslocamento da seção transversal devido a curvatura desta, sem alteração da forma da seção, mostrado na Figura 2.3(d) e (ii) por flexo-torção (ou torsional), envolvendo momento e torção simultaneamente, rotacionando a seção sem alteração da sua forma, como na Figura 2.3(e). O encurtamento que ocorre em peças sujeitas a compressão também é considerado como flambagem global. A Figura 2.3(a,b,c,d,e) ilustra os principais modos de deformação para uma coluna tipo  $U_e$  arbitrária.



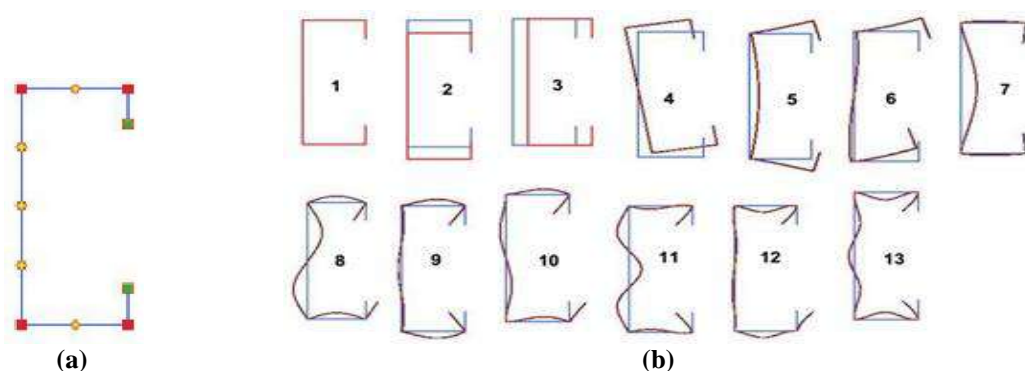
**Figura 2.3. Modos de deformação da seção  $U_e$  (a) local, (b)(c) distortional, (d) global por flexão na maior inércia e (e) global por flexo-torção (ou torsional) (HANCOCK et al., 1994; GARCIA, 2015 – Adaptada).**

Esses modos de deformação, bem como a curva  $P_{cr}$  versus  $L$  com a participação modal, podem ser obtidos através do programa *GBTul* (BEBIANO et al. 2008, 2010a,b), baseado na Teoria Generalizada de Vigas (em inglês *Generalized Beam Theory – GBT*). Este programa de livre acesso é uma ferramenta eficaz para a realização de análises de flambagem, e exige como dados de entrada as propriedades elásticas do material e as dimensões da seção transversal da barra.

A análise da seção transversal no *GBTul* resulta em um conjunto de modos de deformação ( $N_d$  – Equação 2.1), que ilustram as possibilidades existentes de deformações a serem contabilizadas (BEBIANO et al., 2010a). A quantidade de modos de deformação depende do número de paredes ( $n$ ) e de nós intermediários ( $m$ ). A Figura 2.4(a) indica os nós naturais e intermediários através de pontos vermelhos e amarelos, respectivamente. Os nós de extremidade são sempre tratados como nós naturais e intermediários concomitantemente (pontos verdes).

$$N_d = n + 1 + m \quad (\text{Eq. 2.1})$$

A Figura 2.4(b) apresenta os 13 primeiros modos de deformação no plano para uma seção  $U_e$ : (i) os 4 primeiros modos são os globais de corpo rígido, onde o modo 1 é o encurtamento axial, os modos 2 e 3 são a flexão na maior e na menor inércia, respectivamente e, o modo 4 é o torsional, (ii) os modos 5 e 6 são distorcionais e (iii) os demais modos são locais de placa, envolvendo exclusivamente deformações nas paredes (este número é igual ao número de nós intermediários considerados,  $m$ ). Dependendo da geometria (dimensões da seção transversal e comprimento) e condição de apoio, qualquer um destes modos de deformação pode ser denominado crítico. É importante ressaltar que apenas as seções com pelo menos 4 paredes apresentam os modos distorcionais.



**Figura 2.4.** Seção transversal  $U_e$  analisada no *GBTul* (a) discretização nodal e (b) modos de deformação no plano (BEBIANO *et al.*, 2010a).

Outro resultado da análise de flambagem realizada no *GBTul* é a "curva de assinatura"<sup>9</sup> (carga crítica *versus* comprimento das barras). No caso das colunas apoiadas, conforme exemplificado pela Figura 2.5(a), o "ponto mínimo" na curva  $P_{cr}$  *versus*  $L$  corresponde a cargas críticas que levam à instabilidade local e distorcional em uma determinada faixa. Nas colunas engastadas, essa curva é bastante diferente, como mostra a Figura 2.5(b), não apresentando um ponto mínimo. Dessa forma, para verificar o modo de flambagem da barra em análise é necessário avaliar a participação modal.

<sup>9</sup> Diz-se curva de assinatura, força crítica *versus* comprimento ( $P_{cr} \times L$ ), quando se considera mais de 1 semi-onda associada ao modo crítico de flambagem.

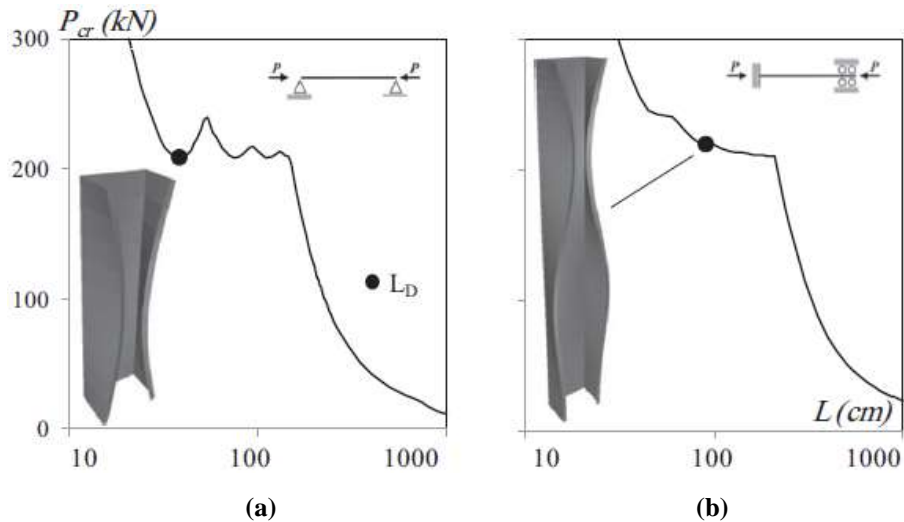


Figura 2.5. Curva  $P_{cr}$  versus  $L$  de colunas com as condições (a) apoiada e (b) engastada (LANDESMANN & CAMOTIM, 2013), com destaque para o modo de flambagem distorcional.

A Figura 2.6 apresenta a curva  $P_{cr}$  versus  $L$  de uma coluna tipo  $U_e$  perfurada e apoiada. Observa-se que o modo distorcional de flambagem ocorre em comprimentos de onda maiores que os da flambagem local (HANCOCK *et al.*, 1994, SCHAFER, 2000) e, a presença das perfurações em colunas de PFF's, reduz as cargas críticas de flambagem global (flexão e torção) e distorcional, fato que aumenta a esbeltez e reduz a resistência estimada, conforme ilustra a Figura 2.7, com destaque para a flambagem distorcional, além do aumento da tendência dessa iniciar no furo (KESTI, 2000; MOEN & SCHAFER, 2011).

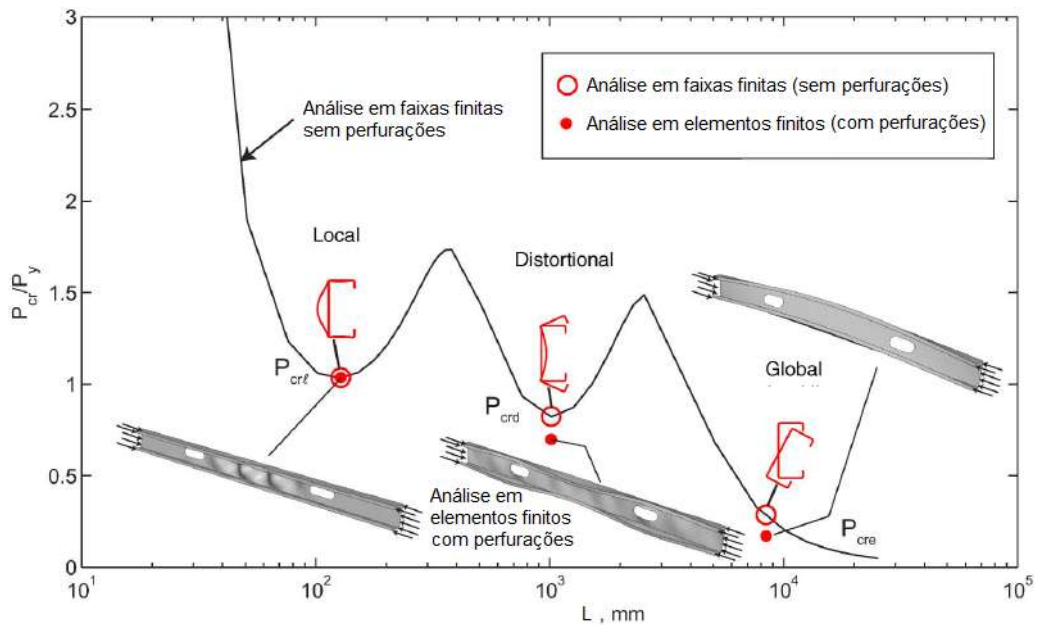


Figura 2.6. Curva  $P_{cr}$  versus  $L$  esquemática para uma coluna  $U_e$  apoiada apresentando as cargas críticas local, distorcional e global com e sem perfurações (MOEN & SCHAFER, 2011 – Adaptada).

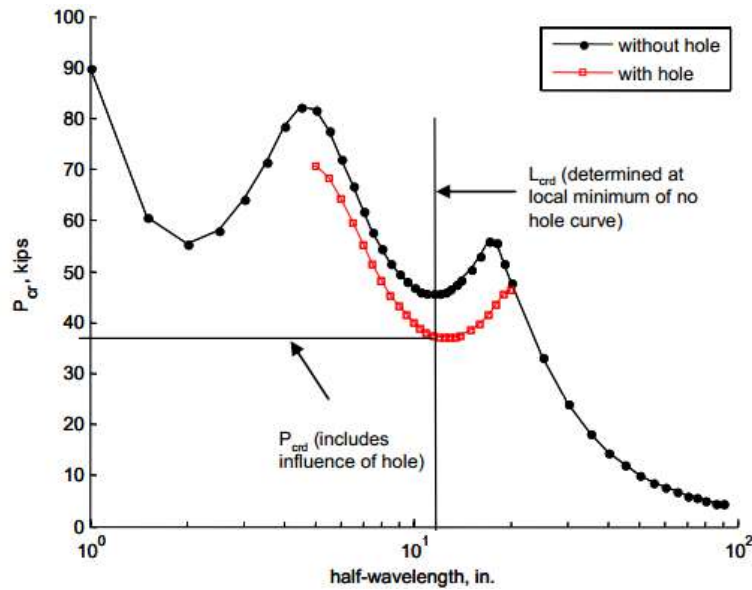


Figura 2.7. Curva  $P_{cr}$  versus  $L$  de colunas maciças e perfuradas com destaque para as flambagem distorcional (MOEN & SCHAFER, 2009).

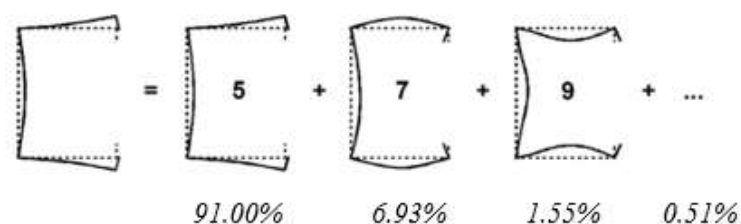
Para aproximar a influência de uma ou mais perfurações na tensão crítica de flambagem elástica em placas (enrijecidas ou não) sujeitas à compressão ou ao momento fletor, MOEN & SCHAFER (2009) elaboraram, validaram e descreveram expressões. Estudos paramétricos através do MEF mostraram que os furos desenvolvem um tipo de flambagem que pode aumentar ou reduzir a tensão crítica elástica de flambagem dependendo do espaçamento e da geometria da perfuração. A Figura 2.8(a,b) ilustra o comportamento de uma placa apoiada submetida a compressão sem e com uma perfuração, respectivamente, mostrando que a flambagem se concentra no furo.



Figura 2.8. Comportamento de uma placa apoiada submetida a compressão (a) sem e (b) com perfurações (MOEN & SCHAFER, 2009).

O modo de flambagem consiste em uma combinação dos modos de deformação existentes, ou seja, uma coluna com flambagem claramente distorcional pode possuir participação de outros modos. Dessa forma, para classificar qual o tipo de flambagem predominante – local, distorcional ou global – deve ser considerada a porcentagem de participação de cada modo. Segundo SCHAFER (2000), o modo distorcional é predominante, em uma típica coluna  $U_e$ , quando a largura da mesa se aproxima da altura

da alma e a carga crítica distorcional diminui ao mesmo tempo que a local aumenta. Dessa forma, seções aproximadamente quadradas tendem a apresentar maiores participações modais distorcionais, enquanto seções transversais com mesas estreitas (menos de 1/6 da altura da alma) são normalmente controlados pelo modo de flambagem local (SCHAFER, 2000). LANDESMANN *et al.* (2013) concluíram ainda que, dentre outros resultados, existe uma correlação entre a participação modal e a relação alma/mesa ( $h/b$ ). A Figura 2.9 ilustra um exemplo de decomposição modal do  $GBT_{ul}$  para uma coluna tipo  $U_e$  sob a ação da flambagem distorcional.



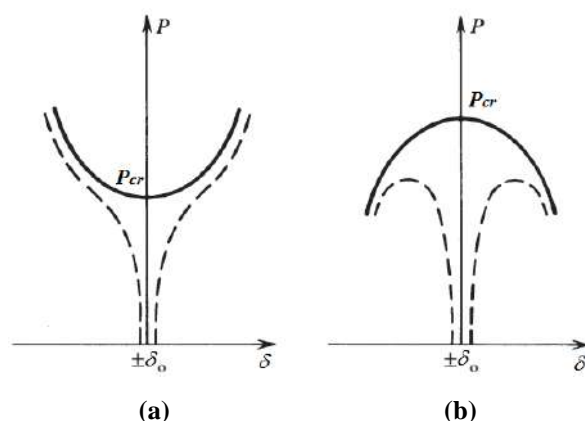
**Figura 2.9. Decomposição modal obtida através do  $GBT_{ul}$ , onde o modo distorcional é predominante na seção transversal da coluna (GARCIA, 2015).**

Adicionando enrijecedores intermediários longitudinais na seção transversal dos elementos, aumenta-se consideravelmente a carga de flambagem local e o modo de flambagem distorcional torna-se predominante. Para as colunas  $U_e$ , o modo distorcional não é predominante em seções transversais com abas longas (enrijecedores longos). Apesar de notar-se uma redução na carga crítica distorcional quando o enrijecedor das abas é alongado, observa-se uma redução ainda maior da carga crítica local, de forma que, abas longas acionam o modo local e retardam a ocorrência do modo distorcional. Além disso, membros com falha distorcional possuem maior sensibilidade a imperfeições, menor capacidade pós-flambagem que o modo local e, a flambagem distorcional pode controlar o mecanismo de falha mesmo quando a tensão elástica na flambagem distorcional é maior que a local (SCHAFER, 2000).

### 2.1.2 Pós-flambagem e carga última

A flambagem é influenciada por diversos fatores. Além da esbelteza, a resistência ao colapso também depende das imperfeições geométricas iniciais, das tensões residuais e dos efeitos da plasticidade (não-linearidades) do material. Quando se considera colunas submetidas a um carregamento de compressão axial, inicialmente pode ocorrer

um encurtamento devido à aplicação da carga e, em seguida, ao alcançar a carga crítica, a coluna pode aumentar ou reduzir a sua rigidez. A Figura 2.10 apresenta as trajetórias de equilíbrio elástico, onde as linhas sólidas ilustram o comportamento dos membros perfeitos e as linhas tracejadas indicam o comportamento teórico para o mesmo membro quando apresentam um determinado grau de imperfeição ( $\delta_0$ ). Se a carga suportada pela estrutura após a flambagem cresce com o aumento da deformação, conforme mostrado na Figura 2.10(a), a estrutura tem uma trajetória de pós-flambagem estável. Entretanto, se a carga diminui sem atingir a carga crítica, como indicado na Figura 2.10(b), a coluna tem uma trajetória de pós-flambagem instável.

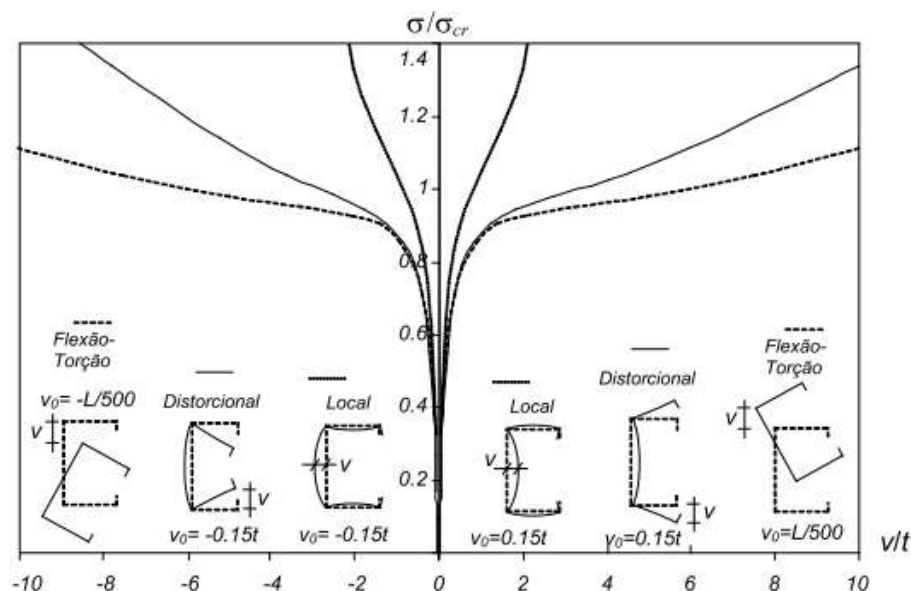


**Figura 2.10. Trajetórias de equilíbrio da pós-flambagem elástica para as colunas com e sem imperfeição inicial: (a) estável, (b) instável (ZIEMIAN, 2010).**

HANCOCK (1984) verificou que, quanto à pós-flambagem, ao contrário do modo de flambagem local, o modo distorcional não apresenta reserva pós-crítica significativa antes do aço atingir a tensão de escoamento. Em seguida, LAU & HANCOCK (1988) descreveram e analisaram os resultados de ensaios experimentais de colunas engastadas CH ( $U_e$ ), RA (rack), RL (rack enrijecido) e HA (*hat*) formadas através do dobramento e submetidas a compressão, não obtendo novamente reserva pós-flambagem relevante. Entretanto, KWON & HANCOCK (1992) realizaram testes de compressão em colunas engastadas de seções  $U_e$ , com e sem enrijecedores na alma e observaram uma reserva pós-crítica significativa no modo distorcional, mesmo quando as flambagem local e distorcional ocorrem simultaneamente.

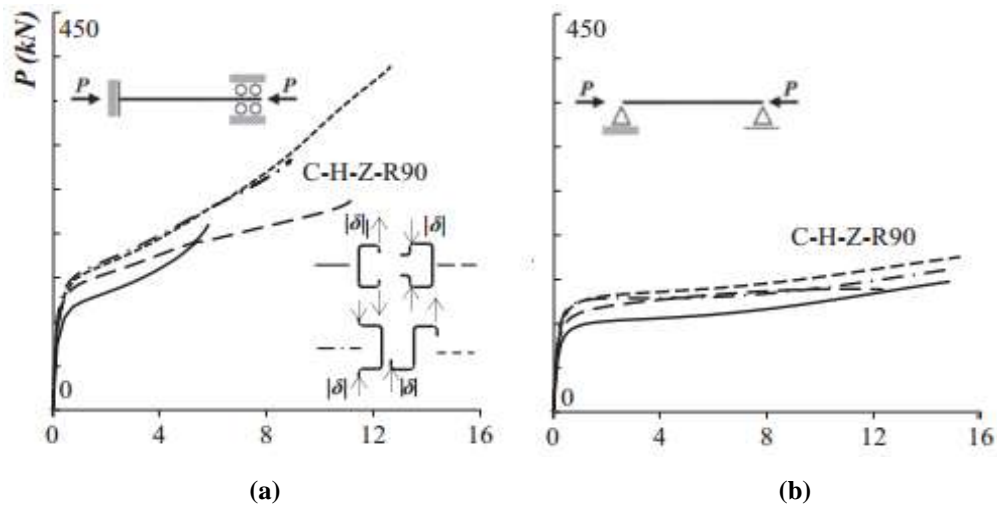
As imperfeições iniciais, normalmente de pequenas magnitudes, não afetam significativamente o comportamento dos sistemas estáveis na pós-flambagem. No entanto, possui um efeito considerável sobre os com pós-flambagem instável, onde qualquer variação amplifica os efeitos. Essas estruturas são referidas como sensíveis a

imperfeições (ZIEMIAN, 2010). A Figura 2.11 ilustra os 3 tipos de trajetórias de equilíbrio de pós-flambagem para uma seção  $U_e$  de um sistema estável: (i) local, onde a resistência pós-crítica é elevada, (ii) distorcional, para valores intermediários e (iii) global, com baixa resistência pós-crítica (CAMOTIM *et al.*, 2006).



**Figura 2.11.** Trajetórias de equilíbrio da pós-flambagem elástica para um sistema estável (CAMOTIM *et al.*, 2006).

LANDESMANN & CAMOTIM (2013) relataram resultados da análise numérica sobre a influência da geometria da seção transversal e das condições de apoio no comportamento de pós-flambagem de colunas com falha no modo de flambagem distorcional. As colunas analisadas apresentam (i) apoios: engastado ( $F$ ), apoiado-engastado ( $P-F$ ), apoiado ( $P$ ) e engastado-livre ( $F-F$ ) e (ii) seções transversais:  $U_e$  ( $C$ ), Cartola ( $H$ ),  $Z$  e rack ( $R$ ). A Figura 2.12 ilustra, para as colunas engastadas e apoiadas, a carga aplicada ( $P$ ) *versus* o deslocamento normalizado  $|\delta|/t$ , onde  $|\delta|$  é o deslocamento transversal máximo absoluto ocorrendo na ligação mesa-enrijecedor do perfil e  $t$  é a espessura da parede. Dentre outros resultados, concluíram que a máxima carga de pós-flambagem reduz conforme a condição de apoio, de acordo com a seguinte sequência:  $F$ ,  $P-F$ ,  $P$  e  $F-F$ .



**Figura 2.12. Trajetórias de equilíbrio da pós-flambagem elástica  $P$  vs.  $|\delta|/t$ , para as colunas C-H-Z-R90<sup>10</sup> com as condições de apoio (a) F e (b) P (LANDESMANN & CAMOTIM, 2013)**

As curvas apresentadas pela Figura 2.12 representam as trajetórias de equilíbrio elásticas. Para determinar a carga última de uma coluna é necessário considerar as imperfeições iniciais, considerando na trajetória de equilíbrio as não-linearidades física e geométrica. Na maioria dos casos, o colapso de uma estrutura de aço ocorre devido a uma interação entre os fenômenos de instabilidade e plasticidade. Dessa forma, o colapso ocorre devido à instabilidade na fase elasto-plástica (REIS & CAMOTIM, 2001), sendo por isso necessário avaliar o comportamento de pós-flambagem elasto-plástica. Quando um elemento comprimido perde a capacidade de suportar o aumento de carga e de deformação, a carga última foi atingida. Esta carga configura o pico da trajetória de equilíbrio da pós-flambagem elasto-plástica. A Figura 2.13 ilustra trajetórias de equilíbrio elasto-plástica para colunas com condições de apoio F e P, caracterizada pela curva carga aplicada normalizada ( $P/P_{cr,D}$ ) vs.  $|\delta|/t$ . LANDESMANN & CAMOTIM (2013) verificaram que: (i) dentre as trajetórias de equilíbrio analisadas, as colunas com seção tipo rack possuem as trajetórias menos pronunciadas, o que significa que também possuem as menores resistências pós-crítica quando comparadas com as demais seções estudadas (C, H e Z), (ii) nos casos apoiados, essa resistência pós-crítica é mínima ou inexistente nas seções rack e cartola, (iii) após o pico (círculos brancos), as colunas não são mais capazes de suportar aumentos de carga, apresentando decréscimo desta enquanto o deslocamento aumenta. Este pico indica o máximo valor para a relação  $P/P_{cr,D}$ , onde  $P$  é a carga última (denominado como  $P_u$ ). É importante

<sup>10</sup> Colunas C-H-Z90 de dimensões 90x70x10x2mm e R90 com 90x70x10x10x2mm.



mencionar que a carga última está diretamente relacionada à tensão de escoamento ( $f_y$ ), conforme ilustra a Figura 2.14, notando-se que, com o aumento do  $f_y$ , o  $P_u$  cresce. Dessa forma, a proximidade entre o início do escoamento e o colapso é muito maior na coluna com  $f_y$  menor (no caso  $f_y=355$  MPa), menos dúctil. Devido à distribuição de tensões ser “praticamente uniforme” na seção do meio do vão, observa-se a formação de uma “rótula plástica” localizada nesse ponto e resultante do modo de flambagem distorcional. Essa “rótula plástica” é associada a um mecanismo de colapso que envolve a formação de “charneiras plásticas” na alma, na mesa e nos enrijecedores (CAMOTIM *et al.*, 2006).

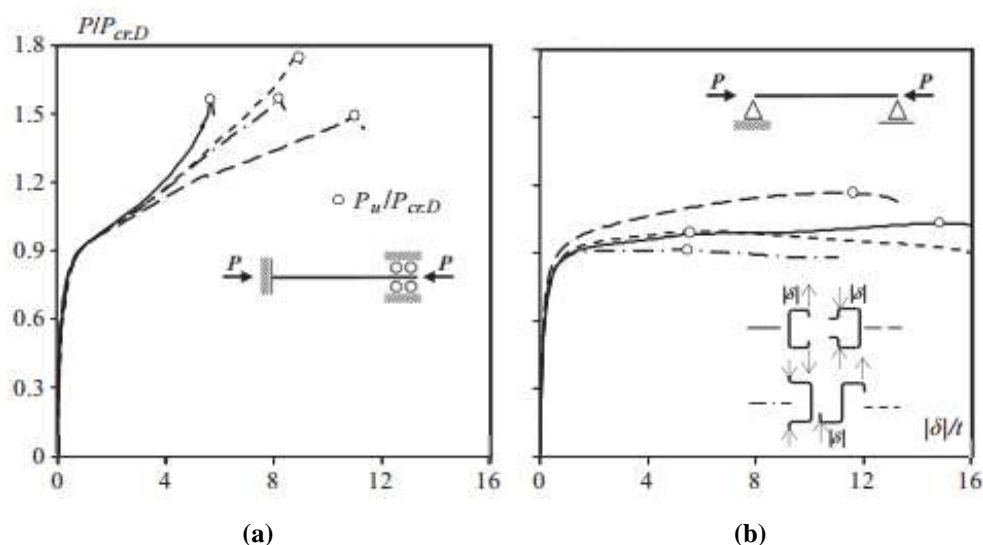


Figura 2.13. Trajetórias de equilíbrio da pós-flambagem elasto-plástica distorcional ( $P/P_{cr,D}$  vs.  $|\delta|/t$ ), para as colunas C-H-Z-R90 com as condições de apoio (a) F e (b) P (LANDESMANN & CAMOTIM, 2013).

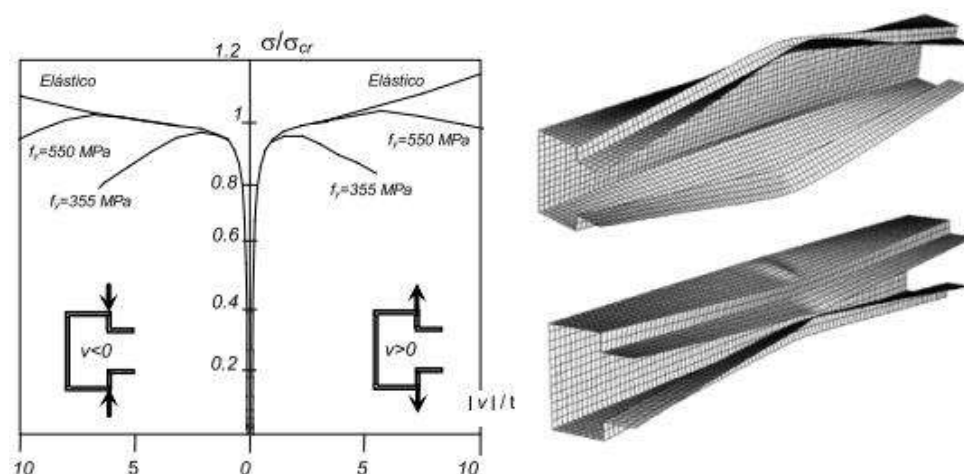
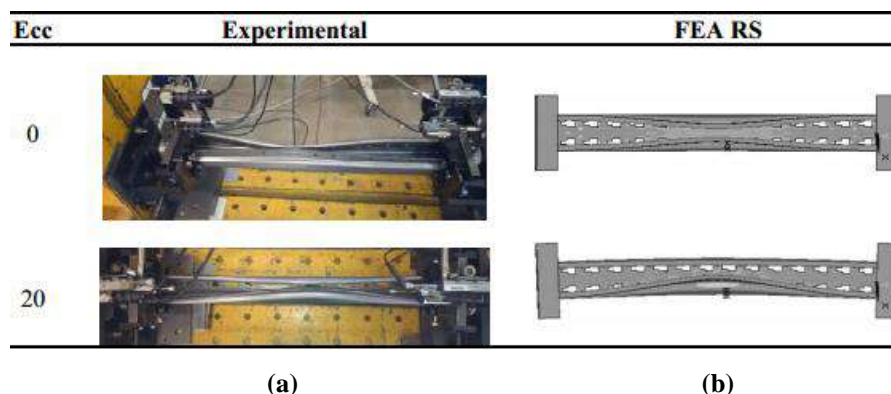


Figura 2.14. Trajetórias de equilíbrio da pós-flambagem elasto-plástica distorcional ( $\sigma/\sigma_{cr,D}$  vs.  $|v|/t$ ), para colunas rack (CAMOTIM *et al.*, 2006).

Recentemente, BONADA *et al.* (2015) analisaram a influência do momento fletor na capacidade de carga de colunas de PFF tipo rack perfuradas e sujeitas a carga axial excêntrica aplicada. Testes experimentais foram realizados para reproduzir as condições de carga, comparar e validar os resultados dos modelos de elementos finitos, onde foram consideradas as tensões residuais e o encruamento. A Figura 2.15 apresenta os testes experimentais e numéricos realizados, sendo possível observar que o aumento da excentricidade (Ecc) modifica a deformação obtida após a flambagem.



**Figura 2.15.** Falha distorcional em colunas tipo rack após a realização de testes (a) experimentais e (b) numéricos sob a ação de uma carga excêntrica de compressão (BONADA *et al.*, 2015).

Entretanto, TROUNCER & RASMUSSEN (2015) analisaram os efeitos dos momentos de segunda ordem gerados pela flambagem local e/ou por distorcional das colunas perfuradas tipo rack que compõe as estruturas de armazenamento industrial. Para tal, executaram um programa experimental composto de estruturas com colunas esbeltas perfuradas ultra finas (Figura 2.16) e calibraram um modelo de elementos finitos para prever a carga existente em cada coluna da estrutura de armazenamento com seção transversal cada vez mais esbelta, objetivando obter resultados de carga última para comparar com as previsões de dimensionamento.

Enquanto isso, FIROUZIANHAJI *et al.* (2015) relataram o comportamento não-linear das conexões viga-coluna aparafusadas em estruturas porta-*pallets* compostas por perfis rack, executando testes experimentais e obtendo o efeito das dimensões da seção transversal da viga no comportamento dessas conexões, ao mesmo tempo que SHARIATI *et al.* (2016) realizaram análises numéricas e experimentais para identificar os efeitos de vários parâmetros que podem afetar o desempenho geral dessas ligações viga-coluna. A Figura 2.17 ilustra uma conexão aparafusada típica.



Figura 2.16. Exemplo de ensaio realizado por TROUNCER & RASMUSSEN (2015).

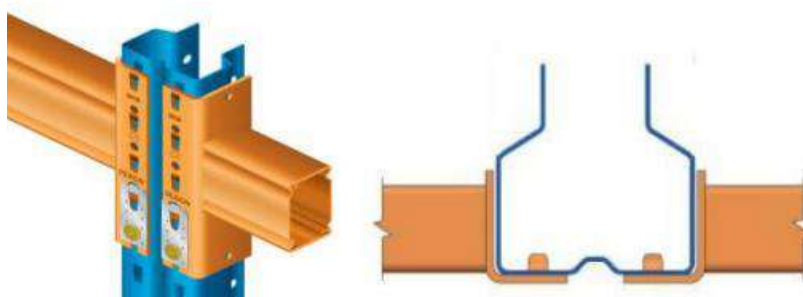


Figura 2.17. Conexão típica viga-coluna aparafusada (FIROUZIANHAJI *et al.*, 2015).

## 2.2 Métodos de Dimensionamento

Atualmente, três métodos de dimensionamento constam na norma brasileira de PFF (ABNT NBR 14762:2010): o clássico Método da Largura Efetiva (MLE), o Método da Seção Efetiva (MSE – proposto por BATISTA, 2010) e o Método da Resistência Direta (MRD), desenvolvido recentemente. Este último será enfatizado devido à adequabilidade no dimensionamento de colunas sob a ação da flambagem distorcional.

### 2.2.1 Método da Largura Efetiva (MLE)

Tradicionalmente utilizado até o final do século XX para as verificações de segurança de PFF's, o MLE considera que apenas uma parcela da seção transversal do elemento contribui para a resistência do mesmo. Originalmente, foi proposto por Von Karman e adotado para PFF por Winter na Universidade de Cornell (HANCOCK *et al.*, 2001). Trata-se de um método aproximado que analisa as chapas constituintes do perfil como isoladas, considerando as condições de apoio das chapas vizinhas e reduzindo as larguras das placas a fim de calcular as novas propriedades geométricas da seção, de

forma que não se torna adequado ao dimensionamento de peças com a ocorrência da flambagem distorcional, além de ter sido proposto para perfis com falha no modo local ou global. Segundo SCHAFER (2008), à medida em que a seção transversal torna-se mais complexa, dificulta-se a determinação da seção efetiva.

Em 1994, foi considerado na norma americana vigente (AISI:1986) que o MLE não se mostra adequado para abordagem da flambagem distorcional em seções tipo *U*, compostas de aço de alta resistência, sendo necessárias outras alternativas e métodos de dimensionamento para flambagem distorcional (HANCOCK et al., 1994). Além disso, posteriormente os testes conduzidos por YU & SCHAFER (2003, 2006) mostraram que o MLE proposto na AISI:1996 é inadequado para verificar a flambagem distorcional.

### **2.2.2 Método da Seção Efetiva (MSE)**

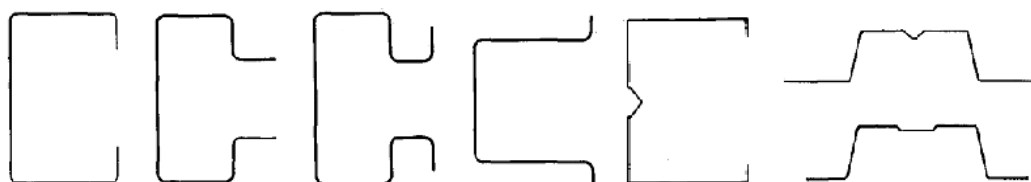
O Método da Seção Efetiva (MSE), é uma extensão do Método da Área Efetiva (MAE), originalmente proposto para colunas compostas de perfis formados a frio (BATISTA, 1988). De fato, as vantagens do MAE são as mesmas encontradas no Método da Resistência Direta: (i) para flambagem local da placa considera-se o comportamento da seção transversal, ao contrário do MLE que considera elementos isolados; (ii) apresenta curvas de resistência estrutural para as colunas, incluindo interações entre flambagem local e global e (iii) as regras para dimensionamento foram formuladas como no MRD (apresentado na seção seguinte – 2.2.3). A extensão dos princípios do MAE, para vigas com perfis formados a frio, permitiu a proposição de regras e equações a serem aplicadas para o projeto de aço de PFF, resultando no MSE, que substitui o MLE na ABNT NBR 14762:2010 (BATISTA, 2010).

O MSE, presente na norma brasileira (ABNT NBR 14762:2010), considera uma avaliação da área efetiva ao invés de tomar cada um dos elementos da seção transversal separadamente, sendo assim, mais simples que o MLE, conduzindo a resultados com a mesma precisão do MRD.

### **2.2.3 Método da Resistência Direta (MRD)**

O MRD originou-se de pesquisas realizadas por HANCOCK *et al.* (1994) e foi desenvolvido por SCHAFER E PEKÖZ (1998), objetivando evitar as dificuldades

existentes no MLE, caracterizado como trabalhoso. Inicialmente, KWON & HANCOCK (1992) criaram uma curva de dimensionamento para membros submetidos a flambagem distorcional, uma vez que a AISI S100:1986 se apresentou não conservativa para colunas engastadas de seção  $U_e$  submetidas a compressão e fabricadas com aços com tensão de escoamento de 550MPa. Em seguida, HANCOCK *et al.* (1994) descreveram uma série de testes em seções transversais de PFF's, ilustradas na Figura 2.18, realizados na Universidade de Sydney para determinar a carga última de membros no modo de flambagem distorcional pura ou com interação com o modo local. Os autores também propuseram e analisaram junto aos resultados obtidos duas curvas de dimensionamento para esses membros de PFF.



**Figura 2.18.** Seções transversais de PFFs analisadas na Universidade de Sydney (HANCOCK *et al.*, 1994).

Desde 1996, o MRD foi adotado pela norma australiana/neozelandesa e americana para a determinação da resistência à flambagem distorcional e, em 1998, SCHAFER & PEKOZ (1998) indicaram que o coeficiente de redução da flambagem local na AISI S100:1996 se destinava apenas para ser utilizado em conjunto com as expressões específicas do MLE e não é o coeficiente de deformação elástica distorcional. Esse método recebeu grandes contribuições de SCHAFER (2002, 2003, 2005, 2006), MOEN & SCHAFER (2008, 2009a,b, 2011), LANDESMANN & CAMOTIM (2013, 2015), CAMOTIM *et. al* (2006, 2007, 2010 a 2015) e, atualmente, encontra-se implementado nas normas norte-americana (AISI, 2016), australiana/neozelandesa (SA-SNZ, 2005), e brasileira NBR14762:2010 (Anexo C), pois apresenta uma metodologia racional e sistemática para o dimensionamento de barras com tipo de carregamento, mecanismos de colapso e seções transversais arbitrárias, permitindo assim a otimização das seções. Entretanto, exige um cálculo preciso da carga crítica do membro, que pode ser obtido através de métodos numéricos, com programas como o *CUFM* (LI & SCHAFER, 2010), *GBTul* ou *ANSYS*, que fornecem os resultados de estabilidade necessários.

O MRD adota curvas de dimensionamento do tipo "Winter", calibradas por análises experimentais e numéricas, que incluem os efeitos das imperfeições geométricas, tensões residuais geradas pelo dobramento a frio, dentre outros fatores. Baseia-se no cálculo da resistência da barra através das propriedades geométricas da seção e dos valores das tensões crítica elástica e de escoamento do aço para o cálculo da resistência última, abordando os modos de flambagem local, distorcional e global "puros" e suas interações.

SCHAFFER (2002) reuniu resultados numéricos existentes e disponíveis na literatura (LAU & HANCOCK (1987), KWON & HANCOCK (1992), HANCOCK *et. al* (1996)) para sua própria análise numérica, obtendo uma grande variedade de colunas. Ensaios de compressão foram realizados em (a)  $U_e$ , (b) rack, (c) rack enrijecido, (d) *Hat* e (e) *Sigma*, conforme ilustra a Figura 2.19. Com isso, foram propostas diferentes curvas de dimensionamento para cada modo de flambagem (D e L), conforme ilustra a Figura 2.20. Observa-se que para a carga última local, os valores de resistência  $P_{test}$ , encontram-se normalizados para a carga crítica de Euler  $P_e$ , enquanto para a carga última distorcional, a normalização de  $P_{test}$  ocorre para a carga de escoamento da coluna  $P_y$  (SCHAFFER, 2002).

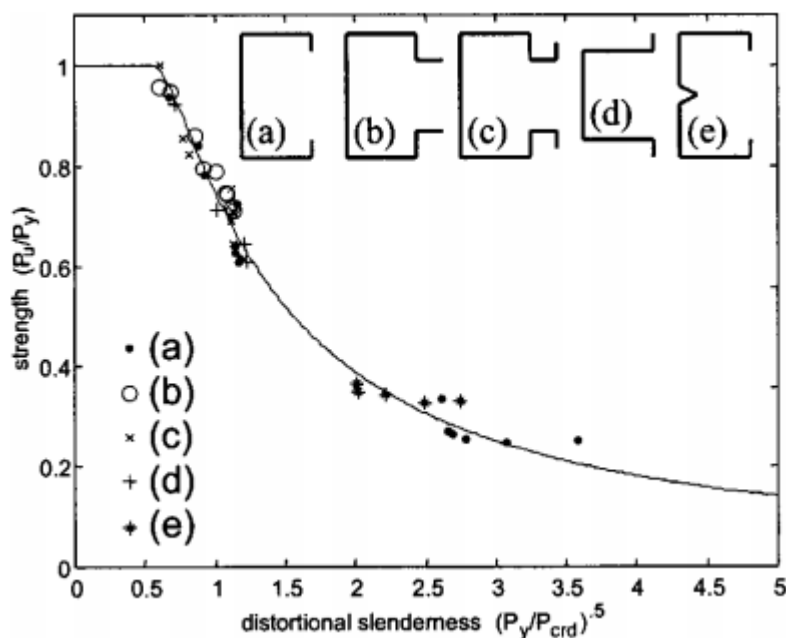


Figura 2.19. Resultados experimentais de carga última e curva de dimensionamento do MRD (SCHAFFER, 2002).

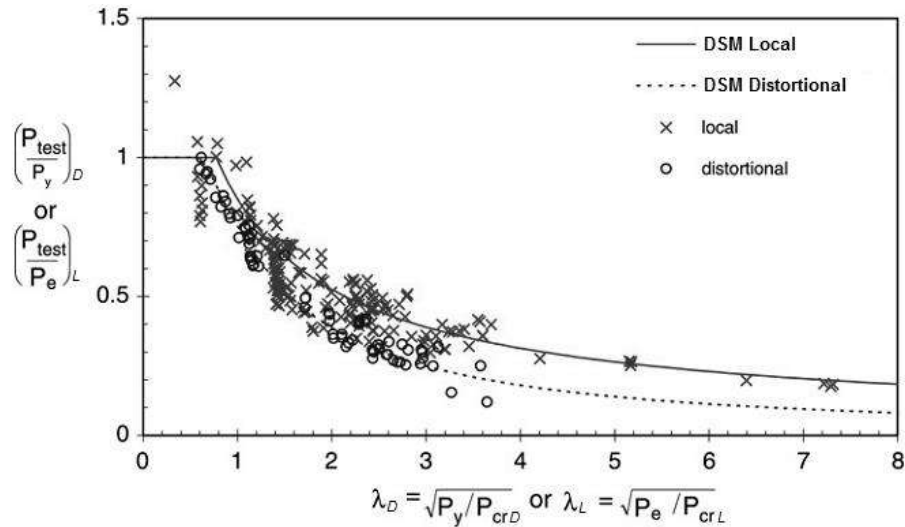


Figura 2.20. Esbeltez ( $\lambda$ ) versus carga normalizada de colunas existentes na literatura (SCHAFFER, 2002).

A curva do MRD dirigida à previsão da resistência última de colunas no modo de flambagem distorcional é expressa pela equação (2.2), observando-se ainda os limites de aplicabilidade apresentados na Figura 2.21, que reproduz a Tabela B4.1-1 da AISI S100:2016. Notar que há indicação de aços com  $f_y \leq 655$  MPa, conforme ilustra a Figura 2.21.

Criteria	Limiting Variables <sup>a</sup>	Effective Width Method	Direct Strength Method
Stiffened element in compression	$w/t_b$	$\leq 500$	$\leq 500$
Edge-stiffened element in compression	$b/t$	$\leq 90$ for $I_s \geq I_a$ $\leq 60$ for $I_s < I_a$	$\leq 160$
Unstiffened element in compression	$d/t_b$	$\leq 60$	$\leq 60$
Stiffened element in bending (e.g. a web)	$h/t$	$< 200$ for unstiffened web $\leq 260$ for bearing stiffener <sup>c</sup> $\leq 300$ for bearing and intermediate stiffener <sup>c</sup>	$\leq 300$
Inside bend radius	$R/t$	$\leq 10^d$	$\leq 20$
Simple edge stiffener length/width ratio	$d_o/b_o$	$\leq 0.7$	$\leq 0.7$
Edge stiffener type		Simple only	Simple and complex
Maximum number of intermediate stiffeners in w	$n_f$	4	4
Maximum number of intermediate stiffeners in b	$n_{fe}$	2	2
Number of intermediate stiffeners in h	$n_w$	0	4
Nominal yield stress	$F_y$	$< 80$ ksi (552 MPa) <sup>e</sup>	$< 95$ ksi (655 MPa) <sup>e</sup>

Figura 2.21. Limites de aplicabilidade para o MRD (Tabela B4.1-1 – AISI S100:2016).

$$P_{n.D} = \begin{cases} P_y, \text{ para } \lambda_D \leq 0,561 \\ \left(1 - 0,25 \left(\frac{P_{cr.D}}{P_y}\right)^{0,6}\right) \left(\frac{P_{cr.D}}{P_y}\right)^{0,6}, \text{ para } \lambda_D > 0,561 \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Investigações realizadas por SCHAFER & MOEN (2008, 2009, 2011) mostraram que o primeiro impacto da perfuração é reduzir a rigidez rotacional existente em membros submetidos a flambagem distorcional. Dessa forma, forneceram uma expressão para reduzir a espessura da seção e determinar a perda da capacidade de flambagem distorcional com uma semi-onda na seção sem furos, verificando posteriormente com modelos através do MEF com as perfurações. Além disso, identificaram que as colunas de PFF perfuradas, exibem cargas últimas que não foram adequadamente previstas pela curva atual de dimensionamento do MRD, realizando estudos comparativos entre colunas maciças e perfuradas e propondo modificações nas curvas de dimensionamento de acordo com a relação entre a área líquida<sup>11</sup> e bruta da seção ( $A_{net}/A_g$ ). Foram analisadas as seguintes proporções: 1,0, 0,9, 0,8, 0,7 e 0,6 e propostas 3 faixas para compor a curva de dimensionamento, conforme apresenta a equação 2.3. As faixas de esbeltez distorcional,  $P_{d2}$ ,  $P_{ynet}$  e  $A_{net}$  são mostradas nas equações 2.4 a 2.9. A Figura 2.22 ilustra a curva de dimensionamento do MRD proposta para  $A_{net}/A_g = 0,7$  e  $0,6$ . Atualmente, a norma americana AISI S100:2016 incluiu essa metodologia a fim de considerar a influência das perfurações.

$$P_{n.D}^{M\&S} = \begin{cases} P_{ynet}, \text{ para } \lambda_D \leq \lambda_{d1} \\ P_{ynet} - \left[\frac{(P_{ynet} - P_{d2})}{(\lambda_{d2} - \lambda_{d1})}\right] \lambda_d, \text{ para } \lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2} \\ \left(1 - 0,25 \left(\frac{P_{cr.D}}{P_y}\right)^{0,6}\right) \left(\frac{P_{cr.D}}{P_y}\right)^{0,6} P_y, \text{ para } \lambda_D > 0,561 \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde:

$$\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crd}} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$\lambda_{d1} = 0,561 (P_{ynet} / P_y) \quad (\text{Eq. 2.5})$$

$$\lambda_{d2} = 0,561 (14 (P_{ynet} / P_y)^{0,4} - 13) \quad (\text{Eq. 2.6})$$

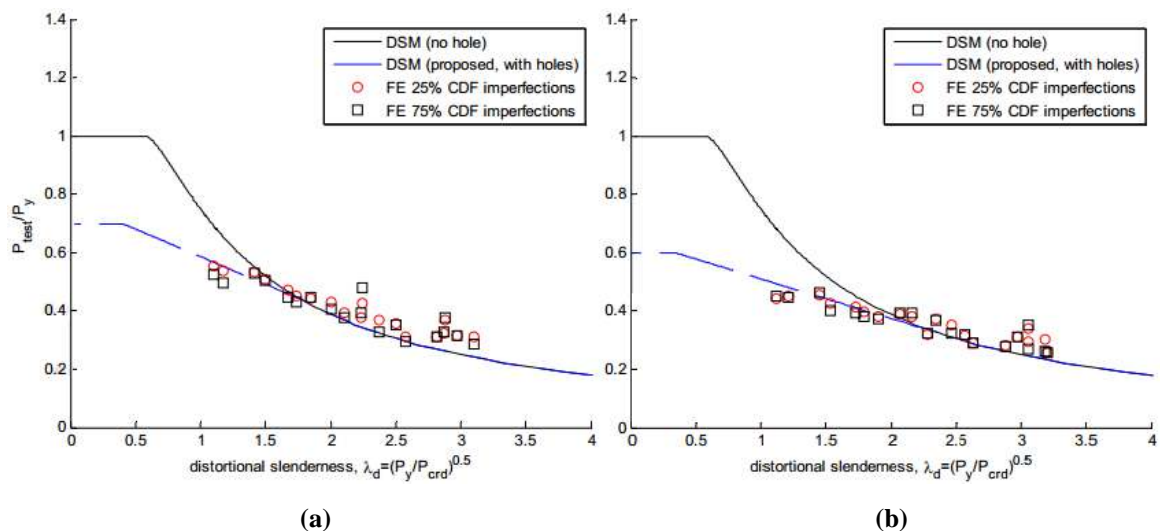
$$P_{d2} = \left(1 - \left(1 - 0,5 \lambda_{d2}^{-1,2}\right)^2\right) P_y \quad (\text{Eq. 2.7})$$

$$P_{ynet} = F_y A_{net} \geq 0,6 P_y \quad (\text{Eq. 2.8})$$

$$A_{net} = A_g - A_{furos} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

<sup>11</sup> A área líquida da seção transversal perfurada é determinada pela diferença entre a área bruta e a área dos furos na seção com a maior área de perfurações.





**Figura 2.22. Curva de dimensionamento do MRD (sem perfurações) e modificada para as proporções  $A_{neel}/A_g =$  (a) 0,7 e (b) 0,6 (SCHAFER & MOEN, 2008).**

Em seguida, CASAFONT *et. al* (2011) apresentaram uma investigação experimental sobre o comportamento de colunas de PFF tipo rack de estruturas de armazenamento submetidas a compressão. Barras de diferentes comprimentos foram testados, com atenção especial no comportamento das colunas que têm comprimentos que as tornam sujeitas à flambagem distorcional. Além disso, verificou-se que, embora o efeito da interação entre os modos na resistência das colunas não seja grande, a precisão dos procedimentos de dimensionamento atuais melhora se a flambagem distorcional for considerada nos cálculos. É importante mencionar que duas mudanças foram introduzidas no Método da Resistência Direta (MRD) para incluir o efeito das perfurações: utilização da área líquida da seção transversal e utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) para a determinação da carga de flambagem elástica.

Investigações experimentais realizadas por TROUNCER & RASMUSSEN (2014) sobre o comportamento de estruturas porta-pallets compostas de perfis rack ultra finos sujeitos a cargas de compressão e com colunas sob o efeito combinado da LD (Local e Distorcional) e LDG, sendo a global do tipo flexo-torsional, mostraram que a EN 15512 (2009) é mais precisa na determinação das cargas últimas de seções com interação entre os modos de flambagem do que a AS/NZS 4804 (2012) e a RMI (2008). Simultaneamente, SIMONCELLI *et al.* (2014) realizaram um estudo comparativo entre as regras de dimensionamento para estruturas de aço adotadas pelas normas europeia (EC3) e americana (ANSI), destacando as diferenças associadas entre as alternativas de projeto admissíveis e considerando, dentre outros fatores, a capacidade de carga transportada. BERNUZZI *et al.* (2014) analisaram ainda seções monossimétricas tipo

rack de estruturas porta-*pallets* propondo fatores de segurança para serem utilizados quando o dimensionamento não considerar a influência do empenamento da seção na resistência.

No ano seguinte, BERNUZZI & MAXENTI (2015) executaram análises numéricas para verificar o desempenho de colunas isoladas maciças e perfuradas sob a ação de carga axial de compressão e momento, concluindo que as normas europeias atuais necessitam de algumas revisões a fim de garantir a segurança no dimensionamento quanto a flambagem das vigas e colunas das estruturas porta-*pallets*. Enquanto isso, BERNUZZI *et al.* (2015) realizaram estudos sobre os métodos de dimensionamento estáticos adotados na Europa (EN 15512) para as estruturas porta-*pallets* compostas por perfis tipo rack, apresentando desde a seleção do método de análise elástica (1ª ou 2ª ordem) até as regras de dimensionamento quanto a resistência e estabilidade. Os resultados obtidos ilustram os pontos fracos das normas europeias para os racks de estruturas porta-*pallets*, apontando quando os procedimentos recomendados falham e ocasionam um dimensionamento inseguro. Posteriormente, BERNUZZI & SIMONCELLI (2015) analisaram a interação entre a carga axial e os momentos fletores em colunas de PFF tipo rack quanto as normas europeias (EN15512, EN 1993-1-1 e EN 1993-1-3).

Recentemente, LANDESMANN *et. al* (2017), realizaram análises numéricas de 4 tipos de seções (C-H-Z-R) no ANSYS e propuseram uma curva ajustada baseada no MRD para o dimensionamento de seções apoiadas e engastadas, sujeitas a diversas temperaturas e a flambagem distorcional, simulando as condições ambiente e de incêndio. Verificou-se que essas curvas apresentam maior segurança e precisão na determinação da carga última, tornando-se uma opção mais adequada de dimensionamento. A equação (2.10) apresenta a formulação adotada e a Figura 2.23 ilustra a comparação entre a curva proposta (linha azul) e a normativa (linha preta).

$$P_{n.D}^L = \begin{cases} P_y, & \text{para } \lambda_D \leq 0,561 \\ P_y \left[ 1 - 0,25 \left( P_{cr.D} / P_y \right)^{0,6} \right] \left( P_{cr.D} / P_y \right)^{0,6}, & \text{para } 0,561 < \lambda_D \leq 1,0 \\ P_y \left( 0,65 - 0,20 \left( P_{cr.D} / P_y \right)^{0,9} \right) \left( P_{cr.D} / P_y \right)^{0,9} P_y, & \text{para } \lambda_D > 1,0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

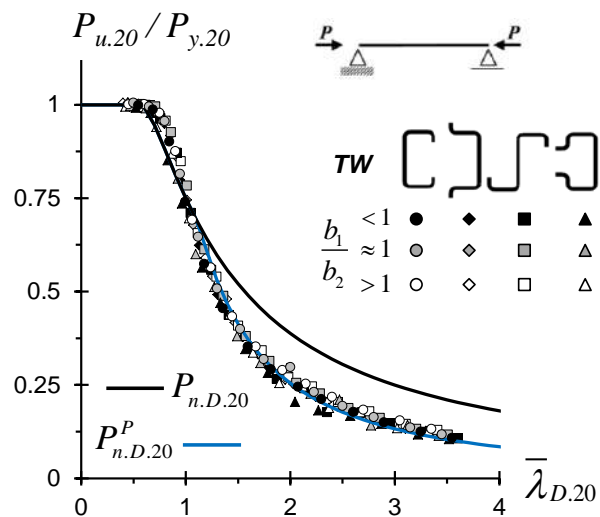


Figura 2.23. Curvas de dimensionamento do MRD proposta por LANDESMANN *et al.* (2017) em azul e pelo anexo C da ABNT NBR 14762:2010 em preto.

## 3 Análise de Flambagem

---

Este capítulo apresenta os critérios adotados para o procedimento de seleção de colunas e os resultados das análises de flambagem. As colunas analisadas são listadas com as dimensões da seção transversal e os comprimentos adotados, bem como são ilustradas algumas curvas  $P_{cr}$  versus  $L$  e participações modais mais relevantes.

### 3.1 Colunas maciças

A primeira etapa do presente trabalho consiste na seleção de seções de perfis tipo rack. Nesta fase, serão avaliadas as seções maciças e, para tal, utiliza-se o código *GBTul* (BEBIANO *et al.* 2010 (a,b)), seguido pela validação dos resultados no programa de elementos finitos *ANSYS* (SAS, 2009). Durante o processo de seleção, foram adotadas as seguintes premissas:

- (i) As seções sejam comerciais, ou seja, utilizadas pela indústria e, em especial, nos sistemas de armazenagem tipo porta-*pallets*, ilustradas pela Figura 3.1;
- (ii) Seções comerciais estudadas por LAU & HANCOCK (1988), denominadas RL;
- (iii) Seções RA, perfis onde o enrijecedor de bordo das seções RL foram retirados;
- (iv) As colunas apresentam flambagem distorcional “pura” e falha através do modo distorcional. Este objetivo é atingido garantindo-se que a carga crítica: ( $i_1$ ) seja visivelmente distorcional, com participação modal deste, preferencialmente, superior a 90%, embora existam casos analisados com até 77,6% e, ( $i_2$ ) esteja bem abaixo das menores cargas de bifurcação local e global;
- (v) Espessuras da seção transversal variando de 1,0 a 5,0 mm, condição de apoio engastada (F – fixa) e a existência ou não de enrijecedores intermediários e de bordo da seção rack, a fim de avaliar a influência na carga pós crítica distorcional e na carga última;
- (vi) Os comprimentos estão associados a carga crítica do modo distorcional referente a uma ou três semi-ondas, sendo adotado o menor comprimento crítico que atenda as condições anteriores.

As colunas em análise, resultantes do processo de seleção, possuem as dimensões das seções transversais apresentadas na Tabela 3.1. Adicionalmente, foram incluídas seções rack (RD) para fins de comparação e análise da influência do enrijecedor intermediário na estabilidade e participação modal das colunas RS.

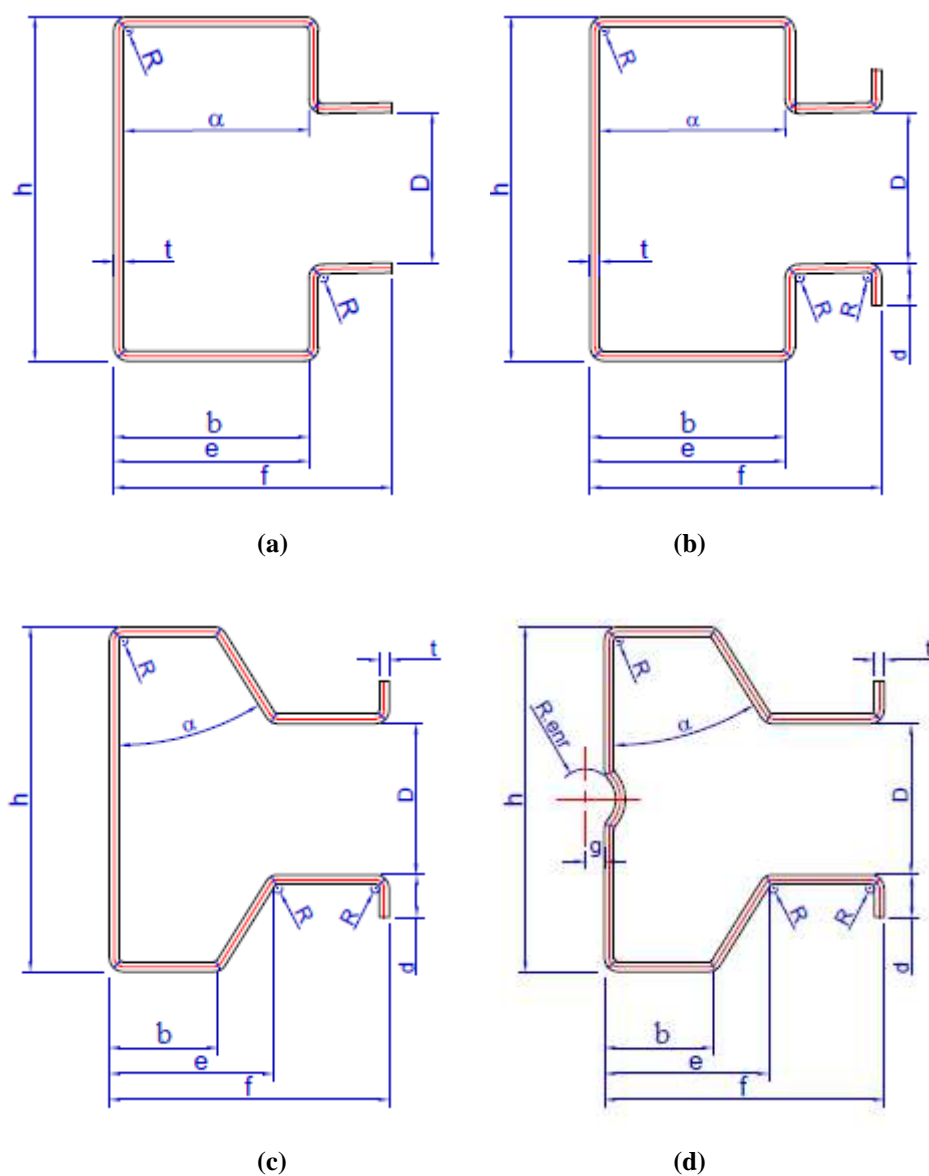


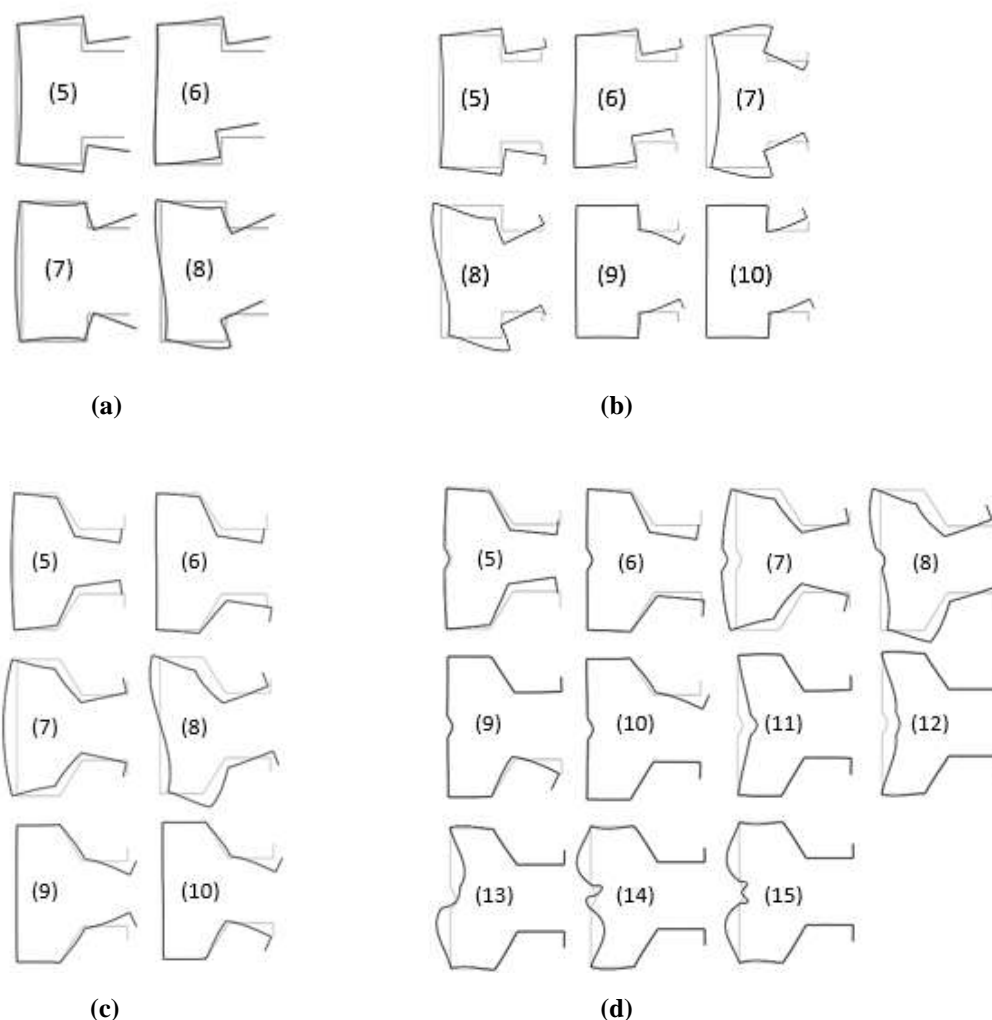
Figura 3.1. Seção transversal dos perfis (a) RA, (b) RL estudado por LAU & HANCOCK (1988), (c) RD e (d) RS (sendo  $R= 1\text{mm}$ ,  $R_{\text{enr}}= 7\text{ mm}$ ,  $\alpha=32^\circ$ ou  $90^\circ$  e  $g= 4,35\text{ mm}$ ).

**Tabela 3.1. Dimensões das seções transversais e área das seções RD, RS, RL e RA.**

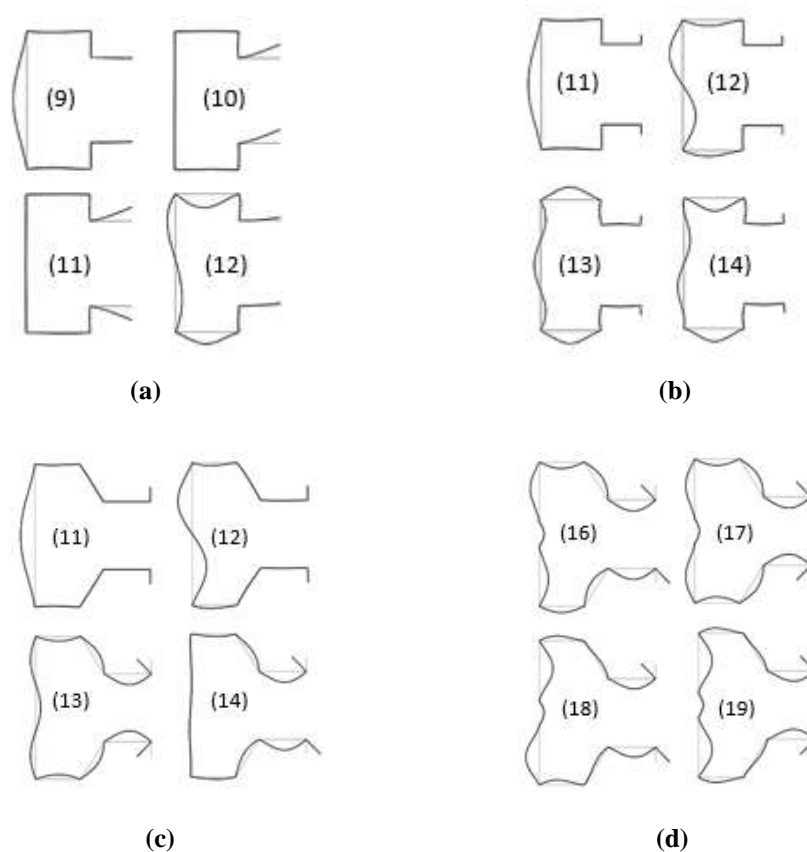
Seção	t	h	b	d	D	e	f	A
RA17_16.58	1,658	93	42,3	7,3	58,0	42,3	70,0	4,42
RA17_20	2	93	42,3	7,3	58,0	42,3	70,0	5,33
RA17_30	3	93	42,3	7,3	58,0	42,3	70,0	7,99
RA17_50	5	93	42,3	7,3	58,0	42,3	70,0	13,32
RA20_16.58	1,658	88	43,2	6,8	51,6	43,2	69,2	4,33
RA20_20.15	2,015	88	43,2	6,8	51,6	43,2	69,2	5,26
RA20_30	3	88	43,2	6,8	51,6	43,2	69,2	7,83
RA20_50	5	88	43,2	6,8	51,6	43,2	69,2	13,06
RA24_16.58	1,658	87	32,5	7,1	52,3	32,5	63,1	4,09
RA24_23.86	2,386	87	32,5	7,1	52,3	32,5	63,1	5,88
RA24_30	3	87	32,5	7,1	52,3	32,5	63,1	7,39
RA24_50	5	87	32,5	7,1	52,3	32,5	63,1	12,32
RL17_16.58	1,658	93	42,3	7,3	58,0	42,3	70,0	4,63
RL17_20	2	93	42,3	7,3	58,0	42,3	70,0	5,59
RL17_30	3	93	42,3	7,3	58,0	42,3	70,0	8,38
RL17_50	5	93	42,3	7,3	58,0	42,3	70,0	13,97
RL20_16.58	1,658	88	43,2	6,8	51,6	43,2	69,2	4,53
RL20_20.15	2,015	88	43,2	6,8	51,6	43,2	69,2	5,50
RL20_30	3	88	43,2	6,8	51,6	43,2	69,2	8,19
RL20_50	5	88	43,2	6,8	51,6	43,2	69,2	13,66
RL24_16.58	1,658	87	32,5	7,1	52,3	32,5	63,1	4,29
RL24_23.86	2,386	87	32,5	7,1	52,3	32,5	63,1	6,18
RL24_30	3	87	32,5	7,1	52,3	32,5	63,1	7,77
RL24_50	5	87	32,5	7,1	52,3	32,5	63,1	12,95
RD80_10	1	80	26,4	9,1	35,0	39,3	65,0	2,43
RD80_20	2	80	26,4	9,1	35,0	39,3	65,0	4,86
RD80_30	3	80	26,4	9,1	35,0	39,3	65,0	7,29
RD80_30_10.7	3	80	26,7	12,2	35,0	38,9	65,0	7,32
RD107_10	1	107	25,7	5,6	60,0	39,1	64,8	2,63
RD107_20	2	107	25,7	5,6	60,0	39,1	64,8	5,26
RD107_30	3	107	25,7	5,6	60,0	39,1	64,8	7,29
RD140_30	3	140	32,6	10,0	60,0	52,6	80,0	10,56
RD140_50	5	140	32,6	10,0	60,0	52,6	80,0	17,58
RS80_10	1	80	26,4	9,1	35,0	39,3	65,0	2,44
RS80_20	2	80	26,4	9,1	35,0	39,3	65,0	4,88
RS80_30	3	80	26,4	9,1	35,0	39,3	65,0	7,32
RS80_30_10.7	3	80	26,7	12,2	35,0	38,9	65,0	7,36
RS107_10	1	107	25,7	5,6	60,0	39,1	64,8	2,64
RS107_20	2	107	25,7	5,6	60,0	39,1	64,8	5,28
RS107_30	3	107	25,7	5,6	60,0	39,1	64,8	7,32
RS140_30	3	140	32,6	10,0	60,0	52,6	80,0	10,60
RS140_50	5	140	32,6	10,0	60,0	52,6	80,0	17,66

Nota: Todas as dimensões são dadas em mm, área (A) em cm<sup>2</sup>

Objetivando esclarecer a denominação de “flambagem local” e “flambagem distorcional” adotadas ao longo do trabalho, serão apresentados e discutidos os resultados provenientes da análise de flambagem no *GBTul*. De acordo com a definição de deformação distorcional e local, formulada considerando as seções planas e com a utilização da “linguagem” modal do *GBTul*, verifica-se que as colunas de perfis RA, RL, RD e RS possuem o modo de deformação distorcional “puro” quando apresentam a configuração representada pelo modo de flambagem dominante para um ou mais modos, conforme ilustrado pela Figura 3.2. Geralmente, tais modos são combinados com contribuições, maiores ou menores, dos modos de deformação locais, apresentados na Figura 3.3.



**Figura 3.2. Modos de deformação distorcional dos perfis de seção (a) RA, (b) RL, (c) RD e (d) RS.**



**Figura 3.3. Modos de deformação local nos perfis de seção (a) RA, (b) RL, (c) RD e (d) RS.**

A partir da análise comparativa dos modos de deformação obtidos no *GBTul* para as colunas de seção rack com e sem enrijecedor intermediários ou de bordo, as seguintes considerações podem ser apontadas:

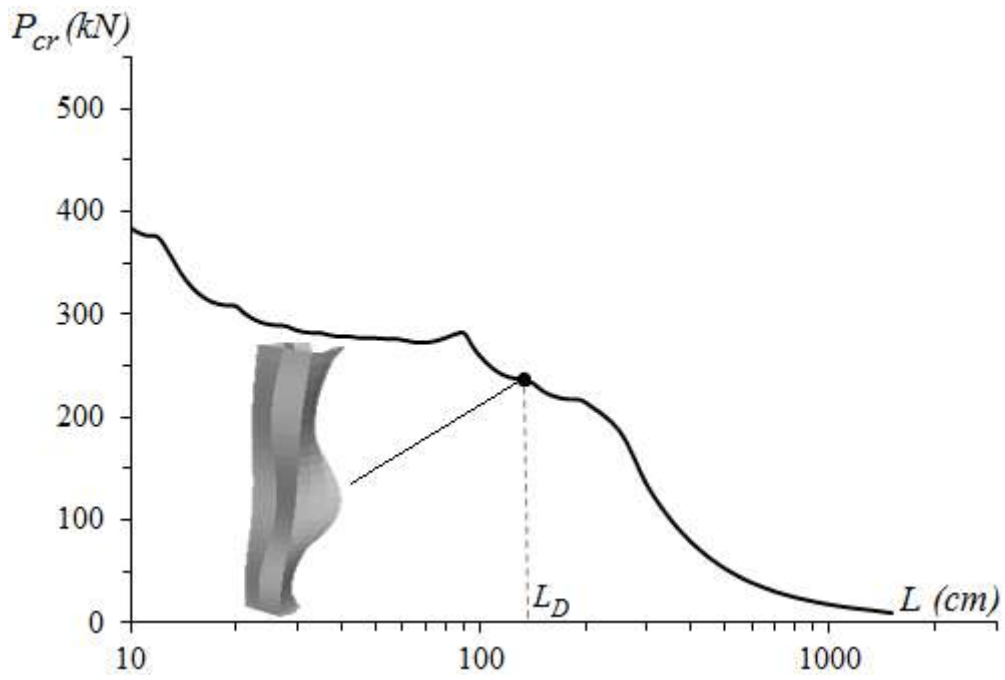
- (i) O número de modos de deformação distorcionais são significativamente maiores nas colunas RS (com enrijecedores intermediários de alma). Esse fato ocorre devido ao aumento de número de paredes internas, ou seja, as dobras que constituem o enrijecedor, de forma que as colunas RD apresentam 6 modos de deformação distorcionais e, as colunas RS, 11 modos. Da mesma forma, observam-se também 4 modos de deformação distorcionais nas colunas RA e 6 nas colunas RL,
- (ii) Se considerar a geometria da seção RS como composta por paredes, verifica-se o modo distorcional. Entretanto, ao considerar como enrijecedor intermediário, esta mostra semelhança com o modo local de deformação das seções RD. As Figuras 3.2(d) e 3.3(c) ilustram as semelhanças observadas a partir do modo de deformação 11 da seção enrijecida com os modos locais 11 a 14 da seção sem o



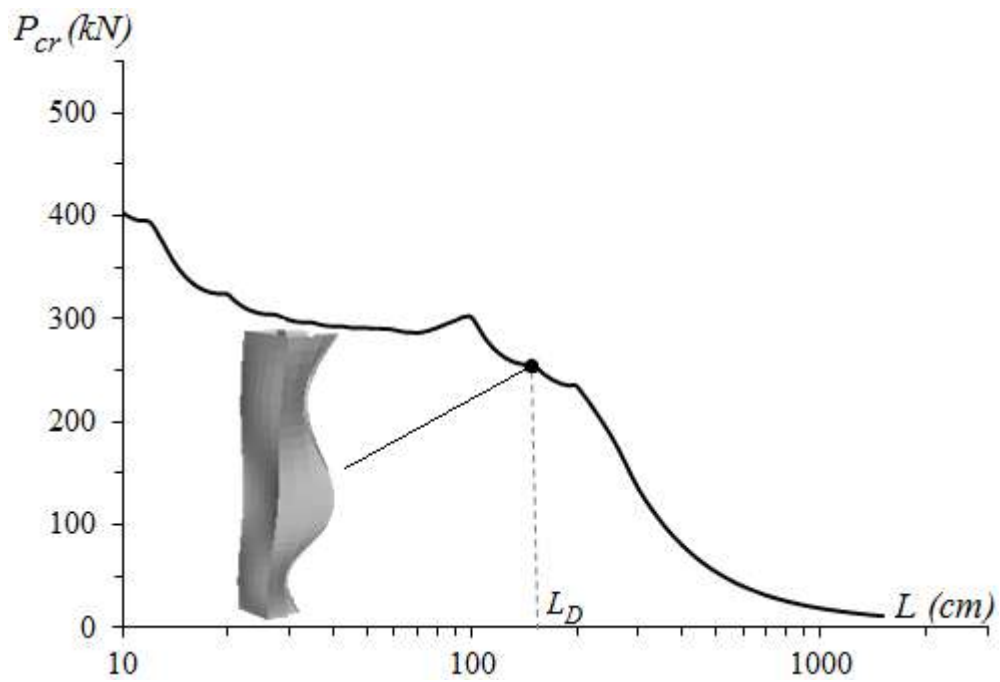
enrijecedor, sendo a única diferença a presença de enrijecedores “parcialmente eficazes” devido a incapacidade de impedir os deslocamentos transversais da alma do perfil rack;

- (iii) Apesar dos modos de deformação distorcionais ilustrados pela Figura 3.2(d) mostrarem as características desse modo, conforme a definição mencionada anteriormente, é necessário separá-los a fim de obter uma avaliação estrutural adequada. Dessa forma, a curva distorcional do MRD será utilizada para prever a carga última das colunas que exibem modos de colapso semelhantes a combinação dos modos de deformação 5 ao 10 e, os modos de colapso envolvendo contribuições dominantes dos modos de deformação 11 ao 15, serão analisados segundo a curva local do MRD.
- (iv) De acordo com o conteúdo apresentado anteriormente, esta dissertação realiza a distinção entre os comportamentos de flambagem envolvendo deformações similares da seção RS com os modos distorcionais 5 ao 10 e locais, do 11 ao 15. Para a seção RL, estudada por LAU & HANCOCK (1988), modos distorcionais 5 ao 10 e, para a seção RA, 5 ao 8.

As Figuras 3.4 e 3.5 ilustram os resultados obtidos para as colunas RA17\_20, RL17\_20, RD80\_20 e RS80\_20 após as análises de flambagem, as curvas  $P_{cr} \times L$ , onde o comprimento  $L$  é apresentado na escala logarítmica. O comprimento distorcional adotado ( $L_D$ ) é indicado em cada curva, assim como o correspondente modo de flambagem distorcional. Para as colunas observadas e cujo comportamento é similar às demais em estudo, verifica-se claramente que a presença de enrijecedores intermediários aumenta significativamente os valores dos modos críticos locais, bem como distanciam as cargas de bifurcação. Nota-se, ainda, que no engaste não existe a ocorrência de um ponto de mínimo na curva, o que aproxima os valores das cargas de bifurcação do comprimento em análise. Entretanto, verifica-se uma similaridade na flambagem com ou sem enrijecedor, todos com uma ou três semi-ondas no modo distorcional.

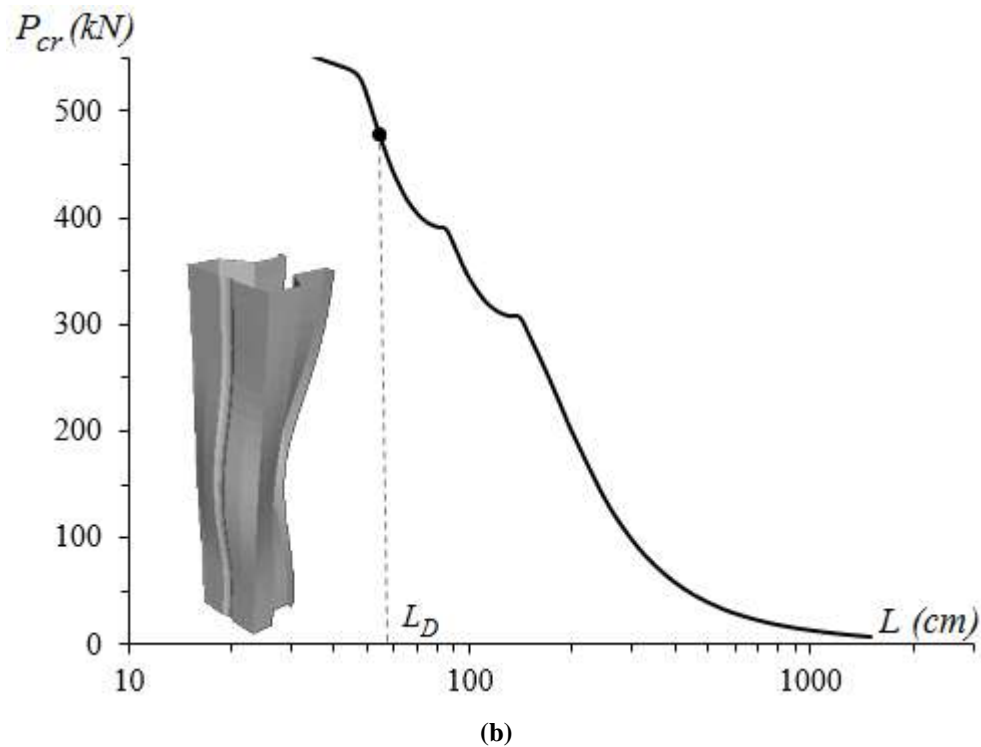
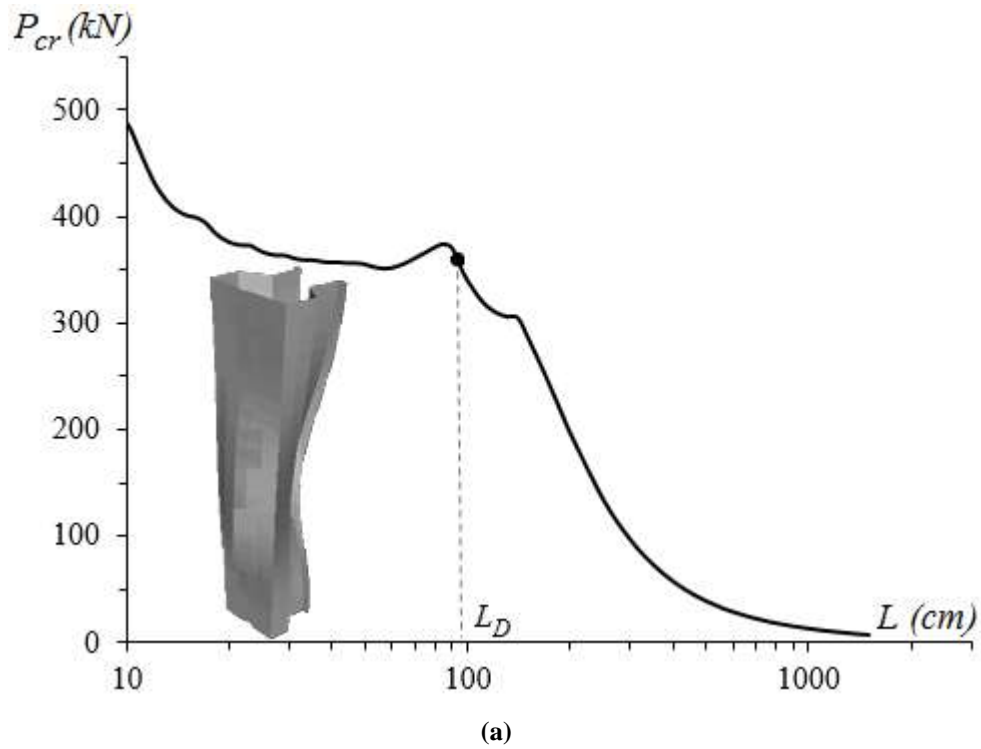


(a)



(b)

Figura 3.4. Curvas  $P_{cr} \times L$  das colunas (a) RA17\_20 e (b) RL17\_20, apresentando o comprimento crítico distorcional ( $L_D$ ) e o respectivo modo de flambagem.



**Figura 3.5. Curvas  $P_{cr} \times L$  das colunas (a) RD80\_20 e (b) RS80\_20, apresentando o comprimento crítico distorcional ( $L_D$ ) e o respectivo modo de flambagem.**

A Tabela 3.2 apresenta, para as colunas da Tabela 3.1 com comprimento  $L_D$ , (i) as cargas críticas distorcional de flambagem, obtidas através das análises no *GBTul*, incluindo os modos de deformação mais significativos e (ii) as relações entre as menores cargas de bifurcação local ( $P_{bl.L}$ ) e global ( $P_{bl.G}$ ) para o comprimento em análise,

incluindo apenas os modos de deformação locais e globais, respectivamente, e considerando os modos 11 ao 15 como locais na seção RS, conforme explicitado anteriormente.

Os modos de flambagem não são puramente distorcionais, conforme observado na Tabela 3.2, apresentando contribuições de outros modos de deformação de ordem superior ao 10, principalmente o modo 11, que caracteriza o modo local para as colunas RD e é tratado como local para as colunas RS. Observa-se também a presença do modo 3, de flambagem global. Os resultados apresentados pela Tabela 3.2 permitem concluir que:

- (i) Todas as colunas analisadas neste trabalho possuem modo crítico de flambagem distorcional, exceto as colunas de seção RD que, para pequenas espessuras, i.e. 1,0 mm, conforme esperado, exibe apenas o modo local de placa;
- (ii) O aumento da espessura e, conseqüentemente, da rigidez da coluna, distancia o modo local e global, ocorrendo o modo local sempre primeiro;
- (iii) A rigidez gerada pela existência do enrijecedor intermediário propicia um distanciamento do modo local e global. Entretanto, a presença dos enrijecedores de bordo aproximam as cargas de bifurcação local e global;
- (iv) As primeiras cargas de bifurcação não distorcionais estão no mínimo 9% acima do  $P_{cr,D}$ , o que não eliminaria a ocorrência do modo local se a geometria da coluna não gerasse após a flambagem uma estabilidade instável, ou seja, não há reserva pós crítica de carga significativa, conforme apresentado nos capítulos 4 e 5. Essas primeiras cargas de bifurcação são sempre locais e, nos casos em análise, compreendem o intervalo para a razão  $P_{bl,L}/P_{cr,D}$  entre 1,09-4,42. A primeira carga de bifurcação global (flexão ou flexão-torsão) apresenta sempre valores superiores, variando para a razão  $P_{bl,G}/P_{cr,D}$  entre 1,10-10,65.

**Tabela 3.2. Comprimento e carga crítica distorcional, relações entre flambagem local/global e composição modal gerada pelo *GBTul* das colunas RA, RL, RD e RS.**

Coluna	Nº s.o.	L <sub>D</sub> (cm)	P <sub>cr,D</sub> (kN)	P <sub>bl,L</sub> (kN)	P <sub>bl,G</sub> (kN)	$\frac{P_{bl,L}}{P_{cr,D}}$	$\frac{P_{bl,G}}{P_{cr,D}}$	p <sub>3</sub> (%)	p <sub>5</sub> (%)	p <sub>7</sub> (%)	p <sub>9</sub> (%)	p <sub>11</sub> (%)	P <sub>outros</sub> (%)
RA17_16.58	3	160	153,53	382,54	376,53	2,49	2,45	6,35	84,05	1,24	4,41	3,80	0,15
RA17_20	3	140	234,58	629,25	594,21	2,68	2,53	6,44	83,74	1,08	4,60	3,97	0,17
RA17_30	1	65	724,77	1978,32	4110,81	2,73	5,67	3,40	86,90	0,50	5,03	3,98	0,19
RA17_50	1	47	2301,64	9356,08	13187,58	4,06	5,73	3,27	88,80	0,37	4,00	3,30	0,26
RA20_16.58	3	160	160,86	433,65	353,45	2,70	2,20	7,13	82,84	3,08	3,66	3,13	0,16
RA20_20.15	3	170	231,37	821,24	383,69	3,55	1,66	8,98	84,06	2,01	2,59	2,24	0,12
RA20_30	1	65	753,19	2181,84	8023,39	2,90	10,65	3,62	86,91	1,90	4,13	3,24	0,20
RA20_50	1	48	2367,14	10151,12	11875,65	4,29	5,02	3,67	89,17	0,92	3,35	2,64	0,25
RA24_16.58	3	170	163,11	290,37	263,09	1,78	1,61	10,34	77,67	2,91	3,57	5,45	0,06
RA24_23.86	1	65	486,50	744,61	2554,77	1,53	5,25	3,91	77,60	3,24	6,61	8,54	0,10
RA24_30	1	57	803,36	1471,67	4186,35	1,83	5,21	3,93	78,38	3,40	6,00	8,20	0,09
RA24_50	1	44	2548,60	7247,44	11815,55	2,84	4,64	4,52	80,66	3,91	4,15	6,66	0,10
RL17_16.58	3	190	160,64	190,40	271,73	1,19	1,69	5,04	89,52	2,46	0,81	1,99	0,18
RL17_20	3	160	247,06	318,90	462,57	1,29	1,87	4,82	88,84	2,96	0,91	2,25	0,22
RL17_30	1	58	819,87	994,57	5226,00	1,21	6,37	1,55	90,09	2,77	1,36	3,90	0,33
RL17_50	1	49	2450,14	5922,51	12300,50	2,42	5,02	2,08	93,28	2,97	1,01	0,41	0,25
RL20_16.58	3	170	169,77	201,01	317,95	1,18	1,87	5,53	88,78	2,26	0,91	2,29	0,23
RL20_20.15	3	150	261,07	353,26	497,39	1,35	1,91	5,63	88,31	2,58	0,94	2,30	0,24
RL20_30	1	54	862,55	1079,87	5660,86	1,25	6,56	1,64	90,02	2,47	1,46	4,05	0,36
RL20_50	1	34	3198,15	9182,02	23889,96	2,87	7,47	1,44	90,40	4,59	1,20	1,82	0,55
RL24_16.58	3	170	190,77	208,39	264,27	1,09	1,39	6,53	85,69	3,95	1,71	1,94	0,18
RL24_23.86	3	130	431,45	603,35	653,41	1,40	1,51	6,41	84,36	4,96	1,91	2,16	0,20
RL24_30	1	60	913,16	1088,91	3801,30	1,19	4,16	2,39	87,65	4,21	2,34	3,17	0,24
RL24_50	1	46	2835,87	5279,00	10873,93	1,86	3,83	2,63	88,57	4,51	2,02	2,04	0,23
RD80_20	1	120	310,74	400,16	576,22	1,29	1,85	1,97	93,45	2,73	0,77	0,91	0,17
RD80_30	1	50	1016,65	1247,41	4944,41	1,23	4,86	1,55	90,17	3,86	1,37	2,71	0,34
RD80_30_10.7	1	51	1179,14	1287,85	4324,62	1,09	3,67	1,44	90,11	3,93	1,04	2,97	0,51
RD107_20	1	220	225,81	275,69	290,11	1,22	1,28	4,36	89,03	3,03	0,59	2,93	0,06
RD107_30	3	120	585,28	2587,05	1447,21	4,42	2,47	7,37	86,61	4,37	0,28	1,29	0,08
RD140_30	1	300	554,97	757,27	610,32	1,36	1,10	6,69	87,87	3,45	0,17	1,76	0,06
RD140_50	1	75	2338,86	9251,99	15739,98	3,96	6,73	3,52	89,28	6,52	0,42	0,12	0,14
RS80_10	1	85	104,85	118,95	573,86	1,13	5,47	1,47	90,97	4,22	1,39	1,61	0,34
RS80_20	1	56	465,22	599,22	2649,20	1,29	5,69	1,43	90,13	4,73	1,51	1,87	0,33
RS80_30	1	45	1113,19	1673,07	6168,72	1,50	5,54	1,46	90,41	4,74	1,48	1,61	0,30
RS80_30_10.7	1	47	1270,04	1722,60	5149,44	1,36	4,05	1,45	90,42	4,90	1,10	1,86	0,27
RS107_10	3	190	57,76	74,59	190,98	1,29	3,31	5,48	85,97	4,79	2,25	0,00	1,51
RS107_20	3	140	246,04	376,58	709,22	1,53	2,88	6,37	86,15	4,50	1,82	0,00	1,16
RS107_30	1	60	745,42	1036,09	5747,59	1,39	7,71	3,02	85,48	5,98	3,87	0,00	1,65
RS140_30	3	180	617,13	813,98	1661,40	1,32	2,69	4,15	89,49	4,90	1,07	0,00	0,39
RS140_50	1	75	2326,94	3186,89	15837,97	1,37	6,81	3,48	86,90	6,46	2,52	0,00	0,64

Nota: Todas as cargas de flambagem/bifurcação foram obtidas com  $\nu=0,3$  (coeficiente de Poisson) e módulo de elasticidade  $E=210$  GPa.

Conforme apresentado na Tabela 3.2, a Figura 3.6 ilustra a composição modal resultante do *GBTul* com as configurações no plano dos principais modos de deformação da seção transversal das colunas RA17\_20, RL17\_20, RD80\_20 e RS80\_20 para a condição engastada. A Tabela 3.2 também apresenta as contribuições modais de deformação do *GBTul* para os modos críticos de flambagem, onde  $p_n$  significa a porcentagem da participação do modo de deformação  $n$ , conforme mostrado a seguir.

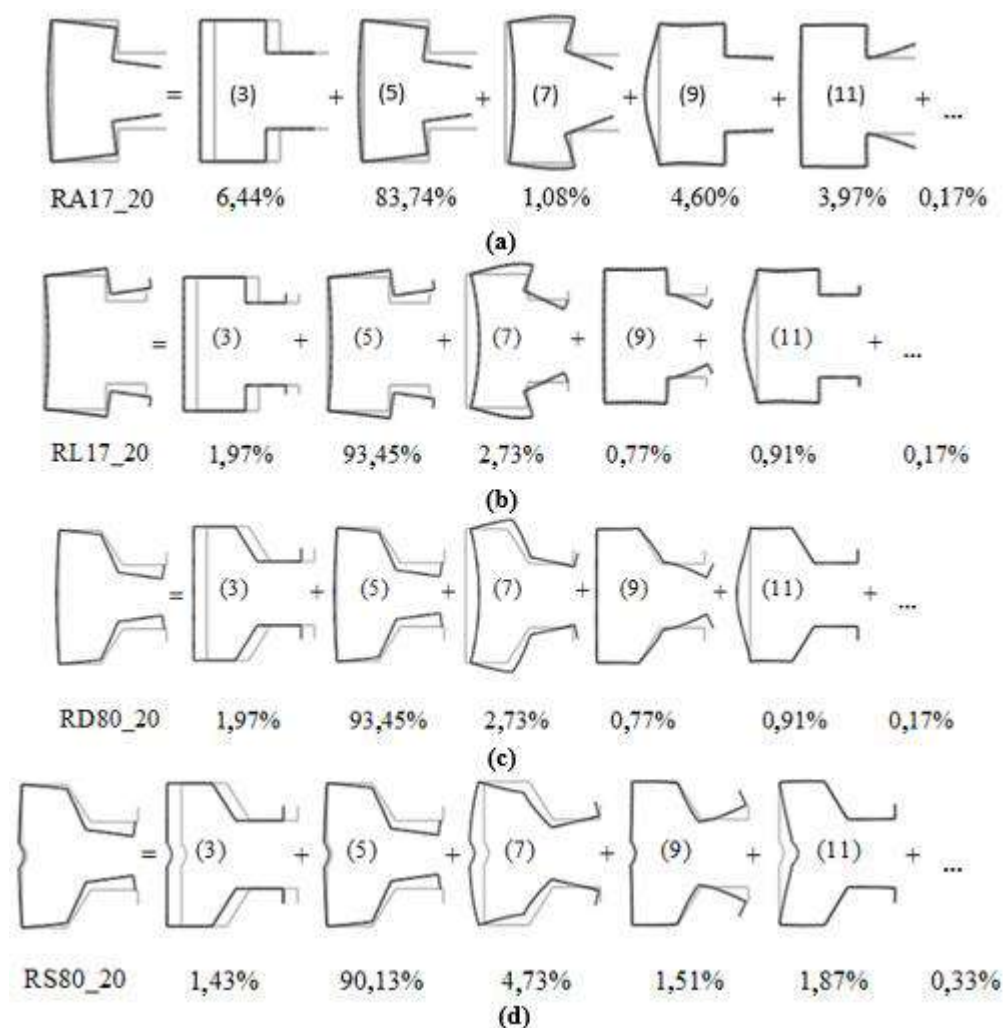


Figura 3.6. Flambagem distorcional com as principais participações modais na seção transversal das colunas (a) RA17\_20, (b) RL17\_20, (c) RD80\_20 e (d) RS80\_20.

A partir da análise dos resultados apresentados pela Figura 3.6, pode-se concluir:

- (i) Todos os modos críticos de flambagem são resultantes de uma combinação modal na qual o modo dominante é o da distorção simétrica ( $p_5$ ), com participações pequenas de outros modos distorcionais ( $p_7$  e  $p_9$ ), local ( $p_{11}$ ) e global ( $p_3$  – flexão na menor inércia). Enquanto o modo  $p_5$  varia no intervalo de 77,60%-93,45%, a contribuição conjunta dos demais modos distorcionais  $p_7+p_9$

varia entre 3,17%-9,85%, a contribuição local ( $p_{11}$ ) entre 0%-8,54% e a global ( $p_3$ ) entre 1,43%-10,34%. Entretanto, as seções RS107 e RS140 possuem o modo 9 com características do modo local, variando entre 1,07%-3,87% e, os modos 10 e 11 como distorcionais, com  $p_{10}+p_{11}$  inferior a 1,65%.

- (ii) A participação dos outros modos de deformação nunca excede 1,65% para os casos engastados. Na maioria dos casos, encontra-se inferior a 0,35%.

### 3.2 Colunas perfuradas

A etapa seguinte consiste na avaliação dos comprimentos de flambagem a serem utilizados para as colunas perfuradas, cuja geometria dos furos consta na Figura 3.7. Inicialmente, adotou-se os comprimentos das colunas maciças, para fins de comparação das cargas críticas e últimas, além da análise do comportamento das colunas sujeitas a perfurações. Nesta seção, para a obtenção das cargas críticas das colunas maciças e perfuradas, utilizou-se o *ANSYS*, cujas premissas da modelagem serão detalhadas no item 4.1. Nos casos em que os comprimentos críticos das seções maciças ( $L_D$ ) não correspondem à flambagem distorcional, foram testados via “tentativa e erro” outros comprimentos, até se obter um novo comprimento crítico para as seções perfuradas ( $L_{D,P}$ ). A Tabela 3.3 apresenta os comprimentos e cargas críticas distorcionais para as colunas maciças ( $P_{cr,D,M}$ ) e perfuradas ( $P_{cr,D,P}$ ), além da redução percentual da carga crítica devido a perda de rigidez gerada pelas perfurações.

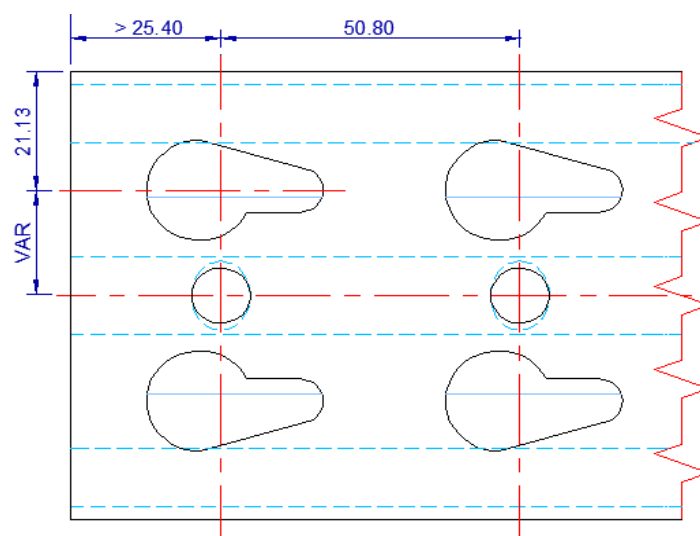


Figura 3.7. Geometria das perfurações (dimensões em mm).

**Tabela 3.3. Comprimento e carga crítica distorcional para as colunas maciças e perfuradas e redução percentual da carga crítica devido às perfurações.**

Coluna	$L_D$ (cm)	$P_{cr,D,M}$ (kN)	$L_{D,P}$ (cm)	$P_{cr,D,P}$ (kN)	$\frac{P_{cr,D,M} - P_{cr,D,P}}{P_{cr,D,M}}(\%)$
RA17_16.58	160	151,68	170	119,90	20,95%
RA17_20	140	230,92	160	176,41	23,61%
RA17_30	65	707,08	65	563,64	20,29%
RA17_50	47	2197,20	47	1791,40	18,47%
RA20_16.58	160	158,77	170	124,96	21,29%
RA20_20.15	170	228,42	170	180,99	20,76%
RA20_30	65	734,24	65	583,84	20,48%
RA20_50	48	2255,60	48	1802,90	20,07%
RA24_16.58	170	161,69	190	110,67	31,55%
RA24_23.86	65	477,05	130	283,66	40,54%
RA24_30	57	782,99	57	616,34	21,28%
RA24_50	44	2424,80	44	1907,50	21,33%
RL17_16.58	190	159,28	190	126,22	20,76%
RL17_20	160	244,12	170	189,98	22,18%
RL17_30	58	801,39	58	632,84	21,03%
RL17_50	49	2335,30	49	1814,90	22,28%
RL20_16.58	170	168,02	190	127,63	24,04%
RL20_20.15	150	257,54	170	192,81	25,13%
RL20_30	54	841,26	54	697,49	17,09%
RL20_50	34	2995,10	34	2565,80	14,33%
RL24_16.58	170	166,73	180	119,95	28,06%
RL24_23.86	130	396,48	130	310,32	21,73%
RL24_30	60	888,80	60	690,93	22,26%
RL24_50	46	2685,60	46	2121,10	21,02%
RS80_10	85	103,67	-	-	-
RS80_20	56	452,39	70	298,15	34,09%
RS80_30	45	1065,00	47	806,08	24,31%
RS80_30_10.7	47	1210,10	54	832,50	31,20%
RS107_10	190	57,32	-	-	-
RS107_20	140	242,40	150	192,16	20,73%
RS107_30	60	726,11	60	590,23	18,71%
RS140_30	180	605,32	200	505,18	16,54%
RS140_50	75	2227,80	75	1902,40	14,61%

Através da análise da Tabela 3.3, observa-se que:

- (i) Conforme relatado por SCHAFFER & MOEN (2008), para uma seção com furos largos existe a tendência da flambagem ser amortecida entre as perfurações e ocorrer nos pequenos comprimentos entre essas, caracterizando a flambagem



local de placa. Tal fenômeno surge devido a perda da rigidez da coluna gerada pelas perfurações e ocorre nas pequenas espessuras, como as em análise;

- (ii) Para seções com pequenas espessuras e perfuradas, tais como 1,0 mm, predomina a flambagem local e para grandes comprimentos, global, não sendo possível notar a ocorrência da flambagem distorcional;
- (iii) A perda de área da seção gerada pelas perfurações contribui para o aumento dos primeiros comprimentos críticos distorcionais ( $L_{D.P}$ ) que satisfaçam as condições propostas por este trabalho (seção 3.1), assim como, conseqüentemente, para a redução da carga crítica. Dessa forma, conforme previsto por MOEN & SCHAFER (2009), verifica-se que há um deslocamento vertical da curva  $P_{cr}$  versus  $L$ , ilustrando esse aumento de esbeltez e o decréscimo da carga crítica;
- (iv) A redução da primeira carga crítica distorcional neste trabalho varia entre 14 e 41%.

## 4 Análise de Pós-Flambagem

---

Inicialmente, este capítulo apresenta detalhes do modelo numérico adotado para a realização das análises não-lineares física e geométrica de pós-flambagem elástica e elasto-plástica através do Método dos Elementos Finitos (MEF), relatando o comportamento e exibindo os resultados, bem como o mecanismo de colapso e a carga última correspondente. Por fim, são discutidos os valores obtidos através do dimensionamento via Método da Resistência Direta (MRD).

### 4.1 Análise em Elementos Finitos

As análises de pós-flambagem das colunas maciças e perfuradas, as trajetórias de equilíbrio da pós-flambagem distorcional e os valores de resistência última foram determinadas através de análises não-lineares física e geométrica utilizando o Método dos Elementos Finitos, realizadas no código *ANSYS* (SAS, 2009). As colunas foram discretizadas com elementos *Shell181*, nomenclatura do *ANSYS* para os elementos de placa compostos por 4 nós e que permitem a deformação de cisalhamento transversal, integração completa e possuem seis graus de liberdade por nó. Estudos de convergência mostram que malhas de dimensões 5 mm x 5 mm geram resultados precisos e um esforço computacional aceitável no caso de seções maciças (GARCIA *et al.*, 2014), sendo também adotado para as seções perfuradas. A solução numérica é baseada em uma técnica incremental-iterativa que combina o método de *Newton-Raphson* com a estratégia de controle do comprimento de arco. Todas as colunas apresentam (i) modo crítico distorcional com pequenas imperfeições iniciais (10% da espessura da parede) e (ii) comportamento do material perfeitamente elástico ou elasto-plástico (regido pelas leis constitutivas elástica ou elasto-plástica – modelo *Prandtl-Reuss*: critério de falha de *von Mises* e demais regras associadas a teoria do escoamento plástico), caracterizado pelo módulo de elasticidade ( $E=210$  GPa), coeficiente de *Poisson* ( $\nu=0,3$ ) e diversas tensões de escoamento  $f_y$  (Tabela A1 a A8 – Apêndice A – e Tabela B1 a B8 – Apêndice B). A grande maioria das tensões de escoamento consideradas neste trabalho são irrealisticamente altas. Porém, a razão para esses valores serem selecionados foi tornar possível a análise de colunas com esbeltez elevada, gerando dessa forma uma vasta gama de resultados. Não foram consideradas nas análises as tensões residuais e o

encruamento do material, gerados pelas deformações plásticas durante a fabricação dos perfis formados a frio (GARCIA,2015)

Todas as colunas analisadas são biengastadas, onde uma placa rígida é ligada nas extremidades da seção transversal com a finalidade de impedir a ocorrência de deslocamentos e rotações locais e globais, bem como o empenamento, conforme ilustrados pela Figura 4.1. Os eixos X, Y e Z estão relacionados com a largura da aba, a altura da alma e o comprimento da coluna, respectivamente. Para a aplicação da carga, o grau de liberdade de translação axial de corpo rígido deve ser livre em ambas as extremidades da seção. Dessa forma, utiliza-se um nó central que simula um apoio com o deslocamento em z impedido e permita esse movimento durante a modelagem das colunas. A carga de compressão axial (P) é aplicada concentrada no ponto correspondente ao centroide da seção, onde as placas rígidas existentes nas extremidades fixas transferem esse esforço por toda a superfície (Figura 4.1(c)). As forças acima descritas são acrescidas em pequenos incrementos, através de um procedimento de aplicação automática de carga do ANSYS.

A incorporação das imperfeições geométricas iniciais nos modos críticos de flambagem das colunas é executado automaticamente, através, por exemplo, do seguinte procedimento (LANDESMANN & CAMOTIM, 2013):

- (i) Determinação dos autovalores e autovetores do modo crítico de flambagem, realizada através de análise no ANSYS e que adota, posteriormente, a mesma discretização de malha empregada para realizar as análises de pós-flambagem;
- (ii) Aplicação de deslocamentos máximos transversais iguais a 0,1t (10% da espessura da parede) ao longo das extremidades (livres) dos enrijecedores das bordas;
- (iii) Utilização dos resultados provenientes das análises de flambagem como dados de entrada para as análises não-lineares de pós-flambagem. A análise de pós-flambagem elástica foi utilizada para avaliar a imperfeição inicial que leva à condição com menor resistência pós-crítica, fechando ou abrindo os enrijecedores das bordas, sendo essa distinção relevante apenas nos casos em que o modo crítico de flambagem envolve um número ímpar de semi-ondas. A Figura 4.2 do item a seguir (4.2) ilustra ambas as situações verificadas.

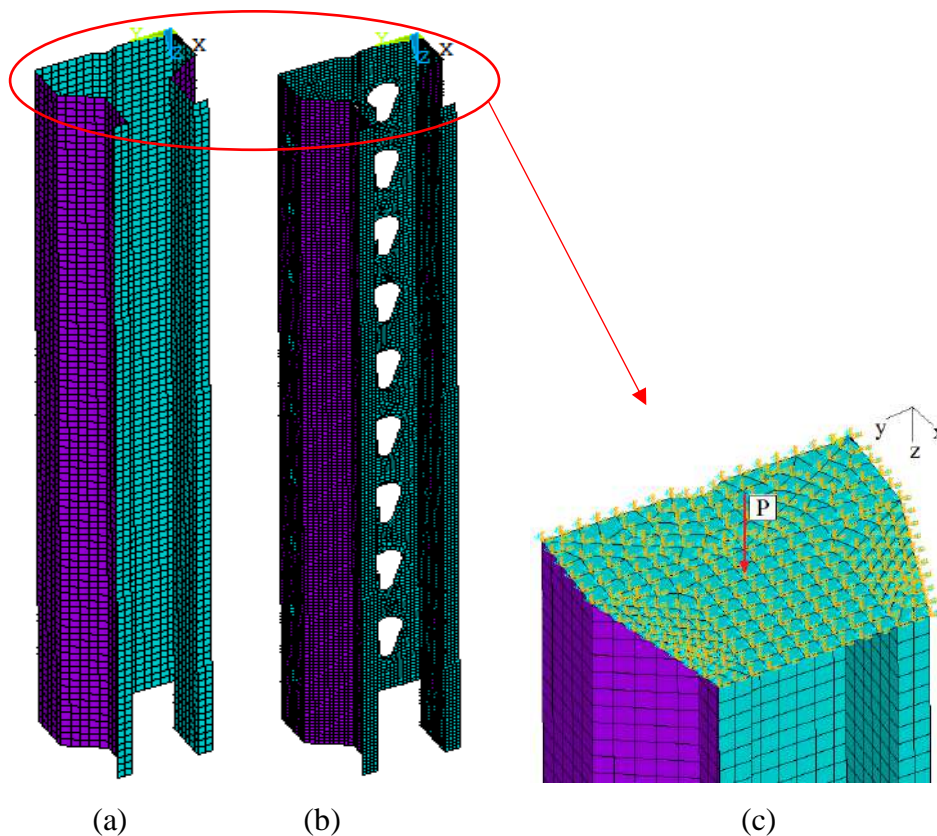
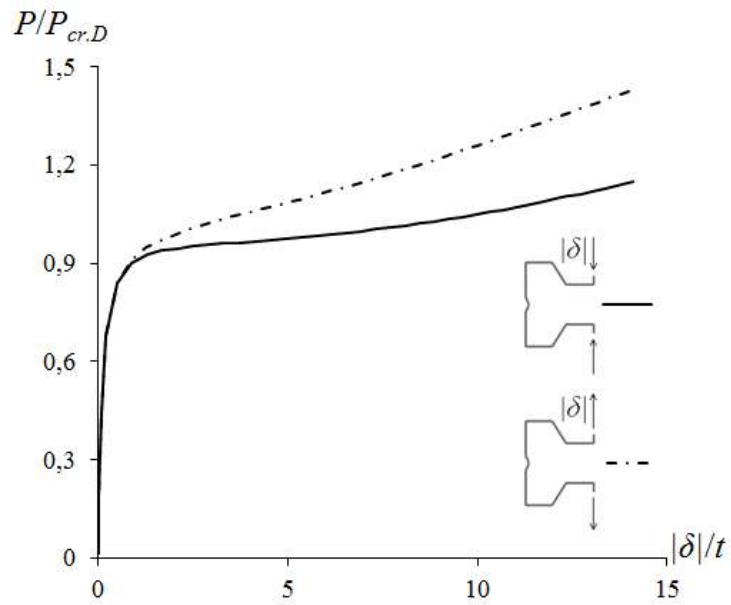


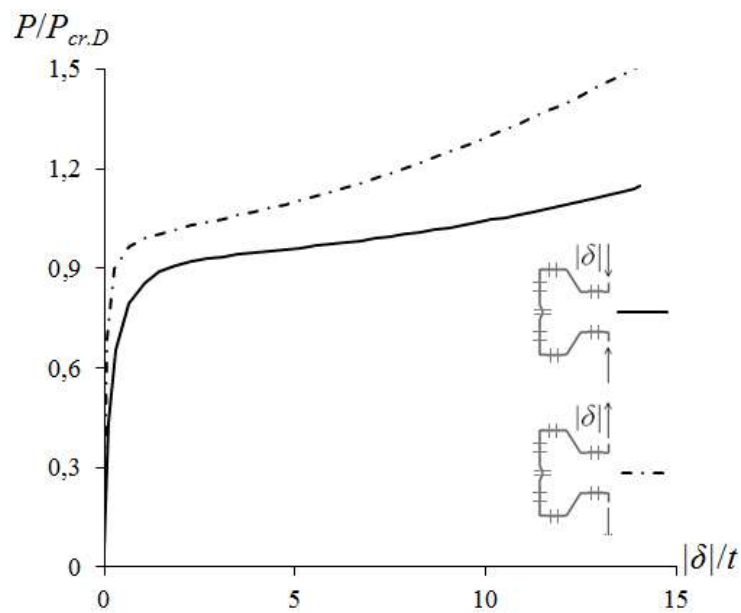
Figura 4.1. Modelagem das colunas no ANSYS: malha típica para a (a) seção maciça, (b) seção perfurada e (c) detalhe da condição de apoio e da aplicação da carga.

## 4.2 Pós-flambagem elástica

Segundo o comportamento assimétrico das trajetórias de pós-flambagem distorcional das colunas, relatado por PROLA & CAMOTIM (2002), as imperfeições iniciais envolvendo o movimento de fechar das abas do perfil das colunas analisadas nesta dissertação conduzem as menores resistências de pós-flambagem. A Figura 4.2 exemplifica esta afirmação apresentando a trajetória de equilíbrio para a seção rack maciça (RS80\_20) e perfurada (RSP80\_20). Essas trajetórias de equilíbrio apresentam os valores da carga aplicada normalizada ( $P/P_{cr,D}$ ) em relação ao respectivo deslocamento normalizado  $|\delta|/t$ , onde  $|\delta|$  é o máximo deslocamento transversal absoluto que ocorre nas abas do perfil e  $t$  é a espessura da parede.



(a)



(b)

**Figura 4.2.** Trajetórias de equilíbrio elástico  $P/P_{cr,D} \times |\delta|/t$  relativos às colunas (a) RS80\_20 e (b) RSP80\_20 para o movimento abrindo e fechando das abas do perfil.

Com o propósito de ilustrar as trajetórias de equilíbrio da pós-flambagem elástica obtidas e abordar a avaliação qualitativa e quantitativa de como o comportamento da coluna na pós-flambagem elástica distorcional é influenciada pela presença das perfurações, as Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam as trajetórias de equilíbrio das 66 colunas abordadas neste trabalho (Tabelas 3.1 e 3.2). A análise dessas diversas

trajetórias de equilíbrio na pós-flambagem distorcional elástica, resulta nas seguintes observações:

- (i) A grande variedade de características comportamentais, exibidas pelas curvas  $P/P_{cr.D}$  vs.  $|\delta|/t$  relativas às colunas analisadas, ilustra a complexidade e a necessidade de uma investigação mais aprofundada sobre a influência das perfurações;
- (ii) Com o aumento da rigidez da seção, ou seja, o aumento da espessura, as trajetórias de equilíbrio apresentam um aumento da resistência pós-crítica;
- (iii) Para as espessuras de 1,658 e 2 mm, as trajetórias de equilíbrio das seções RA e RL são superiores às RAP e RLP, inverso do que ocorre para as espessuras de 3 e 5 mm, que apresentam valores inferiores;
- (iv) As trajetórias de equilíbrio das seções RS de espessuras 2 e 5 mm são superiores às RSP, oposto do observado para a espessura de 3 mm, que ilustra trajetórias inferiores. Uma exceção é a seção RS140\_30, que apresenta trajetória de equilíbrio superior à RSP;
- (v) A presença dos enrijecedores, intermediários e de bordo, impede, na maioria das colunas, a ocorrência de um ponto limite elástico (em níveis aceitáveis, ou seja, valores de deslocamentos não muito altos), conforme se verifica em GARCIA (2015);
- (vi) Apesar de seu alcance limitado (apenas 66 colunas analisadas – RS, RL e RA – e – RSP, RLP e RAP), este estudo permite antecipar que a presença de perfurações afeta consideravelmente as características de rigidez e resistência da coluna na pós-flambagem distorcional, podendo gerar implicações sobre a correspondente carga última ( $P_u$ ) e, conseqüentemente, na sua previsão através dos métodos de dimensionamento.

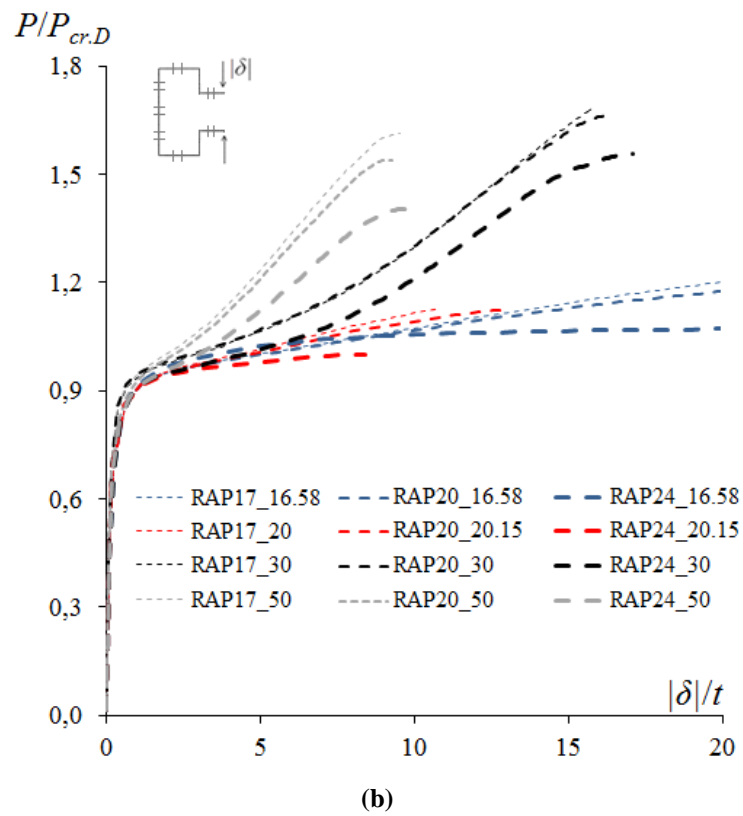
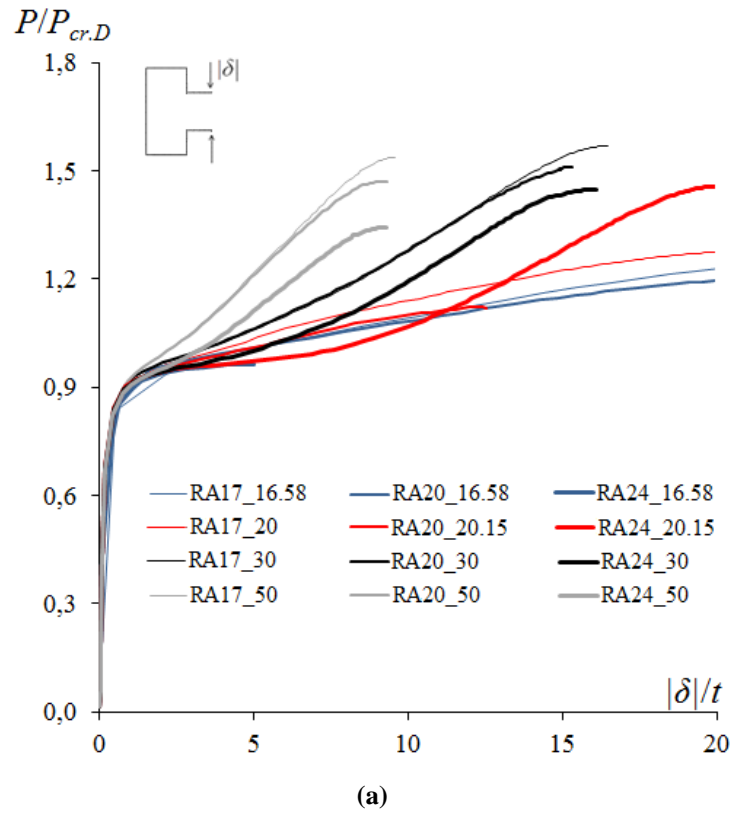
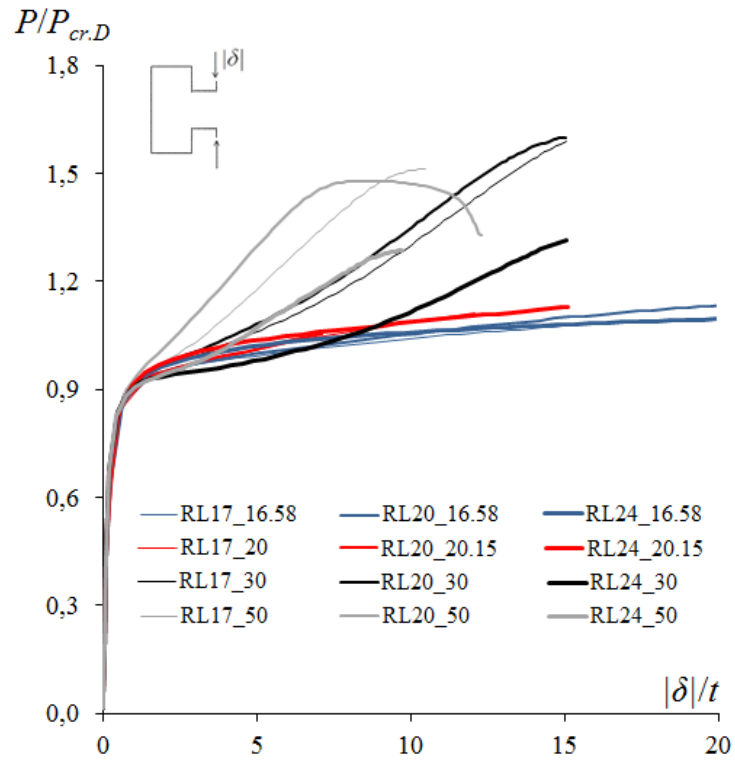
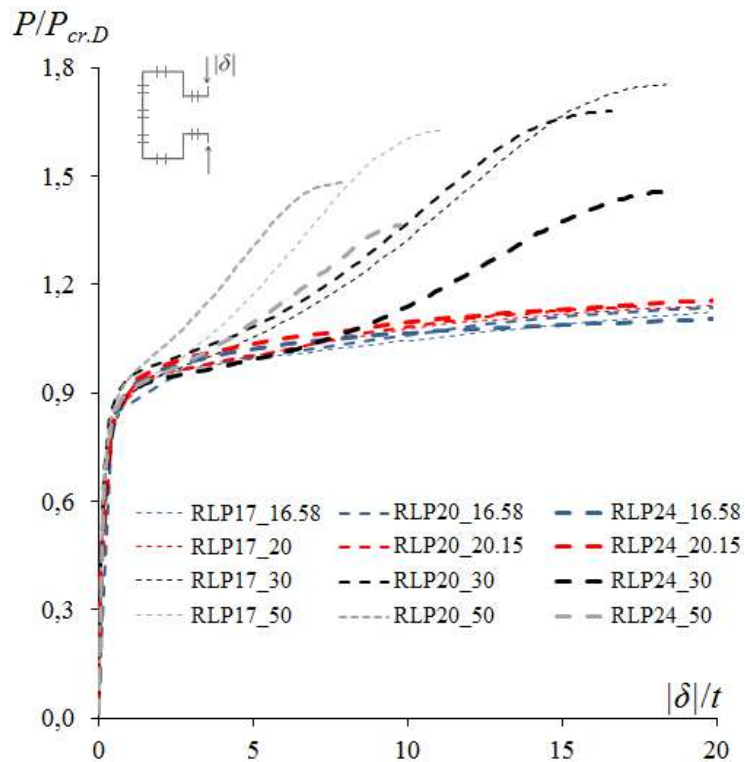


Figura 4.3. Trajetórias de equilíbrio da pós-flambagem elástica  $P/P_{cr,D}$  x  $|\delta|/t$  relativos às colunas (a) RA e (b) RAP.



(a)



(b)

Figura 4.4. Trajetórias de equilíbrio da pós-flambagem elástica  $P/P_{cr,D}$  x  $|\delta|/t$  relativos às colunas (a) RL e (b) RLP.



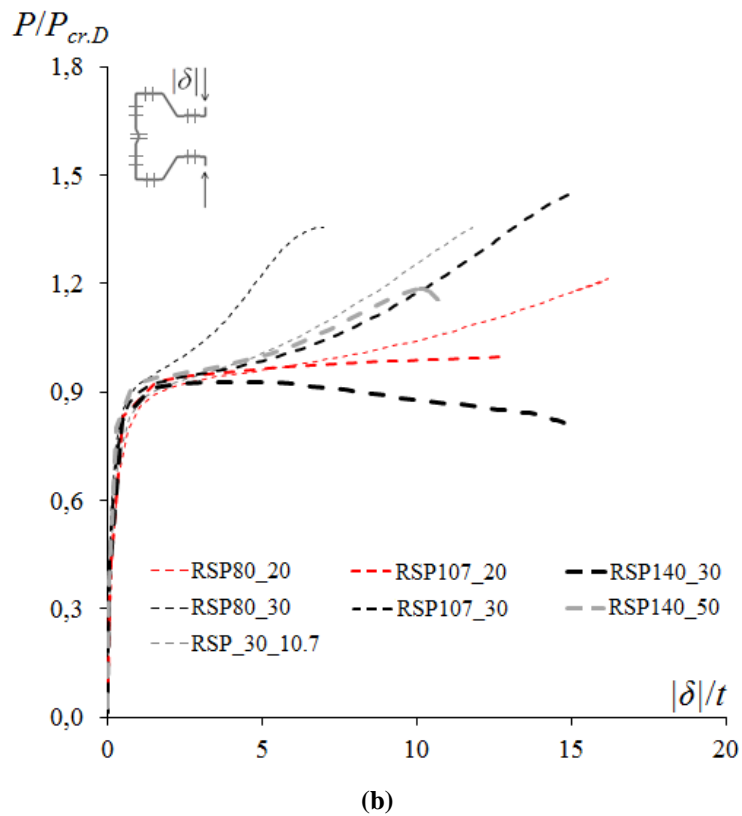
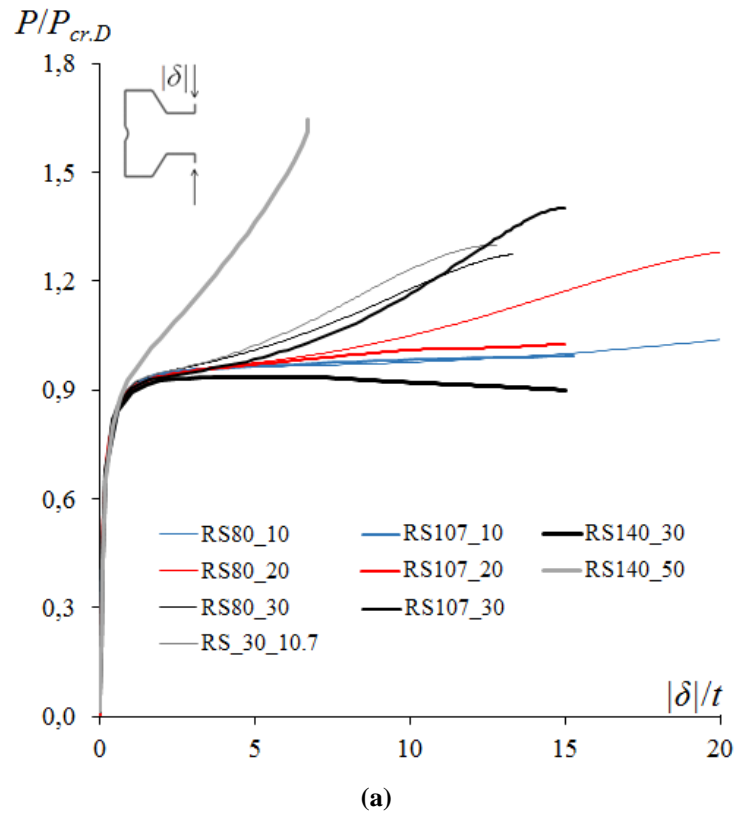


Figura 4.5. Trajetórias de equilíbrio da pós-flambagem elástica  $P/P_{cr,D}$  x  $|\delta|/t$  relativos às colunas (a) RS e (b) RSP.

### 4.3 Pós-flambagem elasto-plástica e carga última

O objetivo desta seção é apresentar e discutir a influência qualitativa e quantitativa da existência de perfurações na pós-flambagem elasto-plástica distorcional, utilizando para isso os dados de resistência última e as trajetórias de equilíbrio obtidas através de estudos paramétricos com modelos de elementos finitos realizados no ANSYS.

Inicialmente é apresentado um estudo paramétrico envolvendo 33 geometrias de colunas maciças (RS, RL e RA) e 33 de perfuradas (RSP, RLP e RAP), além de considerar 6 valores de esbeltez para cada, resultando em 396 modelos numéricos e objetivando gerar um banco de dados de cargas última distorcional, cujos valores de esbeltez distorcional variam entre 0,11-3,10. As Tabelas A1 a A8 e B1 a B8, incluídas nos Apêndices A e B, fornecem os seguintes dados das colunas: (i) carga crítica distorcional  $P_{cr,D}$ , (ii) tensão de escoamento  $f_y$ , (iii) carga de escoamento  $P_y$ , (iv) esbeltez distorcional  $\lambda_D$ , (v) carga última distorcional  $P_u$  e o valor  $(|\delta|/t)_{lim}$  associado, (vi) carga axial nominal da flambagem distorcional  $P_{D2}$ , (vii) carga de dimensionamento segundo o anexo C da ABNT NBR 14762:2010  $P_{n,D}$ , (viii) carga de dimensionamento segundo a AISI S100:2016 (MOEN & SCHAFER (2008, 2011))  $P_{n,D}^{M\&S}$  e (ix) a carga de dimensionamento segundo a proposta de LANDESMANN *et. al* (2017)  $P_{n,D}^L$ . esses resultados indicam que, na maioria dos casos em análise, não há reserva pós crítica, excetuando-se aqueles de elevada esbeltez distorcional, que conduzem a aços com  $f_y$  irrealisticamente altos.

As Figuras 4.6(a,b,c,d) e 4.7(a,b) ilustram trajetórias não-lineares (física e geométrica)  $P/P_{cr,D}$  versus  $|\delta|/t$  determinadas para obter as cargas últimas  $P_u$ , identificadas através dos pontos  $P_u/P_{cr,D}$  no gráfico. Estas trajetórias de equilíbrio são referentes às colunas RA17\_20 e RAP17\_20 com  $\lambda_D$  variando entre 0,20-2,75, RL17\_20 e RLP17\_20 com  $\lambda_D$  entre 0,18-2,83 e RS80\_20 e RSP80\_20 com  $\lambda_D$  entre 0,25-3,07. As trajetórias de equilíbrio elástico, mostradas nas Figuras 4.3 a 4.5, são novamente apresentadas para possibilitar comparações e análises. Além disso, são ilustradas as configurações deformadas da coluna nas imediações da ruptura ( $\lambda_D = 0,96$  para as colunas RA e RL e  $\lambda_D = 1,17$  para as colunas RS) apresentado a natureza claramente distorcional do colapso.

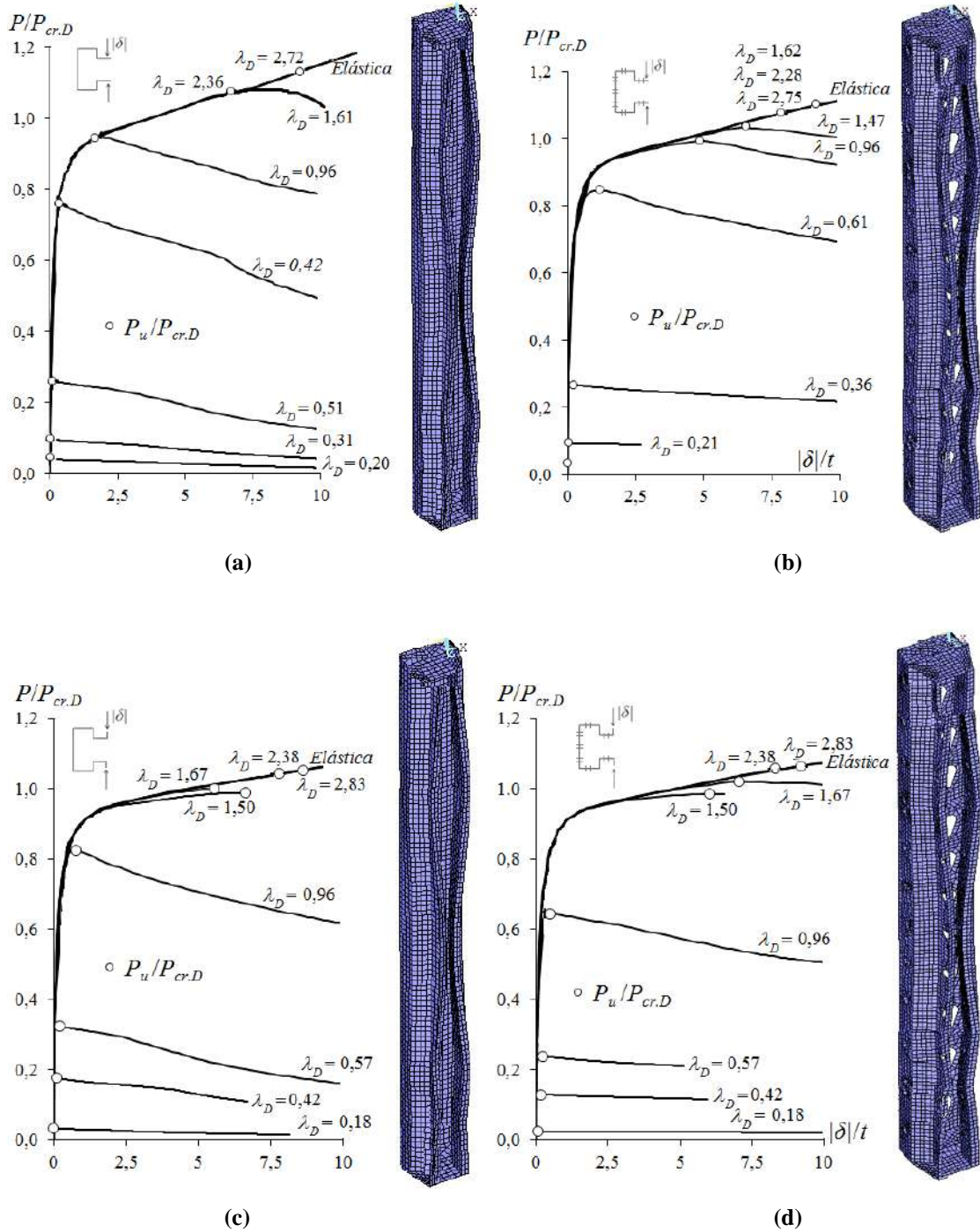
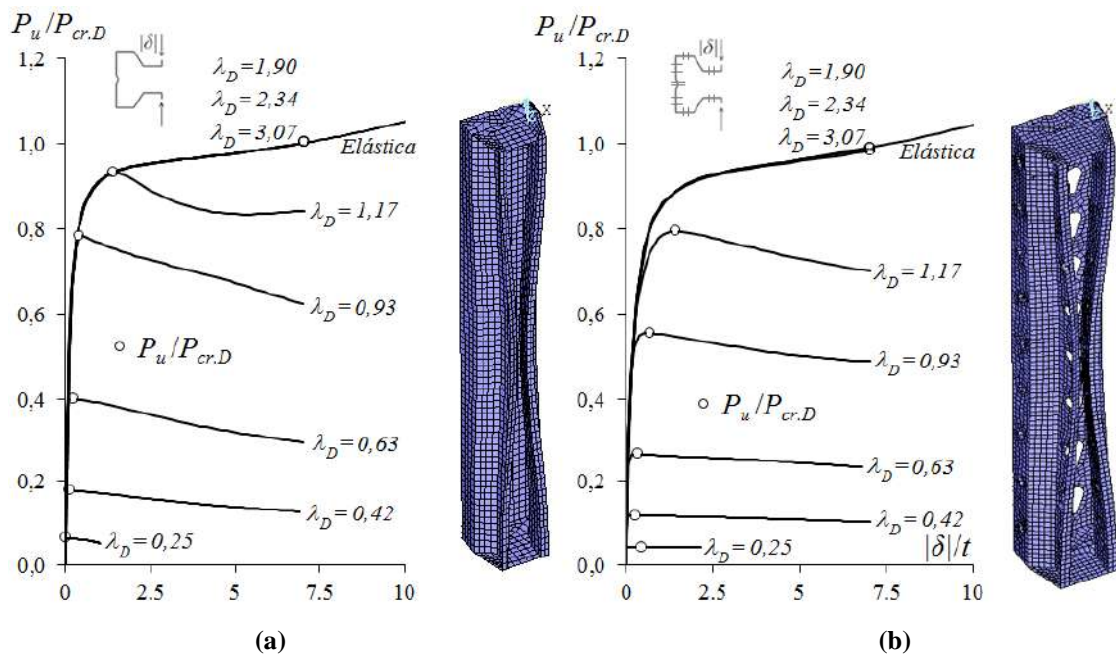


Figura 4.6. Trajetórias de equilíbrio distorcional elasto-plástica ( $P/P_{cr,D} \times |\delta|/t$ ) das colunas (a)RA17\_20, (b) RAP170\_20, (c) RL17\_20 e (d) RA17\_20 com  $\lambda_D$  variando entre 0,18-2,83.



**Figura 4.7. Trajetórias de equilíbrio distorcional elasto-plástica ( $P/P_{cr,D} \times |\delta|/t$ ) das colunas (a)RS80\_20 e (b)RSP80\_20 com  $\lambda_D$  variando entre 0,25-3,07.**

A observação dos resultados apresentados nas Figuras 4.6(a,b,c,d) e 4.7(a,b), assim como dos dados fornecidos nas Tabelas dos Apêndices A e B, levam às seguintes conclusões:

- (i) Conforme esperado, as relações finais de carga última relativa à crítica ( $P_u/P_{cr,D}$ ) e os respectivos valores associados  $(|\delta|/t)_{lim}$  aumentam com a tensão de escoamento ( $f_y$ ), independentemente da presença (ou não) de perfurações;
- (ii) Todas as colunas indicam falha no modo de flambagem distorcional com uma ou três semi-ondas, com imperfeição inicial dos enrijecedores de borda da coluna fechando;
- (iii) As cargas últimas ( $P_u$ ) das colunas perfuradas são inferiores às das colunas maciças, sendo, em sua maioria, inferiores à carga crítica. No caso de aços de resistências elevadas ( $\lambda_D \geq 1,67$ ) é possível observar alguns valores de  $P_u$  superiores a  $P_{cr,D}$ . Entretanto, nesses casos, observa-se convergência com a curva elástica.

A Figura 4.8(a,b), 4.9(a,b) e 4.10(a,b) ilustram as colunas, RA17\_20 e RAP17\_20 com  $\lambda_D = 0,96$ , RL17\_20 e RLP17\_20 com  $\lambda_D = 0,96$  e RS80\_20 e RSP80\_20 com  $\lambda_D = 1,17$ , respectivamente, apresentando as trajetórias de equilíbrio elasto-plástico e a evolução da configuração deformada e da tensão de *von Mises* (antes,

durante e após a carga última) – os 4 diagramas correspondem aos estados de equilíbrio indicados na trajetória. É importante ressaltar que (i) as configurações deformadas são amplificadas, e que (ii) o estado III sempre corresponde ao colapso da coluna. A análise desses resultados gera as seguintes observações:

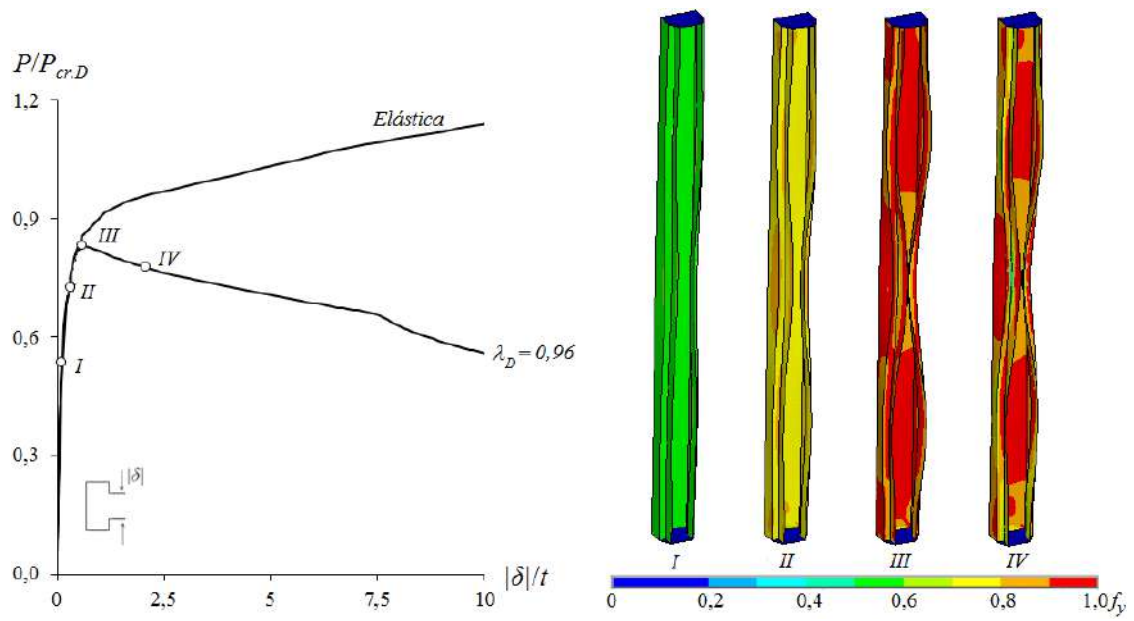
- (i) As colunas apresentam uma ou três semi-ondas no modo de flambagem distorcional e colapso com as abas fechando;
- (ii) O colapso das colunas maciças e perfuradas são semelhantes e começam na região do meio do vão, conforme ilustra o diagrama do ponto III, associado ao escoamento da junção alma-mesa, que conduz à formação de um ponto de plastificação, apresentado pelo diagrama do ponto IV;
- (iii) No caso das colunas perfuradas a plastificação ocorre na região das perfurações, local onde ocorrem as maiores tensões.

Em seguida, a Figura 4.11(a,b) fornece as razões de carga última  $P_u/P_{cr,D}$  (Figura 4.11(a)) e  $P_u/P_{y*}^{12}$  (Figura 4.11 (b)) *versus* a esbeltez distorcional  $\lambda_D$  para as colunas (i) reportadas por LAU & HANCOCK (1988) ( $RA_{L\&H}$  e  $RL_{L\&H}$ ) e por LANDESMANN & CAMOTIM (2013) ( $RA_{L\&C}$ ) e (ii) nesta dissertação (RA, RL, RS, RAP, RLP e RSP). A análise dos resultados mostrados na Figura 4.11(a,b) e dos dados fornecidos nos Apêndices A e B, conduzem as seguintes observações:

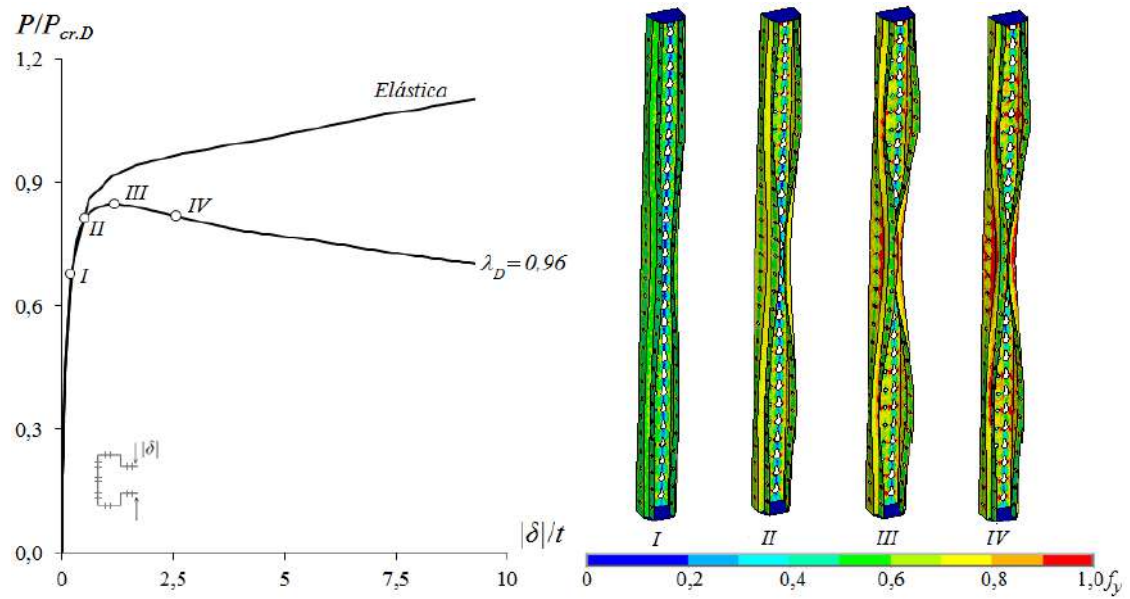
- (iv) A Figura 4.11(a) mostra que as razões  $P_u/P_{cr,D}$  de todas as colunas reportadas neste trabalho possuem uma certa linearidade crescente até a esbeltez distorcional  $\lambda_D=1,2$ , a partir de onde apresentam uma dispersão significativa dos resultados. A partir de  $\lambda_D = 1,2$  verificam-se também resultados superiores a 1.
- (v) Conforme esperado, a nuvem de resultados  $P_u/P_{y*}$  versus  $\lambda_D$  representada na Figura 4.11(b) segue a tendência geral das curvas de dimensionamento do tipo “Winter”. Entretanto, observa-se uma dispersão vertical considerável desses valores tanto para as seções maciças quanto para as perfuradas.

---

<sup>12</sup>  $P_{y*}$  é relativo a área bruta nas seções maciças e a área líquida nas seções perfuradas.

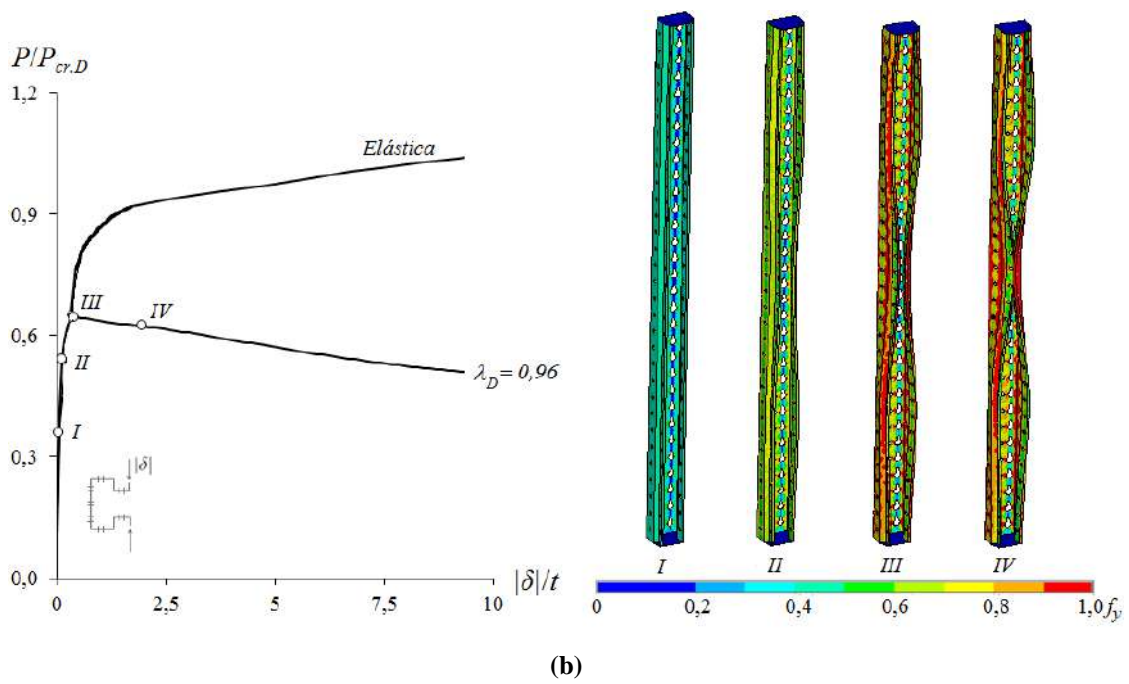
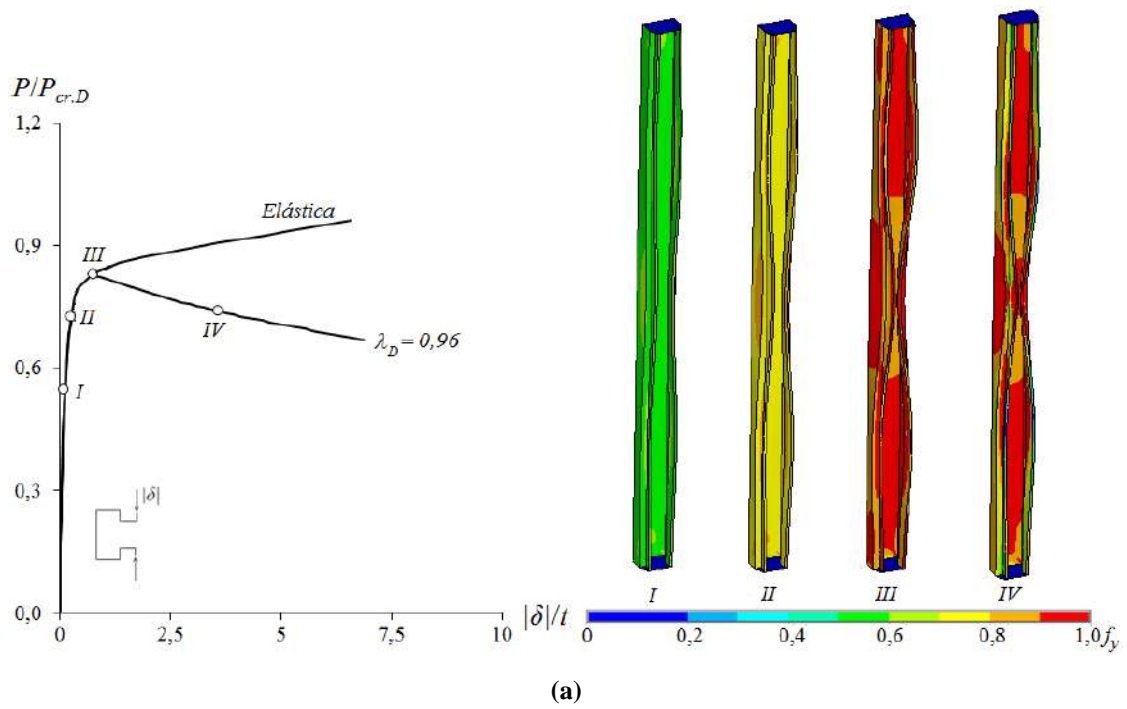


(a)

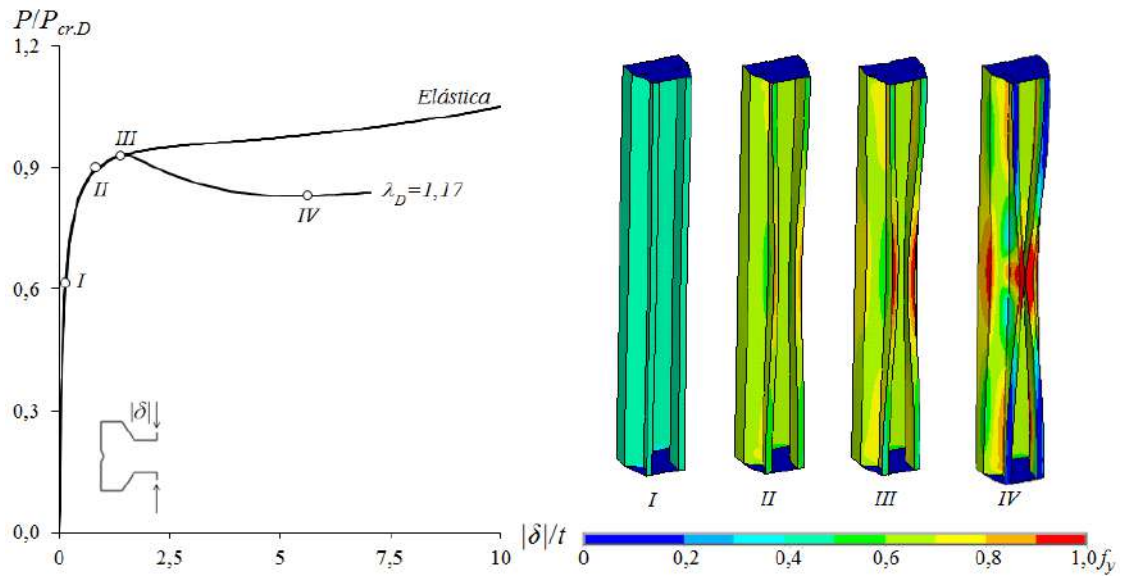


(b)

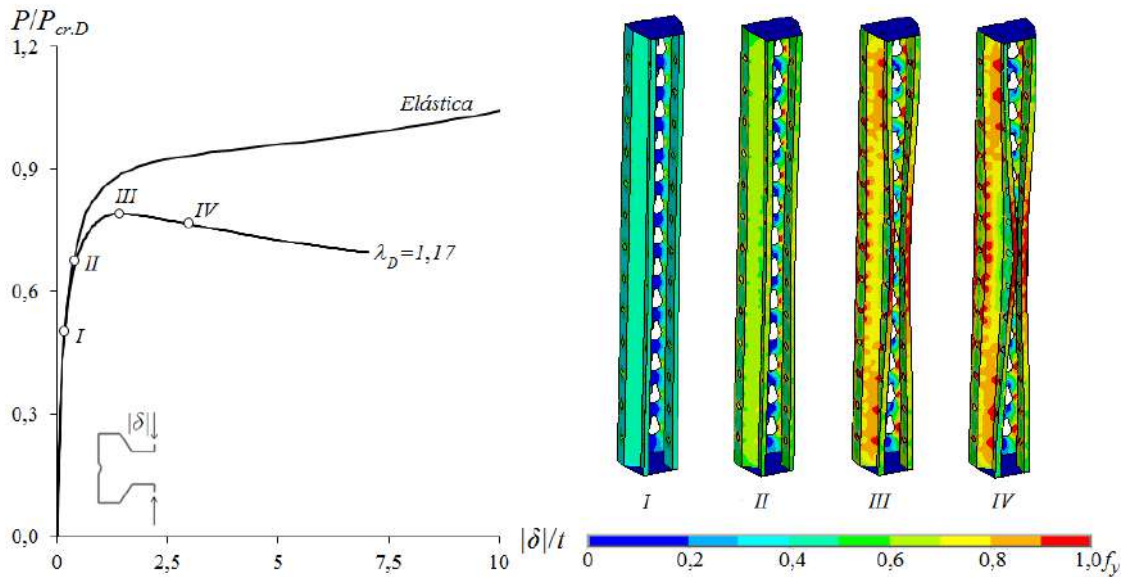
**Figura 4.8. Trajetórias de equilíbrio distorcional elástico e elasto-plástico ( $P/P_{cr,D} \times |\delta|/t$ ), configurações deformadas (incluindo o mecanismo de colapso) e tensão de *von Mises* ( $\lambda_D = 0,96$ ) para (a) RA17\_20 e (b) RAP17\_20**



**Figura 4.9. Trajetórias de equilíbrio distorcional elástico e elasto-plástico ( $P/P_{cr,D} \times |\delta|/t$ ), configurações deformadas (incluindo o mecanismo de colapso) e tensão de *von Mises* ( $\lambda_D = 0,96$ ) para (a) RL17\_20 e (b) RLP17\_20**



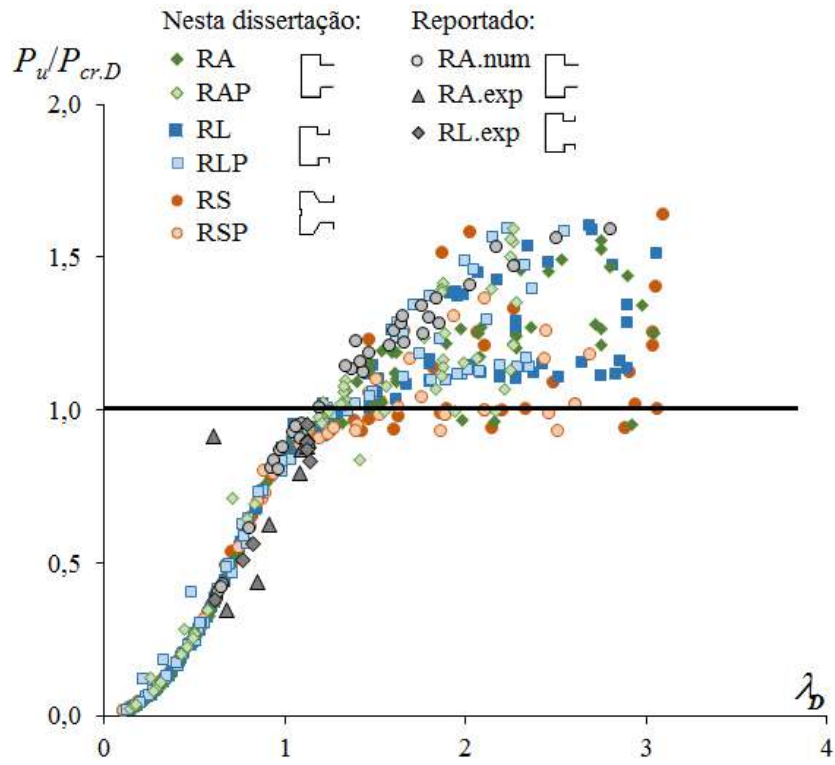
(a)



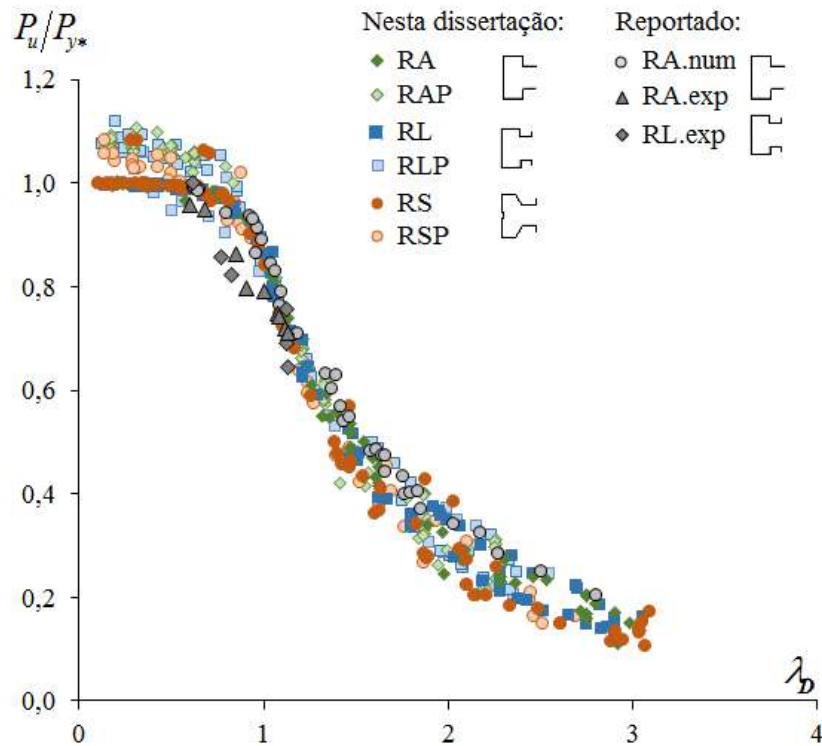
(b)

**Figura 4.10. Trajetórias de equilíbrio distorcional elástico e elasto-plástico ( $P/P_{cr,D} \times |\delta|/t$ ), configurações deformadas (incluindo o mecanismo de colapso) e tensão de *von Mises* ( $\lambda_D = 1,17$ ) para (a) RS80\_20 e (b) RSP80\_20**





(a)



(b)

**Figura 4.11. Nuvem de pontos das relações de carga última (a)  $P_u/P_{cr,D}$  e (b)  $P_u/P_{y^*}$  versus a esbeltez distorcional  $\lambda_D$ .**

## 4.4 Dimensionamento via Método da Resistência Direta

Essa seção apresenta e discute a comparação dos resultados de carga última obtidos no item anterior com as previsões obtidas através do Método da Resistência Direta (MRD), cuja curva denominada nesta dissertação como  $P_{n,D}$  refere-se à formulação que consta no Anexo C da ABNT NBR 14762:2010. Complementarmente, verificam-se as curvas de dimensionamento propostas por: (i) MOEN & SCHAFER (2008, 2011) e presente na AISI S100:2016 – a curva  $P_{n,D}^{M\&S}$  – para seções perfuradas e (ii) LANDESMANN *et. al* (2017) –  $P_{n,D}^L$ .

As Figuras 4.12(a,b) comparam as curvas de dimensionamento  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$  e  $P_{n,D}^L$  com as relações de carga última  $P_u/P_y$  relativas às colunas (i) RA e RL, cujos resultados experimentais ( $RA_{L\&H}$  e  $RL_{L\&H}$ ) foram estudados por LAU & HANCOCK (1988) (Figura 4.12(a)) e análises numéricas ( $RA_{L\&C}$ ) realizadas por LANDESMANN & CAMOTIM (2013) (Figura 4.12(a)) e (iii) RS, RL e RA, com e sem perfurações, analisados numericamente neste trabalho (Figura 4.12(b)). Além disso, as Figuras 4.13(a,b) e 4.14 apresentam as relações  $P_u/P_{n,D}$ ,  $P_u/P_{n,D}^{M\&S}$  e  $P_u/P_{n,D}^L$  versus  $\lambda_D$ , proporcionando verificar a precisão e a segurança associada às três curvas de projeto em consideração, ressaltando as médias, desvios padrão e valores máximos/mínimos das relações  $P_u/P_{n,D}$ ,  $P_u/P_{n,D}^{M\&S}$  e  $P_u/P_{n,D}^L$ . A análise desses resultados provenientes do dimensionamento conduz aos seguintes comentários:

- (i) Primeiramente, a observação das Figuras 4.12(a) e 4.13(a) indica que as expressões normativas do Anexo C satisfazem o dimensionamento das seções ensaiadas experimentalmente por LAU & HANCOCK (1988), ilustrado como  $RA_{L\&H}$  e  $RL_{L\&H}$  e da maior parcela das analisadas numericamente por LANDESMANN & CAMOTIM (2013), representado como  $RA_{L\&C}$ , sendo considerado um método seguro e preciso para seções maciças. De fato, os correspondentes indicadores  $P_u/P_{n,D}$  são: 1,02 (média), 0,07 (desvio padrão), 1,19 (valor máximo) e 0,75 (valor mínimo). Entretanto, observa-se que para valores superiores a  $\lambda_D = 1,6$ , este método não atende;
- (ii) A avaliação das Figuras 4.12(b) e 4.13(b) expõe que as cargas  $P_u/P_y$  estimadas numericamente para seções maciças neste trabalho são, na sua grande maioria, coincidentes com a curva elástica para  $\lambda_D > 1,35$ . Com efeito, apresentam os correspondentes indicadores  $P_u/P_{n,D}$ : 0,90 (média), 0,18 (desvio padrão), 1,20

(valor máximo) e 0,43 (valor mínimo). No caso das seções perfuradas, observa-se que para  $\lambda_D < 1,20$ ,  $P_u$  é inferior a  $P_{cr}$ , gerando uma influência significativa na avaliação da resistência última, conforme mostra os indicadores  $P_u/P_{n,D}$ : 0,75 (média), 0,13 (desvio padrão), 0,43 (valor mínimo) e 1,72 (valor máximo). Dessa forma, é possível verificar que nesse caso a formulação da ABNT NBR 14762:2010 atende o dimensionamento das seções maciças analisadas para  $\lambda_D < 1,35$ , o que não ocorre quando apresentam perfurações.

- (iii) Por fim, as Figuras 4.12(b) e 4.14 mostram que a proposta de MOEN & SCHAFER (2008,2011) e incorporada pela AISI S100:2016 é satisfatória no dimensionamento de grande parte das seções perfuradas analisadas nesta dissertação, apresentando os seguintes indicadores  $P_u/P_{n,D}^{M\&S}$ : 1,46 (média), 0,37 (desvio padrão), 0,71 (valor mínimo) e 4,19 (valor máximo).

Conforme observa-se na Figura 4.12(b) o conjunto de pontos compostos pelas seções maciças e perfuradas apresentam similaridades no comportamento. A Figura 4.15 ilustra esse fato através da análise da curva  $P_u/P_{y^*}$ , onde  $P_{y^*}$  é relativo a área bruta nas seções maciças e a área líquida nas seções perfuradas. Para o cálculo da área líquida foram adotadas razões entre 0,65 e 0,76 na maioria dos casos, sendo para tal considerada a seção transversal com a maior área de perfurações.

A curva  $P_{n,D}^L$  ilustrada na Figura 4.15 retrata a curva  $P_u/P_{y^*}$  versus  $\lambda_D$  proposta por LANDESMANN *et. al* (2017) para o dimensionamento de seções apoiadas e compostas por aços em diversas temperaturas, sendo no caso em análise considerada a ambiente. Verifica-se que essa se ajusta perfeitamente aos resultados obtidos, sendo considerado neste estudo a metodologia mais adequada para o dimensionamento. Embora as seções em análise possuam como condição de apoio o engaste, comportam-se na pós flambagem elasto-plástica de forma similar as apoiadas, devido a não possuírem na maioria dos casos elevada resistência pós crítica. A Figura 4.16 mostra os indicadores  $P_u/P_{n,D}^L$ : 1,10 (média), 0,16 (desvio padrão), 2,51 (valor máximo) e 1,33 (valor mínimo), comprovando a adequabilidade do método.

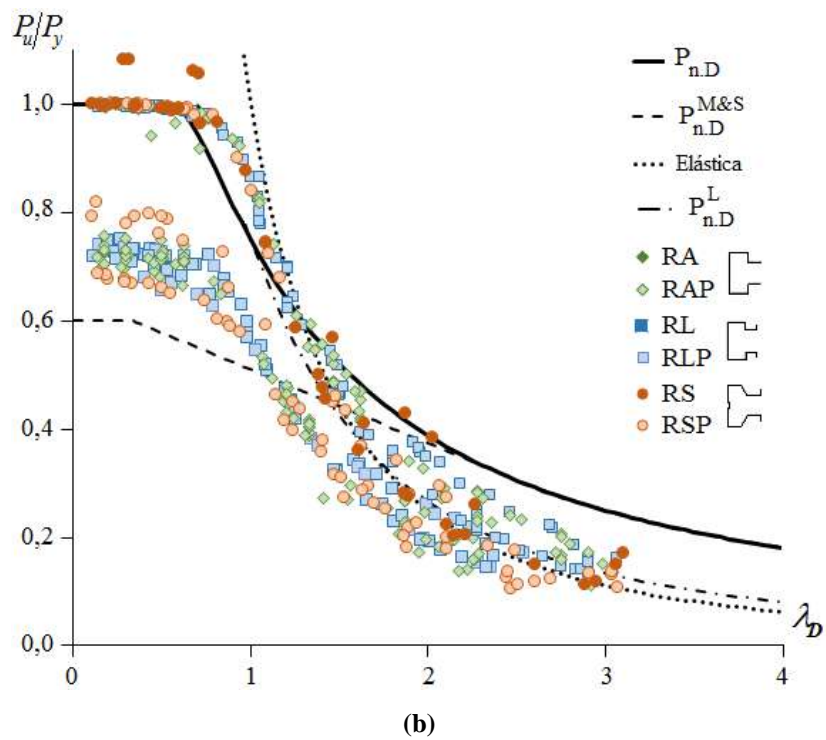
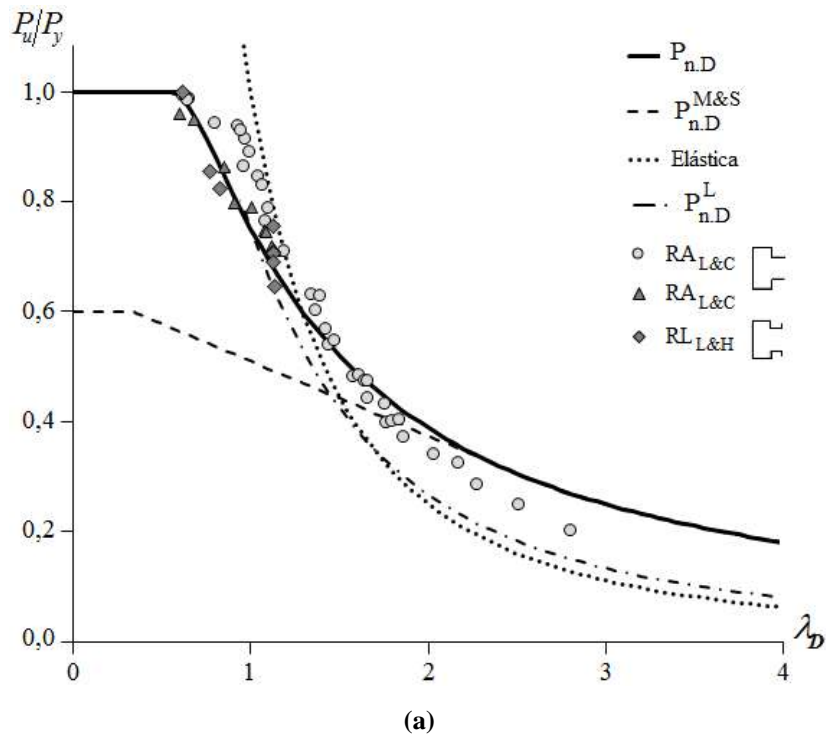


Figura 4.12. Comparação entre as curvas de dimensionamento  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$  e  $P_{n,D}^L$  e cargas última obtidas por (a) LAU & HANCOCK (1988) e LANDESMANN & CAMOTIM (2013) e (b) nesta dissertação.

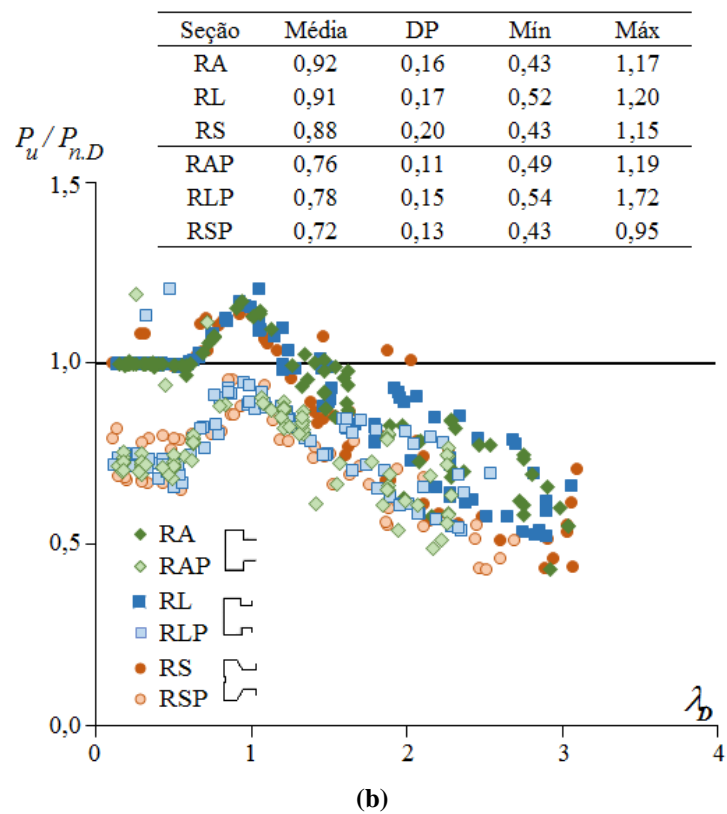
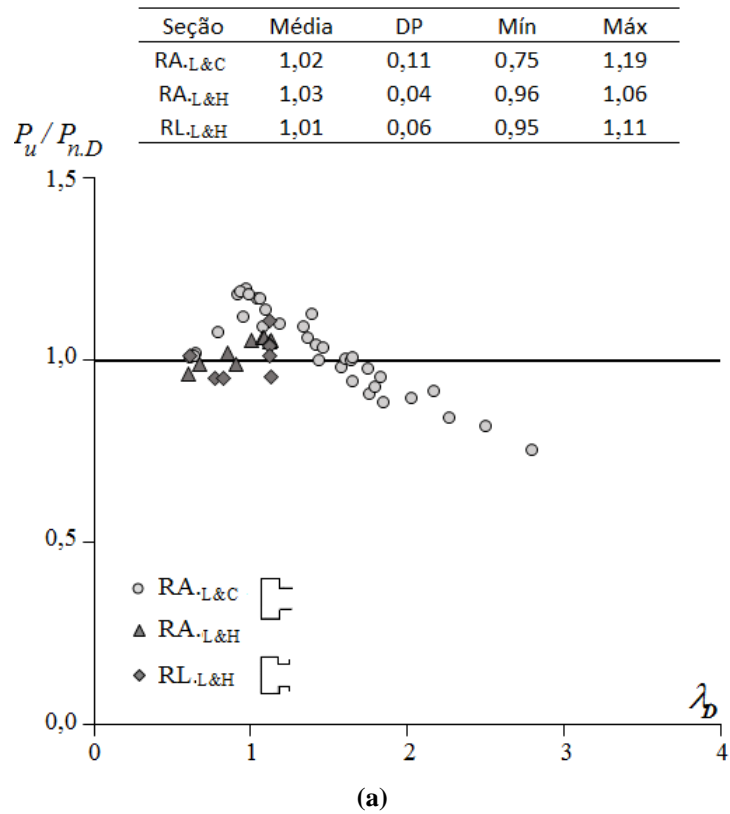


Figura 4.13. Nuvem de pontos  $P_u/P_{n,D}$  versus  $\lambda_D$  para as colunas analisadas por (a) LAU & HANCOCK (1988) e LANDESMANN & CAMOTIM (2013) e (b) nesta dissertação.

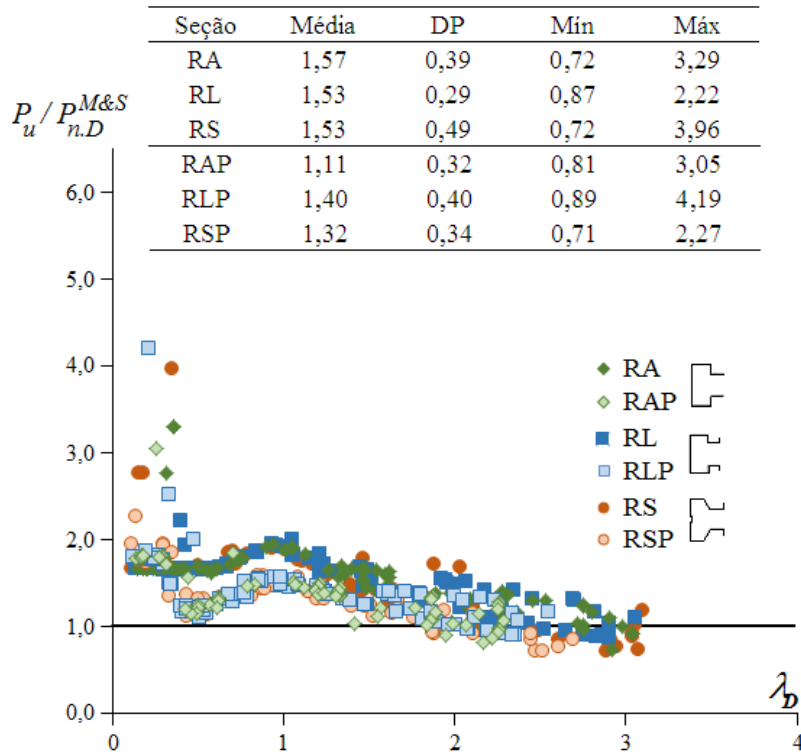


Figura 4.14. Nuvem de pontos  $P_u/P_{n,D}^{M\&S}$  versus  $\lambda_D$  das colunas analisadas nesta dissertação.

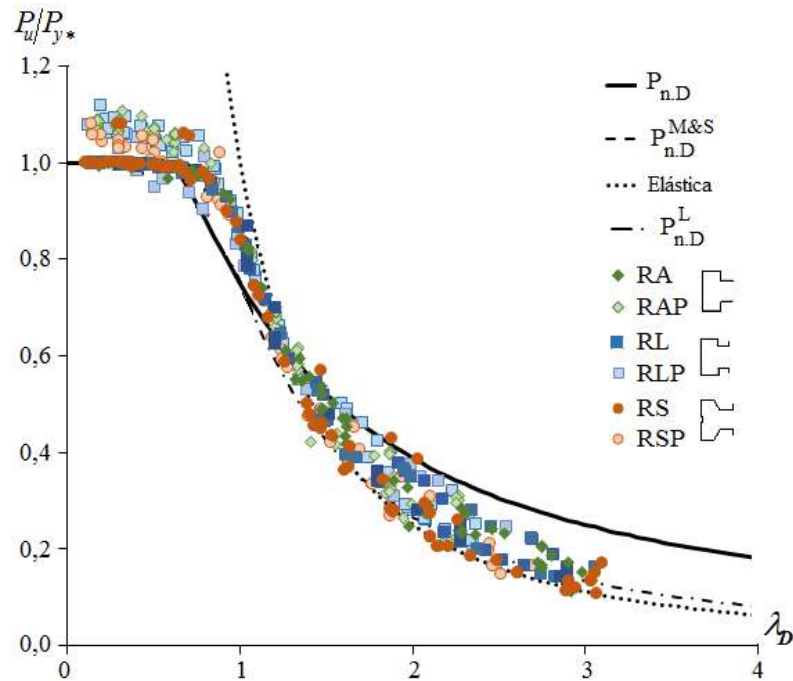


Figura 4.15. Comparação entre as curvas de dimensionamento  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$  e  $P_{n,D}^L$  e cargas última obtidas nesta dissertação.

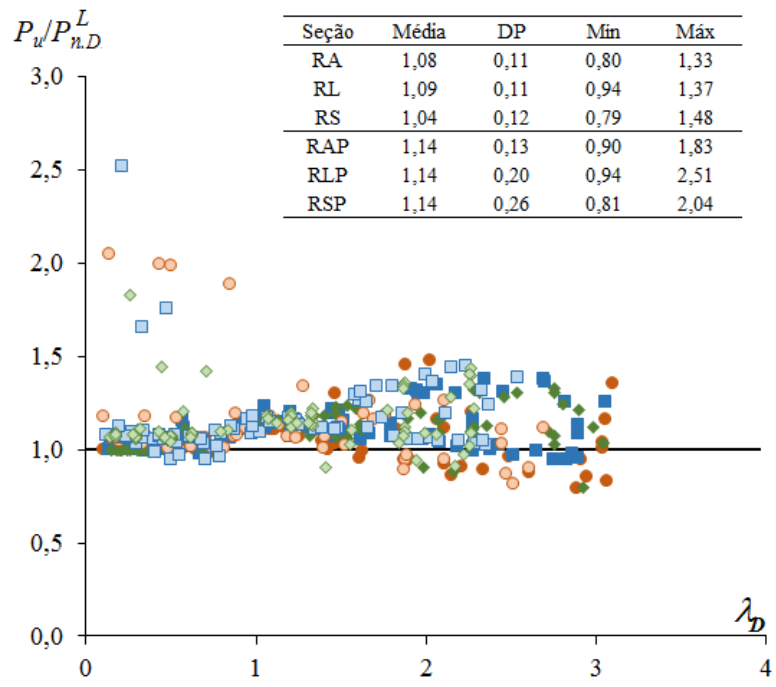


Figura 4.16. Nuvem de pontos  $P_u/P_{n,D}^L$  versus  $\lambda_D$  das colunas analisadas nesta dissertação.

## 5 Conclusões

---

Atualmente, os perfis formados a frio estão sendo cada vez mais utilizados, em especial as seções tipo rack, cujo constante crescimento industrial tem impulsionado a sua utilização devido ao baixo custo, rápida execução e elevada versatilidade. Estudos recentes, tais como LANDESMANN *et. al* (2017) e MOEN & SCHAFER (2008, 2011), tem mostrado a importância da verificação dos métodos atuais de dimensionamento, objetivando validar as inúmeras geometrias complexas que surgem para atender às demandas do mercado.

Este trabalho relatou uma investigação numérica, utilizando o programa de elementos finitos ANSYS (SAS,2009), sobre o comportamento de flambagem e pós-flambagem distorcional, resistência última e dimensionamento de colunas de PFF envolvendo: (i) condições de apoio engastadas, (ii) seções tipo rack comerciais maciças e perfuradas (RS, RL, RA, RSP, RLP, RAP) e (iii) carga de compressão centrada. Além disso, avalia a precisão das recomendações atuais do Método da Resistência Direta (MRD), codificada no anexo C da ABNT NBR 14762:2010, e verifica o dimensionamento das seções através das propostas de ajuste da curva do MRD realizadas por MOEN & SCHAFER (2008, 2011) e LANDESMANN *et. al* (2017) para prever a resistência última obtida numericamente. Para atingir esse objetivo, 396 colunas rack foram analisadas neste trabalho, correspondendo a uma combinação de (i) 33 geometrias, sendo 9 do tipo RS, 12 RL e 12 RA, (ii) seções maciças (RS, RL e RA) e perfuradas (RSP, RLP e RAP) e (iii) 6 tensões de escoamento para cada coluna, escolhidas aleatoriamente de modo a cobrir uma grande variedade de valores de esbeltez distorcional.

O primeiro passo consistiu na seleção dos comprimentos de várias geometrias de colunas associadas a modos de ruptura com flambagem distorcional "pura", assegurado devido a possuírem cargas críticas locais e globais de bifurcação superiores à carga crítica distorcional. Após essa seleção, foi abordada uma caracterização do comportamento dos modos de deformação das seções estudadas, com ênfase no modo distorcional, utilizando para tal a análise de flambagem através do *GBT*. Em seguida, a fim de realizar as análises de não-linearidade física e geométrica das colunas rack submetidas a compressão centrada, além de confirmar a existência do modo de



flambagem distorcional, foram empregados modelos numéricos no ANSYS. Os resultados encontrados (trajetórias de equilíbrio, cargas última e configuração deformada) foram apresentados, discutidos e comparados.

Dentre as diversas conclusões obtidas ao longo desta dissertação, devem-se destacar:

- (i) As seções maciças e perfuradas possuem similaridades no comportamento modal e das trajetórias de equilíbrio, apesar de nas perfuradas as cargas últimas serem menores devido à queda de rigidez. Além disso apresentam uma ou três semi-ondas no modo de flambagem distorcional e verifica-se uma redução da carga crítica distorcional, variando entre 14 e 41%.
- (ii) A ruptura ocorre no meio do vão, com as abas do enrijecedores fechando, região onde ocorre a plastificação da coluna. Nas colunas perfuradas essa ocorre na região central e entre os furos.
- (iii) A nuvem  $P_u/P_y$  versus  $\lambda_D$  relativa às cargas últimas das colunas apresentou uma tendência que pode ser descrita com precisão por curvas de dimensionamento do tipo “*Winter*”. Entretanto durante o dimensionamento via MRD, verificou-se que: (iii<sub>1</sub>) para as seções maciças esse método não atende a partir da esbeltez  $\lambda_D = 1,35$ , ou seja, aços com tensões de escoamento irrealisticamente altos e, (iii<sub>2</sub>) no caso das seções perfuradas, não atende.
- (iv) O método de dimensionamento proposto por MOEN & SCHAFER e prescrito pela AISI S100:2016 não se adequa perfeitamente a nuvem de resultados obtida nesta dissertação, onde a razão entre a área líquida e área bruta varia entre 0,65-0,76 na maioria das seções analisadas.
- (v) Os resultados provenientes do gráfico  $P_u/P_y^*$  versus  $\lambda_D$  permitem observar similaridades no comportamento das seções maciças e perfuradas, ilustrando que a curva que melhor se ajusta quanto ao dimensionamento é a proposta por LANDESMANN *et. al* (2017).

## 5.1 Sugestões de trabalhos futuros

Os resultados obtidos neste trabalho ilustram que a curva do MRD não atende ao dimensionamento das seções tipo rack perfuradas analisadas, bem como a partir da esbeltez  $\lambda_D = 1,2$  a proposta de MOEN & SCHAFER (2008, 2011) presente na AISI

S100:2016 também não satisfazem ao dimensionamento. Entretanto, verificou-se que a curva de dimensionamento proposta por LANDESMANN *et. al* (2017), para seções maciças e sob temperatura ambiente, possui um dimensionamento satisfatório para as seções rack maciças e perfuradas analisadas. Dessa forma, sugere-se como trabalhos futuros:

- (i) Análise experimental das colunas analisadas numericamente;
- (ii) Análises numéricas envolvendo um maior número de geometrias, bem como verificação da influência das relações  $h/d$  nas seções perfuradas no dimensionamento via MRD através das curvas: (ii<sub>1</sub>) codificada no anexo C da ABNT NBR 14762:2010, (ii<sub>2</sub>) proposta por MOEN & SCHAFER (2008, 2011) e (ii<sub>3</sub>) ajustada por LANDESMANN *et. al* (2017);
- (iii) Análises das seções maciças e perfuradas estudadas para outras condições de apoio, tais como apoiada, engastado-livre e engastado-apoiado, objetivando comparar e identificar a influência do apoio no dimensionamento;
- (iv) Análises utilizando outras geometrias de perfurações nas seções rack estudadas, variando as razões entre a área líquida e bruta para avaliar a influência no dimensionamento.

## 6 Bibliografia

---

ABNT, 2010. *Norma Brasileira para Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio (NBR 14762:2010)*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.

AISI, 2012. *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members (NAS)*, American Iron and Steel Institute, Washington DC.

AS/NZS, 2005. *Cold-Formed Steel Structures*, Standards of Australia (SA) and Standards of New Zealand (SNZ), Sydney-Wellington.

ANSYS, 2009. Reference Manual, *Swanson Analysis Systems (SAS), version 12.0.1*

BASAGLIA C., CAMOTIM D., SILVESTRE N., 2011. “Non-linear GBT formulation for open-section thin-walled members with arbitrary support conditions”, *Computers and Structures*, v.89, pp. 1906-1919.

BATISTA, E.M., 1988, “Étude de la stabilité des profils à parois minces et section ouverte de types U et C”, Tese de doutorado, Collection dès publications n° 119, Universidade de Liege, Bélgica.

BATISTA E.M., 2005. “Modeling Buckling Interaction”, *CISM International Centre for Mechanical Sciences, Phenomenological and Mathematical Modelling of Structural Instabilities*, v.470, pp. 135-194.

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, pp. 345-356.

BERNUZZI C., CORDOVA, B., SIMONCELLI M., 2014. “Unbraced steel frame design according to EC3 and AISC provisions”, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 114, pp. 157-177.

BERNUZZI C., MAXENTI F., 2015. “European alternatives to design perforated thin-walled cold-formed beam–columns for steel storage systems”, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 110, pp. 121-136.

BERNUZZI C., SIMONCELLI M., 2015. “European design approaches for isolated cold-formed thin-walled beam-columns with mono-symmetric cross-section”, *Engineering Structures*, v. 86, pp. 225-241.

BERNUZZI C., GOBETTI A., GABBIANELLI G., SIMONCELLI M., 2014. “Warping influence on the resistance of uprights in steel storage pallet racks”, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 101, pp. 224-241.

BEBIANO R., SILVESTRE N., CAMOTIM D., 2008. GBTul – A code for the buckling analysis of cold-formed steel members, *Proceedings of 19<sup>th</sup> International Specialty*

*Conference on Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction* (St. Louis, 14-15/10), R LaBoube, W.-W. Yu (eds.), 61-79.

BEBIANO R., PINA P., SILVESTRE N., CAMOTIM D., 2010a. *GBTUL 1.0 $\beta$  – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members*, DECivil/IST, Technical University of Lisbon. (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>)

BEBIANO R., PINA P., SILVESTRE N., CAMOTIM D., 2010b. *Manual user.GBTUL 1.0 $\beta$  – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members*, DECivil/IST, Technical University of Lisbon. (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>)

BONADA J., PASTOR M.M., ROURE F., CASAFONT M., 2015. “Pallet rack uprights subject to combined compression and bending”, *Eighth International Conference on Advances In Steel Structures, Lisbon, Portugal, July 22-24, 2015*

CAMPOS S. R., 2003. “Estudo Teórico-Experimental de sistemas de armazenagem industrial tipo Drive-in”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

CASAFONT M., PASTOR M.M., ROURE F., BONADA J., PEKÖZ, 2013. “Design of Steel Storage Rack Columns via the Direct Strength Method”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 139, n<sup>o</sup>. 5, pp. 669-679.

CASAFONT M., PASTOR M.M., ROURE F., PEKOZ T., 2011. “An experimental investigation of distortional buckling of steel storage rack columns”, *Thin-Walled Structures*, v. 49, pp. 933-946.

CASAFONT M., PASTOR M.M., ROURE F., CHILLARÓN A., LUSA A., SOMALO M.R., 2009. “Optimization of cold-formed steel pallet racking cross-sections for flexural-torsional buckling with constraints on the geometry”, *Engineering Structures*, v.31, 2711–2722.

BERNUZZI C., GOBETTI A., GABBIANELLI G., SIMONCELLI M., 2015. “Unbraced pallet rack design in accordance with European practice – Part 1: Selection of the method of analysis”, *Thin-Walled Structures*, v. 86, pp. 185-207.

BERNUZZI C., GOBETTI A., GABBIANELLI G., SIMONCELLI M., 2015. “Unbraced pallet rack design in accordance with European practice – Part 2: Essential verification checks”, *Thin-Walled Structures*, v. 86, pp. 208-229.

CAMOTIM D., SILVESTRE N., DINIS P.B., 2006. “Análise numérica de elementos estruturais de aço enformados a frio: desenvolvimentos recentes e perspectivas futuras”, *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, v.3, p.55-100

DINIS P.B., CAMOTIM D., 2010. “Local/distortional mode interaction in cold-formed steel lipped channel beams”, *Thin-Walled Structures*, v.48, pp.771–785.

DINIS P.B., BATISTA E.M., CAMOTIM D., SANTOS E.S., 2012. “Local-distortional-global interaction in lipped channel columns: experimental results, numerical simulations and design considerations”, *Thin-Walled Structures*, v.61, pp.2-13.

DINIS P.B., YOUNG B., CAMOTIM D., 2014. “Strength, interactive failure and design of web-stiffened lipped channel columns exhibiting distortional buckling”, *Thin-Walled Structures*. v.81, pp.195-209.

FIROUZIANHAJI A., SALEH A. AND SAMALI B, 2015. “ Non-linear behaviour of boltless beam to upright connections in cold formed steel storage racks”, *Eighth International Conference on Advances In Steel Structures, Lisbon, Portugal, July 22-24, 2015*

GARCIA R.A.S., LANDESMANN A., CAMOTIM D., 2014.” Distortional buckling, post-buckling and failure of cold-formed steel stiffened lipped channel columns”. *Proceedings of the XXXVI South-American Structural Engineering Congress* (Montevideo, 19-21 /11). (Portuguese)

GARCIA R.A.S, 2015. “Behaviour and DSM design of cold-formed steel web/flange stiffened lipped channel columns experiencing distortional failure”. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ.

GODLEY M. H. R., 1991. “Storage Racking in Design of Cold Formed Steel Members”, capítulo 11, Ed.Rhodes. Elsevier Applied Science, Amsterdam, p.361-399.

GUERRA C.S., 2014. “Manual de sistemas de armazenagem”, p.15-20

HANCOCK G. J., 1985. “Distortional buckling of steel storage rack columns”. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, v. 111, n. 12, p. 2770-2783.

HANCOCK G.J., KWON Y.B., BERNARD E.S., 1994. “Strength design curves for thin-walled sections undergoing distortional buckling”, *Journal Construction*, v.31, pp. 169-186.

HANCOCK G. J., 1997. “Design for distortional buckling of flexural members”. *Thin-Walled Structures*, v. 27, n. 1, p. 3-12.

HANCOCK, G.J., MURRAY, T.M., ELLIFRITT, D.S., 2001. *Cold-formed Steel Structures to the AISI Specification*, Marcel Dekker, New York.

HANCOCK G.J., 2003. “Cold-formed steel structures”, *Journal of Constructional Steel Research*, v.59, pp.473-487.

IYENGAR N.G.R., 1986. *Structural stability of columns and plates*, East-West Press PVT, New Delhi.

JIANG C., DAVIES J. M., 1997. “Design of Thin-Walled Purlins for Distortional Buckling,” *Thin-Walled Structures*, vol. 29, nº 1–4.

KESTI J., DAVIES J. M., 1999. “Local and Distortional Buckling of Thin-Walled Short Columns,” *Thin-Walled Structures*, vol. 34, nº. 2.

KESTI J., 2000. “Local and distortional buckling of perforated steel wall studs.” *Ph.D. thesis*, Helsinki Univ. of Technology, Espoo, Finland.

KWON Y.B., HANCOCK, G.J., 1992. “Tests of cold-formed channels with local and distortional buckling”, *Journal of Structural Engineering*. v.117(7), pp. 1786-1803.

LANDESMANN A., CAMOTIM D., 2013. “On the Direct Strength Method (DSM) design of cold-formed steel columns against distortional failure”, *Thin-walled Structures*, v.67, pp. 168-187.

LANDESMANN A., CAMOTIM D., BASAGLIA C., 2013. “Distortional Post-Buckling Behavior and Strength of Cold-Formed Steel Columns: How does the Cross-Section Geometry Affect it?”, *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council St. Louis, Missouri, April 16-20, 2013*

LANDESMANN A., CAMOTIM D., SILVA F.C.M., 2017. “DSM Design of Cold-Formed Steel Columns Failing in Distortional Modes at Elevated Temperatures”, *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council, San Antonio, Texas, March 21-24, 2017*.

LAU S.C.W., HANCOCK G.J., 1987. “Distortional buckling formulas for channel columns”, *Journal of Structural Engineering*, v.113(5), pp. 1063-1078.

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.” *Proceedings of the 20th Int. Spec. Conf. on Cold-Formed Steel Structures*, St. Louis, MO. November, 2010

LIM J.B.P., HANCOCK G.J., CLIFTON G.C., PHAM C.H., DAS R., 2016. “DSM for ultimate strength of bolted moment-connections between cold-formed steel channel members”, *Journal of Constructional Steel Research*, v.117, p.196-203.

MILLER T.H. AND PEKOZ T., 1994. “Load-Eccentricity Effects on Cold-Formed Steel Lipped-Channel Columns”, *Journal of Structural Engineering*, v. 120(3), pp. 805-823.

MIRANDA S.A., 2011. “Análise de ligações de sistemas de armazenagem industrial tipo porta-pallets”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

MOEN C.D., SCHAFER B.W., 2011. “Direct Strength Method for Design of Cold-Formed Steel Columns with Holes”, *Journal of Structural Engineering*, v.137, n°5, p. 559-570.

MOEN C.D., SCHAFER B.W. 2009a. “Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes”, *Engineering Structures*, 31(12), 2812–2824.

MOEN C.D., SCHAFER B.W. 2009b. “Elastic buckling of thin plates with holes in compression or bending”, *Thin-Walled Structures*, 47(12), 1597–1607.

MOEN C.D., SMITH F.H., 2014. “Finite strip elastic buckling solutions for thin-walled metal columns with perforation patterns”, *Thin-Walled Structures*, v.79, p. 187-201.

MOHRI F., BOUZERIRA C., POTIER-FERRY M., 2008. “Lateral buckling of thin-walled beam-column elements under combined axial and bending loads”, *Thin-Walled Structures*, v. 46(3), pp. 290-302.

PROLA LC, CAMOTIM D., 2002. "On the distortional post-buckling behavior of coldformed lipped channel steel columns", *Proceedings of SSRC annual stability conference (Seattle, 24–27/4)*, p. 571–90.

PROLA LC, CAMOTIM D., 2002. "On the distortional post-buckling behaviour of racksection cold-formed steel columns", In: Topping B, Bittnar Z, editors. *Proceedings (CD-ROM) of 16th international conference on computational structures technology (CST 2002 – Prague, 4–6/9)*, Civil-Comp Press (Stirling), p. 233–4.

REIS A., CAMOTIM D., 2001. *Structural Stability*. McGraw-Hill. (Portuguese)

RIBEIRO F. S., 2006. "Análise Teórico-Experimental de colunas curtas em Perfis Formados a frio de Seção Transversal tipo Rack". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

ROURE F., PASTOR M.M., CASAFONT M., SOMALO M.R., 2011. "Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and EC3", *Thin-Walled Structures*, v. 49, pp. 167-184.

SANTOS E.S., BATISTA E.M., CAMOTIM D., 2012. "Experimental investigation concerning lipped channel columns undergoing local–distortional–global buckling mode interaction", *Thin-Walled Structures*, v.54, pp. 19-34.

SCHAFFER B.W., PEKÖZ T., 1997. "The behavior and design of longitudinally stiffened thin-walled compression elements", *Thin-Walled Structures*, v.27(1), pp. 65-78.

SCHAFFER B.W., PEKÖZ T., 1998. "Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions". In: LaBoube R, Yu W-W, (Eds.). *Proceedings of 14th international specialty conference on cold-formed steel structures (St. Louis, 15-16-10)*; 1998, p. 69-76.

SCHAFFER B.W., 2000. "Distortional Buckling of Cold-formed Steel Columns". *The American Iron and Steel Institute (AISI) Final report*. [http://www.ce.jhu.edu/bschafer/dist\\_columns/col-dist-rpt.pdf](http://www.ce.jhu.edu/bschafer/dist_columns/col-dist-rpt.pdf). Acessado em 30 de março de 2016.

SCHAFFER B.W., 2002. "Local, Distortional, and Euler buckling of thin-walled columns", *Journal of Structural Engineering*, v.128(3), pp. 289-299.

SCHAFFER B.W., 2002. "Progress on the direct strength method", *16th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (Orlando, 17–18/10)*, 647–662

SCHAFFER B.W., 2003. "Cold-formed steel design by the direct strength method: bye–bye effective width", *SSRC Annual Technical Session & Meeting (Baltimore, 2–5/4)*, p. 357–377

SCHAFFER B.W., 2003. "Advances in the direct strength design of thin–walled members", *Advances in Structures (Asscca'03 – Sydney, 23–25/6)*, Hancock et al. (eds.), Balkema, Lisse, 333–339

SCHAFER B.W., 2005. "Direct Strength Method (DSM) Design Guide, American Iron and Steel Institute (AISI)" – Design Guide CF06–1, Washington DC

SCHAFER B.W., 2006. "Review: the direct strength method of cold-formed steel member design", *International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures* (SDSS 2006 – Lisboa, 6–8/9), p. 49–65

SCHAFER B.W., 2006. "Designing cold-formed steel using the direct strength method", *18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures* (Orlando, 26–27/10), p. 475–489.

SCHAFER B.W., 2006. "Developments and Progress in the Direct Strength Method of Cold-Formed Steel Member Design", *International Symposium on Innovative Design of Steel Structures* (Hong Kong, 10/11), B. Young (ed.), p. 43–62.

SCHAFER B.W., MOEN C.D., 2008. "Direct Strength Design of cold-formed steel members with perforations", *Research Report, The Johns Hopkins University, Department of Civil Engineering, Baltimore*

SHAH S.N.R., RAMLI SULONG N.H., KHAN R., JUMAAT M.Z., SHARIATI M., 2016. "Behavior of Industrial Steel Rack Connections", *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 70-71, p. 725-740.

SILVA G.G., 2011. "Análise Teórico-Experimental de Colunas Curtas Perfuradas", Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

SILVESTRE N., BEBIANO R., CAMOTIM D., 2005. "On the distortional post-buckling asymmetry of cold-formed steel channel columns with different stiffener configurations", *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Montreal, Quebec, 2005*.

SILVESTRE N., CAMOTIM D., 2006. "Local-plate and distortional post-buckling behavior of cold-formed steel lipped channel columns with intermediate stiffeners". *Journal of Structural Engineering*, v.132(4), pp. 529-540.

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.

TROUNCER A.N, RASMUSSEN K.J.R, 2014. "Flexural-torsional buckling of ultra light-gauge steel storage rack uprights", *Thin-Walled Structures*, v. 81, p. 159-174.

TROUNCER A.N, RASMUSSEN K.J.R, 2015. "Second order effects in locally unstable steel storage rack frames", *Eighth International Conference on Advances In Steel Structures, Lisbon, Portugal, July 22-24, 2015*

THOMPSON J.M.T., 1982. "Instabilities and Catastrophes in Science and Engineering", John Wiley & Sons, London.

EN15512:2009: Steel static storage systems – Adjustable pallet racking systems – Principles for structural design, CEN, Brussels; 2009.



YU C., SCHAFER B. W., 2002. "Local Buckling Tests on Cold-Formed Steel Beams," *Proceedings of the 16th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, R. A. LaBoube and W. W. Yu, Eds., University of Missouri-Rolla. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 129, n°. 12.

YU C., SCHAFER B. W., 2004. "Distortional Buckling Test on Cold-Formed Steel Beams," *Proceedings of the 17th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, R. A. LaBoube and W. W. Yu Eds., University of Missouri-Rolla. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 132, n°. 4.

ZHANG Y., WANG C., ZHANG Z., 2007. "Tests and finite element analysis of pin-ended channel columns with inclined simple edge stiffeners", *Journal of Constructional Steel Research*, v. 63(3), pp. 383-395.

ZIEMIAN, R.D., 2010. *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, 6th Edition, John Wiley & Sons, New York.

# APÊNDICE A

## Dados relativos às colunas maciças (RS, RL, RA)

---

As Tabelas A1 a A8 fornecem, para cada coluna maciça analisada neste trabalho: (i) carga crítica distorcional  $P_{cr,D}$ , (ii) tensão de escoamento  $f_y$ , (iii) carga de escoamento  $P_y$ , (iv) esbeltez distorcional  $\lambda_D$ , (v) carga última distorcional  $P_u$  e o valor  $(|\delta|/t)_{lim}$  associado, (vi) carga axial nominal da flambagem distorcional  $P_{D2}$ , (vii) carga de dimensionamento segundo o anexo C da ABNT NBR 14762:2010  $P_{n,D}$ , (viii) carga de dimensionamento segundo a AISI S100:2016 (MOEN & SCHAFER (2008, 2011))  $P_{n,D}^{M\&S}$  e (ix) a carga de dimensionamento segundo a proposta de LANDESMANN *et. al* (2017)  $P_{n,D}^L$ .

**Tabela A1: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RA – parte 1 – RA17**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RA17_16.58	151,68	1,52	6,69	0,21	6,68	0,01	6,69	6,69	6,69	6,69
		4,45	19,66	0,36	19,61	0,05	19,66	19,66	19,66	19,66
		12,78	56,44	0,61	55,89	0,20	56,44	55,93	55,93	53,77
		19,84	87,61	0,76	85,56	0,19	87,61	79,46	79,46	84,75
		74,23	327,77	1,47	160,37	9,37	327,77	173,93	173,93	143,36
		90,15	398,07	1,62	167,27	12,37	398,07	191,86	191,86	149,52
		178,56	788,49	2,28	188,50	22,51	788,49	266,01	266,01	168,72
		259,77	1147,08	2,75	191,82	26,26	1147,08	15,42	315,42	178,18
RA17_20	230,92	1,73	9,24	0,20	9,22	0,01	9,24	9,24	9,24	9,24
		4,17	22,19	0,31	22,14	0,03	22,19	22,19	22,19	22,19
		11,28	60,06	0,51	59,70	0,16	60,06	60,06	60,06	60,06
		35,12	187,04	0,90	174,90	0,44	187,04	152,04	152,04	157,77
		55,36	294,86	1,13	218,42	1,89	294,86	199,66	199,66	189,16
		112,37	598,57	1,61	258,57	10,36	598,57	290,29	290,29	227,05
		241,46	1286,13	2,36	293,08	19,95	1286,13	418,03	418,03	259,57
		320,74	1708,44	2,72	295,90	20,81	1708,44	475,49	475,49	270,44
RA17_30	707,08	3,90	31,18	0,21	31,14	0,01	31,18	31,18	31,18	31,18
		11,47	91,64	0,36	91,80	0,03	91,64	91,64	91,64	91,64
		32,93	263,11	0,61	260,66	0,17	263,11	260,72	260,72	250,69
		51,12	408,41	0,76	398,85	0,37	408,41	370,42	370,42	395,09
		191,23	1527,93	1,47	794,17	7,33	1527,93	810,80	810,80	668,28
		232,25	1855,66	1,62	841,23	8,50	1855,66	894,37	894,37	697,01
		460,04	3675,68	2,28	1045,23	14,25	3675,68	1240,02	1240,02	786,50
		669,26	5347,29	2,75	1100,43	15,92	5347,29	1470,36	1470,36	830,60
RA17_50	2197,20	7,28	96,89	0,21	97,29	0,01	96,89	96,89	96,89	96,89
		21,38	284,76	0,36	284,13	0,05	284,76	284,76	284,76	284,76
		61,40	817,58	0,61	808,88	0,12	817,58	810,18	810,18	779,00
		95,30	1269,10	0,76	1234,96	0,27	1269,10	1151,06	1151,06	1227,72
		356,55	4747,93	1,47	2541,33	5,08	4747,93	2519,51	2519,51	2076,64
		433,02	5766,34	1,62	2716,71	5,77	5766,34	2779,18	2779,18	2165,91
		857,73	11421,92	2,28	3232,87	8,38	11421,92	3853,29	3853,29	2444,00
		1247,80	16616,33	2,75	3357,54	9,25	16616,32	4569,05	4569,05	2581,04

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

**Tabela A2: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RA – parte 2 – RA20**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RA20_16.58	158,77	1,62	7,00	0,21	6,99	0,01	7,00	7,00	7,00	7,00
		4,75	20,58	0,36	20,52	0,06	20,58	20,58	20,58	20,58
		13,65	59,08	0,61	58,49	0,14	59,08	58,54	58,54	56,29
		21,18	91,71	0,76	89,40	0,32	91,71	83,18	83,18	88,72
		79,25	343,09	1,47	166,87	8,86	343,09	182,06	182,06	150,06
		96,25	416,67	1,62	173,23	12,05	416,67	200,82	200,82	156,51
		190,66	825,35	2,28	190,90	22,01	825,35	278,44	278,44	176,60
		277,36	1200,70	2,75	192,31	24,33	1200,70	330,16	330,16	186,51
RA20_20.15	1210,10	7,88	39,21	0,18	39,01	0,02	39,21	39,21	39,21	39,21
		33,29	165,66	0,37	164,18	0,16	165,66	165,66	165,66	165,66
		115,76	576,13	0,69	563,80	0,27	576,13	548,36	548,36	575,77
		248,03	1234,43	1,01	1035,76	0,94	1234,43	918,45	918,45	914,76
		532,57	2650,60	1,48	1220,31	9,63	2650,60	1397,27	1397,27	1147,24
		576,63	2869,87	1,54	1239,89	9,74	2869,87	1454,84	1454,84	1167,63
		1041,82	5185,16	2,07	1515,40	17,88	5185,16	1939,56	1939,56	1305,19
		2246,99	11183,26	3,04	1515,40	17,88	11183,26	2751,32	2751,32	1460,39
RA20_30	734,24	5,40	42,29	0,24	42,23	0,01	42,29	42,29	42,29	42,29
		15,00	117,48	0,40	117,16	0,07	117,48	117,48	117,48	117,48
		31,53	247,00	0,58	238,67	0,05	247,00	246,63	246,63	219,62
		48,59	380,63	0,72	374,39	0,18	380,63	355,21	355,21	377,06
		183,72	1439,11	1,40	802,87	6,90	1439,11	800,59	800,59	678,21
		236,98	1856,23	1,59	873,83	9,02	1856,23	911,55	911,55	718,19
		500,19	3917,98	2,31	1071,81	14,08	3917,98	1303,27	1303,27	820,00
		600,00	4699,80	2,53	1096,29	14,89	4699,80	1416,26	1416,26	842,45
RA20_50	2255,60	11,68	152,48	0,26	152,21	0,02	152,48	152,48	152,48	152,48
		31,95	417,06	0,43	415,79	0,06	417,05	417,06	417,06	417,06
		58,12	758,78	0,58	752,02	0,14	758,78	757,65	757,65	674,69
		190,49	2486,79	1,05	2034,37	0,96	2486,79	1792,38	1792,38	1756,16
		310,24	4050,16	1,34	2403,97	4,26	4050,16	2349,06	2349,06	2038,52
		409,76	5349,38	1,54	2687,50	5,45	5349,38	2711,79	2711,79	2176,45
		1045,58	13649,99	2,46	3280,91	8,46	13649,99	4241,18	4241,18	2566,96
		1354,57	17683,90	2,80	3314,15	9,14	17683,89	4766,76	4766,76	2662,78

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

**Tabela A3: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RA – parte 3 – RA24**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RA24_16.58	161,69	1,28	5,24	0,18	5,23	0,01	5,24	5,24	5,24	5,24
		4,05	16,56	0,32	16,52	0,03	16,56	16,56	16,56	16,56
		9,90	40,42	0,50	40,21	0,13	40,42	40,42	40,42	40,42
		34,97	142,87	0,94	131,88	0,56	142,87	112,45	112,45	115,07
		68,96	281,73	1,32	155,16	3,85	281,73	165,73	165,73	145,00
		155,16	633,89	1,98	156,00	4,83	633,89	248,51	248,51	171,81
		184,66	754,38	2,16	155,88	4,54	754,38	269,69	269,69	176,82
		337,46	1378,63	2,92	153,77	2,16	1378,63	354,73	354,73	193,06
RA24_23.86	1210,10	6,65	39,21	0,18	39,01	0,02	39,21	39,21	39,21	39,21
		28,11	165,66	0,37	164,18	0,13	165,66	165,66	165,66	165,66
		97,75	576,13	0,69	563,80	0,22	576,13	548,36	548,36	575,77
		209,44	1234,42	1,01	1035,76	0,78	1234,42	918,45	918,45	914,76
		449,71	2650,60	1,48	1220,31	7,97	2650,60	1397,27	1397,27	1147,24
		486,91	2869,87	1,54	1239,89	8,06	2869,87	1454,84	1454,84	1167,63
		879,74	5185,16	2,07	1515,40	14,80	5185,16	1939,56	1939,56	1305,19
		1897,40	11183,26	3,04	1515,40	14,80	11183,26	2751,32	2751,32	1460,39
RA24_30	782,99	2,38	17,62	0,15	17,60	0,00	17,62	17,62	17,62	17,62
		12,98	95,92	0,35	95,72	0,03	95,92	95,92	95,92	95,92
		32,04	236,85	0,55	235,16	0,14	236,85	236,85	236,85	236,85
		116,78	863,25	1,05	711,96	1,27	863,24	622,19	622,19	609,62
		195,92	1448,22	1,36	791,79	6,39	1448,22	828,26	828,26	712,97
		411,08	3038,70	1,97	993,10	12,12	3038,70	1197,63	1197,63	830,55
		458,27	3387,52	2,08	919,15	9,65	3387,52	1260,68	1260,68	845,86
		890,82	6584,95	2,90	1128,85	15,55	6584,95	1707,30	1707,30	933,17
RA24_50	2424,80	17,71	218,24	0,30	217,76	0,02	218,24	218,24	218,24	218,24
		26,94	331,95	0,37	331,00	0,04	331,95	331,95	331,95	331,95
		59,54	733,51	0,55	728,26	0,12	733,51	733,51	733,51	733,51
		107,78	1327,82	0,74	1296,98	0,25	1327,82	1221,94	1221,94	1301,69
		312,47	3849,62	1,26	2348,69	3,31	3849,62	2364,57	2364,57	2120,70
		703,05	8661,63	1,89	2957,97	7,03	8661,62	3565,09	3565,09	2535,11
		859,72	10591,78	2,09	3079,88	7,74	10591,77	3921,74	3921,74	2623,62
		1747,82	21533,19	2,98	3256,75	9,24	21533,19	5416,62	5416,62	2910,96

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

**Tabela A4: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RL – parte 1 – RL17**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RL17_16.58	159,28	1,52	7,03	0,21	7,02	0,01	7,03	7,03	7,03	7,03
		4,46	20,64	0,36	20,60	0,04	20,64	20,64	20,64	20,64
		12,80	59,27	0,61	58,76	0,19	59,27	58,73	58,73	56,47
		19,87	92,00	0,76	89,93	0,30	92,00	83,44	83,44	89,00
		74,32	344,19	1,47	160,34	9,63	344,19	182,65	182,65	150,54
		90,26	418,01	1,62	164,44	12,46	418,01	201,47	201,47	157,01
		178,80	828,00	2,28	175,73	22,74	828,00	279,33	279,33	177,17
		260,11	1204,56	2,75	176,85	25,39	1204,56	331,22	331,22	187,11
RL17_20	244,12	1,42	7,91	0,18	7,90	0,01	7,91	7,91	7,91	7,91
		7,71	43,06	0,42	42,92	0,08	43,06	43,06	43,06	43,06
		14,20	79,31	0,57	78,67	0,18	79,31	79,29	79,29	68,14
		40,27	224,98	0,96	201,53	0,76	224,98	174,24	174,24	176,99
		98,32	549,27	1,50	253,98	9,36	549,27	285,76	285,76	232,84
		121,87	680,83	1,67	264,19	12,14	680,83	318,23	318,23	243,62
		247,52	1382,80	2,38	273,61	12,80	1382,79	445,36	445,36	275,11
		349,97	1955,13	2,83	272,78	12,49	1955,13	520,83	520,83	289,03
RL17_30	801,39	2,76	23,16	0,17	23,15	0,01	23,16	23,16	23,16	23,16
		22,03	184,64	0,48	183,85	0,10	184,64	184,64	184,64	184,64
		42,93	359,74	0,67	354,79	0,22	359,74	346,55	346,55	359,46
		95,63	801,39	1,00	692,64	0,90	801,39	601,04	601,04	601,04
		203,85	1708,24	1,46	896,43	7,96	1708,24	912,54	912,54	755,05
		363,64	3047,28	1,95	1112,73	12,42	3047,28	1213,94	1213,94	847,08
		528,13	4425,68	2,35	1232,67	14,63	4425,68	1445,09	1445,09	899,67
		692,01	5798,94	2,69	1285,56	15,79	5798,94	1633,81	1633,81	935,64
RL17_50	2335,30	3,28	45,77	0,14	45,54	0,04	45,77	45,77	45,77	45,77
		21,67	302,65	0,36	300,31	0,07	302,65	302,65	302,65	302,65
		75,06	1048,31	0,67	1022,90	0,21	1048,31	1009,87	1009,87	1047,48
		120,81	1687,25	0,85	1586,73	0,37	1687,25	1427,54	1427,54	1503,41
		257,10	3590,76	1,24	2311,98	3,39	3590,76	2238,14	2238,14	2024,15
		662,16	9248,02	1,99	3216,76	8,02	9248,01	3606,38	3606,38	2485,73
		1011,87	14132,30	2,46	3461,76	9,54	14132,29	4391,04	4391,04	2657,66
		1565,66	21866,82	3,06	3530,41	10,40	21866,81	5340,49	5340,49	2823,17

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

**Tabela A5: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RL – parte 2 – RL20**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RL20_16.58	168,02	2,51	11,36	0,26	11,34	0,02	11,36	11,36	11,36	11,36
		5,94	26,88	0,40	26,81	0,06	26,88	26,88	26,88	26,88
		12,48	56,52	0,58	56,07	0,15	56,52	56,44	56,44	50,26
		32,09	145,32	0,93	134,71	0,54	145,32	115,30	115,30	118,42
		49,07	222,21	1,15	158,75	2,71	222,21	148,18	148,18	139,19
		120,23	544,38	1,80	183,65	16,96	544,38	235,69	235,69	172,58
		219,11	992,14	2,43	193,64	25,76	992,14	312,41	312,41	190,52
		260,58	1179,92	2,65	193,78	26,23	1179,92	337,96	337,96	195,35
RL20_20.15	257,54	3,94	21,66	0,29	21,61	0,03	21,66	21,66	21,66	21,66
		11,24	61,84	0,49	61,50	0,13	61,84	61,84	61,84	61,84
		18,58	102,22	0,63	100,90	0,24	102,22	100,50	100,50	99,96
		33,02	181,72	0,84	173,54	0,35	181,72	154,97	154,97	163,61
		77,88	428,57	1,29	253,28	5,04	428,57	257,58	257,58	228,16
		106,71	587,22	1,51	272,72	9,24	587,22	303,52	303,52	246,37
		224,46	1235,19	2,19	285,25	10,89	1235,19	435,11	435,11	282,89
		297,20	1635,48	2,52	285,25	10,89	1635,48	494,98	494,98	295,16
RL20_30	841,26	2,31	18,93	0,15	18,91	0,01	18,93	18,93	18,93	18,93
		14,83	121,48	0,38	121,20	0,08	121,48	121,48	121,48	121,48
		36,97	302,85	0,60	299,71	0,18	302,85	301,06	301,06	283,32
		111,06	909,91	1,04	752,41	1,11	909,91	661,03	661,03	650,36
		227,96	1867,68	1,49	964,56	7,74	1867,68	978,08	978,08	799,99
		378,52	3101,22	1,92	1163,80	11,42	3101,22	1255,64	1255,64	884,44
		439,98	3604,72	2,07	1218,62	12,38	3604,71	1348,38	1348,38	907,36
		748,54	6132,79	2,70	1335,89	14,69	6132,79	1720,82	1720,82	983,21
RL20_50	2995,10	17,20	234,81	0,28	234,44	0,04	234,81	234,81	234,81	234,81
		23,89	326,16	0,33	325,23	0,08	326,16	326,16	326,16	326,16
		61,61	841,33	0,53	831,02	0,14	841,33	841,33	841,33	841,33
		246,45	3365,29	1,06	2621,19	0,87	3365,29	2406,50	2406,50	2348,09
		461,16	6297,19	1,45	3416,66	4,17	6297,19	3386,50	3386,50	2812,95
		842,62	11505,98	1,96	4111,07	6,25	11505,97	4559,10	4559,10	3171,47
		1042,40	14233,92	2,18	4269,22	6,84	14233,91	5038,74	5038,74	3285,09
		1744,29	23818,24	2,82	4419,69	7,85	23818,23	6369,93	6369,93	3542,66

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

**Tabela A6: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RL – parte 3 – RL24**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RL24_16.58	166,73	1,26	5,40	0,18	5,38	0,02	5,40	5,40	5,40	5,40
		7,18	30,83	0,43	30,61	0,04	30,83	30,83	30,83	30,83
		10,91	46,83	0,53	46,42	0,06	46,83	46,83	46,83	46,83
		42,81	183,82	1,05	159,19	1,84	183,82	132,49	132,49	129,81
		56,85	244,11	1,21	170,33	5,38	244,11	155,57	155,57	142,48
		125,80	540,21	1,80	183,04	22,23	540,21	233,88	233,88	171,25
		201,84	866,73	2,28	187,30	34,78	866,73	292,40	292,40	185,46
		326,53	1402,20	2,90	189,06	46,51	1402,20	363,55	363,55	198,71
RL24_23.86	396,48	5,77	35,68	0,30	35,44	0,05	39,21	35,68	39,21	35,68
		10,79	66,65	0,41	66,09	0,05	165,66	66,65	165,66	66,65
		20,85	128,82	0,57	127,26	0,07	576,13	128,77	548,36	110,67
		36,09	223,02	0,75	218,74	0,18	1234,42	203,76	918,45	217,25
		93,93	580,48	1,21	404,90	4,40	2650,60	369,95	1397,27	338,82
		148,23	916,03	1,52	437,21	12,75	2869,87	470,40	1454,84	380,39
		264,39	1633,86	2,03	454,72	20,34	5185,16	623,91	1939,56	424,87
		524,79	3243,04	2,86	459,24	26,75	11183,26	853,89	2751,32	470,76
RL24_30	888,80	3,71	28,80	0,18	28,77	0,01	17,62	28,80	17,62	28,80
		21,15	164,34	0,43	163,87	0,08	95,92	164,34	95,92	164,34
		32,13	249,67	0,53	248,34	0,12	236,85	249,67	236,85	249,67
		126,11	979,91	1,05	784,49	0,84	863,24	706,27	622,19	692,00
		167,48	1301,29	1,21	824,84	1,73	1448,22	829,33	828,26	759,55
		370,62	2879,71	1,80	1022,48	12,06	3038,70	1246,76	1197,63	912,92
		594,64	4620,34	2,28	1145,13	14,98	3387,52	1558,71	1260,68	988,64
		962,01	7474,81	2,90	1193,02	17,06	6584,95	1938,02	1707,30	1059,27
RL24_50	2685,60	6,72	87,01	0,18	86,91	0,01	218,24	87,01	218,24	87,01
		38,35	496,57	0,43	495,30	0,04	331,95	496,57	331,95	496,57
		58,25	754,39	0,53	750,31	0,11	733,51	754,39	733,51	754,39
		228,64	2960,88	1,05	2318,96	0,96	1327,82	2134,07	1221,94	2090,95
		303,63	3931,98	1,21	2450,77	1,44	3849,62	2505,91	2364,57	2295,05
		671,92	8701,34	1,80	3125,07	7,29	8661,62	3767,20	3565,09	2758,47
		1078,06	13960,83	2,28	3377,41	8,72	10591,77	4709,81	3921,74	2987,26
		1744,09	22585,90	2,90	3449,81	9,66	21533,19	5855,93	5416,62	3200,71

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.



**Tabela A7: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RS – parte 1 – RS80 e RS107**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RS80_10	103,67	1,09	2,65	0,16	2,65	0,01	2,65	2,65	2,65	2,65
		4,08	9,96	0,31	9,95	0,06	9,96	9,96	9,96	9,96
		17,94	43,80	0,65	43,45	0,27	43,80	42,66	42,66	43,48
		26,51	64,70	0,79	63,30	0,38	64,70	57,37	57,37	61,11
		91,77	224,02	1,47	100,39	7,29	224,02	118,88	118,88	97,98
		112,84	275,44	1,63	101,18	10,12	275,44	131,93	131,93	102,45
		263,32	642,76	2,49	113,00	26,01	642,76	197,09	197,09	118,40
		359,64	877,89	2,91	116,26	29,05	877,89	226,74	226,74	123,67
RS80_20	452,39	5,79	28,28	0,25	28,24	0,03	28,28	28,28	28,28	28,28
		16,35	79,80	0,42	79,53	0,15	79,80	79,80	79,80	79,80
		36,78	179,56	0,63	177,54	0,23	179,56	176,54	176,54	175,59
		80,15	391,27	0,93	352,15	0,42	391,27	310,45	310,45	318,85
		126,85	619,28	1,17	419,94	1,41	619,28	406,72	406,72	378,85
		334,52	1633,13	1,90	451,88	7,05	1633,13	668,50	668,50	473,86
		507,40	2477,11	2,34	451,88	7,05	2477,11	812,58	812,58	507,22
		873,36	4263,73	3,07	451,88	7,05	4263,73	1037,54	1037,54	547,37
RS80_30	1065,00	8,38	61,34	0,24	61,30	0,03	61,34	61,34	61,34	61,34
		19,92	145,80	0,37	145,53	0,07	145,80	145,80	145,80	145,80
		42,43	310,55	0,54	308,34	0,19	310,55	310,55	310,55	310,55
		172,86	1265,33	1,09	939,37	0,80	1265,33	883,79	883,79	851,56
		179,26	1312,18	1,11	948,77	0,91	1312,18	902,37	902,37	862,16
		487,24	3566,58	1,83	1212,25	10,68	3566,58	1517,99	1517,99	1100,58
		647,74	4741,49	2,11	1285,92	12,16	4741,48	1737,92	1737,92	1155,92
		1344,58	9842,30	3,04	1285,92	12,16	9842,30	2421,42	2421,42	1285,28
RS80_30_10.7	1210,10	5,33	39,21	0,18	39,01	0,02	39,21	39,21	39,21	39,21
		22,51	165,67	0,37	164,18	0,11	165,67	165,67	165,67	165,67
		78,28	576,13	0,69	563,80	0,18	576,13	548,36	548,36	575,77
		167,72	1234,43	1,01	1035,76	0,62	1234,43	918,45	918,45	914,76
		360,14	2650,60	1,48	1220,31	6,36	2650,60	1397,27	1397,27	1147,24
		389,93	2869,87	1,54	1239,89	6,43	2869,87	1454,84	1454,84	1167,63
		704,51	5185,16	2,07	1515,40	11,81	5185,16	1939,56	1939,56	1305,19
		1519,47	11183,26	3,04	1515,40	11,81	11183,26	2751,32	2751,32	1460,39
RS107_10	57,32	1,36	3,58	0,25	3,58	0,02	3,58	3,58	3,58	3,58
		2,81	7,43	0,36	7,41	0,07	7,43	7,43	7,43	7,43
		7,81	20,64	0,60	20,46	0,26	20,64	20,51	20,51	19,31
		14,59	38,54	0,82	37,19	0,47	38,54	33,39	33,39	35,41
		41,92	110,75	1,39	55,20	4,24	110,75	62,04	62,04	52,76
		75,87	200,45	1,87	56,45	10,69	200,45	83,42	83,42	59,70
		105,97	279,97	2,21	57,00	15,97	279,97	97,67	97,67	63,15
		188,82	498,85	2,95	58,18	24,66	498,85	126,91	126,91	68,63

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

**Tabela A8: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RS – parte 2 – RS107 e RS140**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RS107_20	242,40	0,56	2,93	0,11	2,93	0,00	2,93	2,93	2,93	2,93
		5,62	29,70	0,35	29,62	0,04	29,70	29,70	29,70	29,70
		13,38	70,68	0,54	70,12	0,16	70,68	70,68	70,68	70,68
		54,50	287,99	1,09	214,52	1,12	287,99	201,15	201,15	193,82
		91,20	481,91	1,41	229,34	2,57	481,91	266,27	266,27	224,67
		163,87	865,88	1,89	237,58	6,22	865,88	356,39	356,39	253,43
		204,24	1079,19	2,11	241,17	8,18	1079,19	395,56	395,56	263,09
		312,51	1651,25	2,61	245,70	10,98	1651,25	480,92	480,92	280,61
RS107_30	726,11	8,34	61,06	0,29	65,99	0,03	61,06	61,06	61,06	61,06
		10,16	74,36	0,32	80,31	0,04	74,36	74,36	74,36	74,36
		45,87	335,75	0,68	356,05	0,24	335,75	321,54	321,54	335,75
		50,00	366,03	0,71	386,03	0,30	366,03	343,91	343,91	364,04
		157,48	1152,78	1,26	675,54	1,89	1152,78	708,07	708,07	635,05
		266,80	1952,95	1,64	800,88	10,10	1952,95	929,70	929,70	719,36
		511,14	3741,57	2,27	965,44	13,60	3741,57	1268,24	1268,24	806,58
		928,83	6799,01	3,06	1016,09	14,92	6799,00	1660,51	1660,51	877,80
RS140_30	605,32	1,85	19,62	0,18	19,56	0,01	6,43	19,62	11,77	19,62
		7,00	74,15	0,35	73,80	0,04	24,31	74,15	31,06	74,15
		17,91	189,83	0,56	187,43	0,14	62,23	189,83	189,83	189,83
		29,61	313,79	0,72	302,14	0,29	102,86	292,84	292,84	310,85
		116,80	1237,82	1,43	562,06	2,39	405,76	674,69	674,69	564,82
		148,05	1569,05	1,61	565,65	3,40	514,34	760,94	760,94	595,18
		264,02	2798,09	2,15	567,02	5,14	917,22	1005,28	1005,28	660,99
		477,05	5055,70	2,89	567,03	5,38	1657,27	1315,84	1315,84	720,75
RS140_50	2227,80	3,23	57,03	0,16	56,84	0,01	18,70	57,03	34,22	57,03
		31,53	556,95	0,50	552,55	0,09	182,57	556,95	544,64	556,95
		42,43	749,43	0,58	741,79	0,11	245,66	748,31	748,31	666,37
		121,13	2139,58	0,98	1875,09	0,95	701,36	1630,62	1630,62	1643,57
		272,55	4814,06	1,47	2731,24	4,33	1578,06	2554,60	2554,60	2105,56
		445,79	7873,95	1,88	3366,56	6,06	2581,10	3258,83	3258,83	2324,75
		519,76	9180,54	2,03	3523,69	6,14	3009,41	3505,72	3505,72	2387,30
		1212,08	21409,16	3,10	3645,13	6,72	7017,99	5153,42	5153,42	2702,37

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

# APÊNDICE B

## Dados relativos as colunas perfuradas (RSP, RLP, RAP)

---

As Tabelas B1 a B8 fornecem, para cada coluna maciça analisada neste trabalho: (i) carga crítica distorcional  $P_{cr,D}$ , (ii) tensão de escoamento  $f_y$ , (iii) carga de escoamento  $P_y$ , (iv) esbeltez distorcional  $\lambda_D$ , (v) carga última distorcional  $P_u$  e o valor  $(|\delta|/t)_{lim}$  associado, (vi) carga de escoamento da área líquida da seção  $P_{ynet}$ , (vii) carga axial nominal da flambagem distorcional  $P_{D2}$ , (viii) carga de dimensionamento segundo o anexo C da ABNT NBR 14762:2010  $P_{n,D}$ , (ix) carga de dimensionamento segundo a AISI S100:2016 (MOEN & SCHAFER (2008, 2011))  $P_{n,D}^{M\&S}$  e (x) a carga de dimensionamento segundo a proposta de LANDESMANN *et. al* (2017)  $P_{n,D}^L$ .

**Tabela B1: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RAP – parte 1 – RAP17**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{ynet}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RAP17_16.58	119,90	1,20	5,29	0,17	3,83	0,10	2,18	3,58	5,29	3,58	3,58
		3,52	15,54	0,30	11,20	0,15	6,41	10,52	15,54	10,52	10,52
		10,10	44,61	0,50	31,90	0,24	18,40	30,21	44,61	44,21	30,21
		15,68	69,25	0,63	49,23	0,52	28,56	46,89	62,81	62,81	45,63
		58,67	259,09	1,21	115,74	3,12	106,83	175,43	137,49	137,49	102,44
		71,26	314,67	1,33	121,90	8,36	129,75	213,06	151,66	151,66	108,07
		141,15	623,29	1,88	139,58	19,56	257,00	422,03	210,27	210,27	125,03
		205,34	906,74	2,26	146,21	24,89	373,88	613,95	249,33	249,33	133,06
RAP17_20	176,41	1,46	7,78	0,17	5,66	0,03	3,21	5,27	7,78	5,27	5,27
		4,29	22,86	0,30	16,50	0,06	9,43	15,48	22,86	15,48	15,48
		12,32	65,64	0,50	46,94	0,26	27,07	44,44	65,64	65,05	44,44
		19,13	101,89	0,63	72,30	0,40	42,01	68,99	92,42	92,42	67,14
		71,57	381,20	1,21	175,11	4,89	157,18	258,11	202,29	202,29	150,73
		86,92	462,97	1,33	182,50	6,58	190,90	313,47	223,14	223,14	159,01
		172,16	917,05	1,88	201,15	11,98	378,13	620,93	309,37	309,37	183,95
		250,46	1334,10	2,26	213,67	21,19	550,09	903,31	366,84	366,84	195,77
RAP17_30	563,64	3,11	24,86	0,17	18,38	0,53	10,25	16,83	24,86	16,83	16,83
		9,14	73,05	0,30	53,31	0,35	30,12	49,46	73,05	49,46	49,46
		26,25	209,73	0,50	151,57	0,04	86,48	142,00	209,73	207,83	142,00
		40,75	325,56	0,63	233,34	0,28	134,24	220,43	295,27	295,27	214,51
		152,44	1217,97	1,21	563,17	3,50	502,21	824,68	646,32	646,32	481,58
		185,14	1479,22	1,33	598,20	6,79	609,93	1001,57	712,93	712,93	508,03
		366,72	2930,02	1,88	792,79	13,06	1208,14	1983,90	988,47	988,47	587,73
		533,49	4262,52	2,26	897,89	15,04	1757,57	2886,12	1172,08	1172,08	625,49
RAP17_50	1791,40	50,06	666,58	0,50	484,73	0,04	274,85	451,34	666,58	660,55	451,34
		77,70	1034,72	0,63	743,49	0,17	426,65	700,60	938,47	938,47	681,78
		290,70	3871,04	1,21	1836,01	2,99	1596,15	2621,05	2054,18	2054,18	1530,59
		353,05	4701,35	1,33	1967,39	4,13	1938,51	3183,25	2265,89	2265,89	1614,66
		699,31	9312,41	1,88	2532,43	7,51	3839,79	6305,36	3141,63	3141,63	1867,98
		1017,34	13547,46	2,26	2773,93	8,59	5586,02	9172,88	3725,19	3725,19	1987,98

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{ynet}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

**Tabela B2: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RAP – parte 2 – RAP20**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{y_{net}}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RAP20_16.58	124,96	0,83	3,61	0,14	2,59	0,12	1,46	2,42	3,61	2,42	2,42
		3,74	16,19	0,29	11,53	0,13	6,55	10,86	16,19	10,86	10,86
		9,05	39,19	0,46	27,72	0,07	15,85	26,28	39,19	39,19	26,28
		14,14	61,23	0,57	43,08	0,01	24,76	41,06	57,91	57,91	35,70
		54,18	234,54	1,12	116,07	1,73	94,85	157,29	133,20	133,20	101,88
		105,31	455,87	1,56	134,49	13,17	184,36	305,71	185,58	185,58	121,38
		170,45	737,88	1,99	144,48	19,49	298,42	494,84	232,35	232,35	133,01
		183,31	793,54	2,06	145,89	20,36	320,93	532,17	240,17	240,17	134,64
RAP20_20.15	180,99	1,52	7,55	0,18	5,71	0,09	3,43	5,35	7,55	5,35	5,35
		4,46	22,19	0,37	16,69	0,10	10,07	15,73	22,19	15,73	15,73
		12,80	63,71	0,69	47,66	0,18	28,91	45,17	63,71	63,45	45,17
		19,87	98,89	1,01	73,07	0,07	44,87	70,11	91,06	91,06	67,98
		74,34	369,98	1,48	177,56	4,75	167,86	262,28	201,70	201,70	154,20
		90,28	449,33	1,54	184,81	6,57	203,87	318,54	222,66	222,66	162,73
		178,83	890,04	2,07	201,54	12,81	403,82	630,97	309,36	309,36	188,40
		260,16	1294,80	3,04	204,89	14,17	587,46	917,91	367,10	367,10	200,55
RAP20_30	583,84	3,29	25,75	0,17	18,78	0,41	10,41	17,27	25,75	17,27	17,27
		9,66	75,67	0,29	54,53	0,32	30,60	50,74	75,67	50,74	50,74
		27,74	217,25	0,50	154,96	0,02	87,86	145,69	217,25	215,28	145,69
		43,05	337,23	0,62	238,68	0,18	136,38	226,15	305,86	305,86	219,30
		161,07	1261,62	1,20	582,77	4,47	510,24	846,07	669,48	669,48	497,43
		195,61	1532,23	1,33	618,49	6,74	619,68	1027,55	738,48	738,48	524,94
		387,47	3035,04	1,87	814,71	12,74	1227,46	2035,37	1023,90	1023,90	607,75
		563,68	4415,29	2,25	909,97	14,65	1785,67	2961,00	1214,09	1214,09	646,94
RAP20_50	1802,90	17,90	233,66	0,29	170,63	0,21	94,50	156,70	233,66	156,70	156,70
		51,39	670,86	0,50	482,28	0,06	271,31	449,89	670,86	664,78	449,89
		79,77	1041,36	0,62	739,76	0,30	421,16	698,36	944,49	944,49	677,21
		298,42	3895,89	1,20	1809,75	2,97	1575,61	2612,68	2067,37	2067,37	1536,06
		362,43	4731,54	1,33	1940,59	4,52	1913,57	3173,08	2280,44	2280,44	1621,00
		717,90	9372,20	1,87	2496,14	7,54	3790,39	6285,22	3161,79	3161,79	1876,74
		1044,38	13634,43	2,25	2705,54	8,62	5514,16	9143,58	3749,11	3749,11	1997,76

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{y_{net}}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

**Tabela B3: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RAP – parte 3 – RAP24**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{ynet}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RAP24_16.58	110,67	1,20	4,88	0,17	3,42	0,19	1,86	3,18	4,88	3,18	3,18
		3,51	14,34	0,29	9,97	0,21	5,47	9,34	14,34	9,34	9,34
		10,08	41,18	0,49	28,03	0,51	15,71	26,81	41,18	40,81	26,81
		15,65	63,92	0,61	42,52	0,63	24,38	41,61	57,98	57,98	39,85
		58,54	239,15	1,19	107,98	6,74	91,21	155,68	126,90	126,90	93,45
		71,09	290,44	1,31	112,80	7,64	110,77	189,07	139,98	139,98	98,73
		140,82	575,31	1,84	118,18	18,88	219,42	374,51	194,09	194,09	114,58
		204,87	836,94	2,22	118,45	19,81	319,21	544,83	230,14	230,14	122,06
RAP24_23.86	283,66	2,34	13,76	0,18	9,69	0,11	5,22	8,94	13,76	8,94	8,94
		5,58	32,88	0,27	23,01	0,11	12,48	21,35	32,88	21,35	21,35
		15,68	92,39	0,46	63,96	0,13	35,07	59,99	92,39	92,36	59,99
		51,19	301,70	0,83	195,91	0,42	114,50	195,90	220,70	220,70	178,00
		107,12	631,35	1,20	271,14	3,76	239,62	409,95	330,22	330,22	241,48
		177,87	1048,34	1,55	282,34	7,20	397,88	680,71	423,90	423,90	274,40
		280,23	1651,70	1,94	283,02	8,19	626,87	1072,49	524,06	524,06	299,54
		349,13	2057,80	2,17	283,02	8,64	781,00	1336,18	578,96	578,96	310,69
RAP24_30	616,34	8,54	63,11	0,26	75,19	0,49	24,07	41,08	63,11	41,08	41,08
		25,22	186,44	0,44	175,29	0,02	71,11	121,37	186,44	186,33	121,37
		64,57	477,29	0,71	438,56	0,47	182,04	310,71	394,26	394,26	309,01
		145,28	1073,91	1,07	571,50	2,08	409,59	699,09	631,74	631,74	484,84
		255,35	1887,54	1,41	516,49	8,13	719,90	1228,74	841,20	841,20	571,64
		403,56	2983,09	1,78	761,44	11,95	1137,74	1941,91	1045,73	1045,73	629,77
		589,96	4360,98	2,15	860,15	14,25	1663,26	2838,88	1243,93	1243,93	672,64
RAP24_50	1907,50	23,55	290,14	0,31	209,31	0,05	110,66	188,87	290,14	203,10	188,87
		43,49	535,82	0,43	382,86	0,19	204,36	348,81	535,82	533,11	348,81
		148,70	1831,96	0,79	1230,34	0,47	698,70	1192,56	1396,17	1396,17	1125,60
		273,88	3374,18	1,07	1755,78	1,81	1286,90	2196,50	1970,86	1970,86	1508,62
		367,19	4523,83	1,24	1895,44	3,45	1725,37	2944,90	2293,29	2293,29	1655,25
		847,79	10444,71	1,89	2384,09	7,60	3983,57	6799,24	3426,22	3426,22	1993,52
		1240,01	15276,97	2,28	2582,11	8,85	5826,58	9944,91	4069,68	4069,68	2122,72

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{ynet}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

**Tabela B4: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RLP – parte 1 – RLP17**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{ynet}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RLP17_16.58	126,22	1,20	5,57	0,21	4,10	0,09	2,40	3,85	5,57	3,85	3,85
		3,53	16,36	0,36	11,98	0,17	7,05	11,32	16,36	11,32	11,32
		10,14	46,97	0,61	34,07	0,31	20,26	32,51	46,97	46,54	32,51
		15,74	72,91	0,76	52,35	0,40	31,44	50,46	66,12	66,12	49,45
		58,90	272,75	1,47	122,36	3,67	117,64	188,77	144,73	144,73	108,54
		71,53	331,25	1,62	125,91	7,50	142,87	229,26	159,65	159,65	114,41
		141,69	656,14	2,28	138,76	20,95	283,00	454,12	221,36	221,36	132,13
		206,12	954,54	2,75	143,85	27,19	411,70	660,64	262,47	262,47	140,55
RLP17_20	189,98	1,10	6,16	0,15	4,54	0,08	2,66	4,26	6,16	4,26	4,26
		6,00	33,51	0,35	24,52	0,17	14,46	23,20	33,51	27,71	23,20
		11,05	61,73	0,47	44,87	0,23	26,62	42,72	61,73	61,71	42,72
		31,34	175,08	0,80	122,43	0,50	75,52	121,18	135,60	135,60	113,57
		76,51	427,45	1,25	187,31	6,02	184,38	295,85	222,39	222,39	165,26
		94,84	529,83	1,39	193,93	7,03	228,54	366,71	247,65	247,65	174,83
		192,63	1076,12	1,98	211,76	18,50	464,17	744,81	346,59	346,59	201,87
		272,35	1521,53	2,35	217,08	23,28	656,29	1053,08	405,33	405,33	213,40
RLP17_30	632,84	18,13	151,94	0,41	103,18	0,13	65,54	105,16	151,94	147,19	105,16
		28,10	235,48	0,51	154,22	0,23	101,57	162,98	235,48	233,35	162,98
		68,16	571,14	0,79	356,84	0,58	246,35	395,30	445,91	445,91	373,22
		105,15	881,16	0,98	506,07	0,94	380,08	609,87	574,36	574,36	467,55
		284,22	2381,76	1,61	783,82	10,66	1027,34	1648,46	953,94	953,94	622,87
		434,99	3645,16	2,00	940,59	13,67	1572,28	2522,89	1163,39	1163,39	674,37
		506,59	4245,16	2,15	990,58	14,45	1831,08	2938,16	1246,86	1246,86	691,53
RLP17_50	1814,90	16,84	235,21	0,30	167,36	0,03	101,45	162,79	235,21	162,79	162,79
		58,33	814,71	0,56	543,99	0,22	351,41	563,88	814,71	784,83	563,88
		93,89	1311,26	0,71	848,56	0,32	565,59	907,55	1109,43	1109,43	903,47
		199,81	2790,59	1,03	1515,56	1,25	1203,68	1931,42	1739,39	1739,39	1394,54
		514,60	7187,19	1,66	2260,91	7,01	3100,08	4974,40	2802,73	2802,73	1804,91
		786,39	10983,05	2,05	2643,51	9,02	4737,37	7601,59	3412,54	3412,54	1950,13
		1216,77	16994,00	2,55	2878,72	10,39	7330,10	11761,90	4150,41	4150,41	2086,10

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{ynet}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

**Tabela B5: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RLP – parte 2 – RLP20**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{ynet}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RLP20_16.58	127,63	1,91	8,63	0,26	14,86	0,02	3,64	5,91	8,63	5,91	5,91
		4,51	20,42	0,40	23,09	0,02	8,62	13,99	20,42	15,29	13,99
		9,48	42,93	0,58	51,54	0,49	18,13	29,41	42,93	42,87	29,41
		24,38	110,39	0,93	79,63	1,54	46,62	75,63	87,58	87,58	72,63
		37,28	168,79	1,15	106,17	1,54	71,29	115,64	112,56	112,56	91,85
		91,33	413,52	1,80	133,89	12,02	174,65	283,30	179,03	179,03	121,36
		166,44	753,64	2,43	144,15	21,30	318,29	516,32	237,31	237,31	136,34
		197,94	896,28	2,65	146,01	25,09	378,53	614,04	256,72	256,72	140,26
RLP20_20.15	192,81	2,95	16,22	0,24	11,77	0,10	6,85	11,11	16,22	11,11	11,11
		8,41	46,29	0,41	33,31	0,10	19,55	31,71	46,29	44,84	31,71
		13,91	76,52	0,52	54,66	0,08	32,32	52,43	76,52	75,24	52,43
		24,72	136,05	0,70	95,40	0,07	57,46	93,20	116,02	116,02	93,07
		58,31	320,85	1,07	176,69	2,05	135,51	219,82	192,84	192,84	151,95
		79,89	439,62	1,25	190,72	5,81	185,67	301,19	227,23	227,23	167,87
		168,04	924,74	1,81	211,74	12,74	390,55	633,54	325,75	325,75	198,56
		222,50	1224,42	2,09	216,04	15,81	517,12	838,85	370,57	370,57	208,48
RLP20_30	697,49	30,65	251,10	0,50	181,94	0,28	106,05	172,03	251,10	249,61	172,03
		92,08	754,40	0,86	508,78	0,58	318,61	516,84	548,06	548,06	455,26
		189,00	1548,50	1,23	700,12	4,69	653,99	1060,87	810,93	810,93	602,69
		313,83	2571,23	1,59	878,21	10,03	1085,93	1761,54	1041,06	1041,06	682,10
		364,78	2988,68	1,71	937,47	10,93	1262,23	2047,53	1117,94	1117,94	703,12
		620,62	5084,70	2,23	1110,89	14,23	2147,46	3483,51	1426,73	1426,73	771,03
RLP20_50	2565,80	14,73	201,17	0,23	149,91	0,04	84,96	137,82	201,17	137,82	137,82
		20,46	279,42	0,27	209,01	0,08	118,01	191,43	279,42	191,43	191,43
		52,78	720,74	0,44	526,96	0,10	304,40	493,78	720,74	717,09	493,78
		211,13	2882,94	0,88	1881,32	0,52	1217,58	1975,09	2061,57	2061,57	1708,73
		395,06	5394,60	1,20	2548,56	2,62	2278,34	3695,82	2901,10	2901,10	2182,12
		721,84	9856,78	1,62	3292,54	5,55	4162,89	6752,85	3905,62	3905,62	2530,73
		892,99	12193,71	1,80	3514,94	6,26	5149,87	8353,87	4316,51	4316,51	2637,81
		1494,27	20404,27	2,33	3775,42	7,59	8617,50	13978,91	5456,90	5456,90	2874,56

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{ynet}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.



**Tabela B6: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RLP – parte 3 – RLP24**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{ynet}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RLP24_16.58	119,95	0,63	2,70	0,12	1,94	0,50	1,08	1,80	2,70	1,80	1,80
		3,62	15,55	0,29	11,03	0,21	6,24	10,38	15,55	10,38	10,38
		12,17	52,25	0,54	36,10	0,47	20,96	34,90	52,25	50,62	34,90
		25,21	108,26	0,78	70,07	1,03	43,43	72,31	84,52	84,52	69,08
		50,16	215,38	1,10	109,25	4,01	86,41	143,87	124,92	124,92	96,22
		92,53	397,32	1,49	126,72	12,32	159,41	265,39	170,07	170,07	113,98
		160,89	690,91	1,96	133,79	28,63	277,20	461,50	220,51	220,51	127,05
		180,21	773,87	2,08	135,10	31,97	310,49	516,91	232,20	232,20	129,50
RLP24_23.86	310,32	4,52	27,93	0,25	19,90	0,15	11,20	18,65	27,93	18,65	18,65
		8,44	52,16	0,34	36,94	0,18	20,93	34,84	52,16	41,24	34,84
		16,32	100,82	0,47	70,48	0,30	40,45	67,34	100,82	100,79	67,34
		28,25	174,56	0,61	118,90	0,44	70,03	116,60	159,48	159,48	111,62
		73,52	454,34	0,99	257,71	1,84	182,29	303,48	289,56	289,56	230,65
		116,02	716,96	1,24	308,72	5,49	287,65	478,90	368,18	368,18	269,25
		206,94	1278,80	1,66	343,08	13,44	513,07	854,17	488,33	488,33	308,88
		410,75	2538,29	2,34	362,67	26,01	1018,39	1695,46	668,33	668,33	347,81
RLP24_30	690,93	24,98	194,08	0,43	139,10	0,22	77,87	129,64	194,08	193,10	129,64
		98,04	761,75	0,86	504,49	0,71	305,62	508,81	549,04	549,04	449,47
		130,19	1011,59	0,99	603,85	1,20	405,86	675,70	644,70	644,70	513,55
		288,11	2238,61	1,47	721,61	10,15	898,16	1495,29	969,20	969,20	653,24
		462,26	3591,73	1,86	852,44	13,88	1441,05	2399,11	1211,70	1211,70	718,71
		747,84	5810,72	2,37	963,27	16,80	2331,34	3881,29	1506,57	1506,57	777,66
RLP24_50	2121,10	9,43	122,17	0,20	91,19	0,59	49,02	81,60	122,17	81,60	81,60
		28,89	374,16	0,34	273,49	0,47	150,12	249,92	374,16	309,41	249,92
		69,20	896,17	0,53	642,29	0,05	359,55	598,60	896,17	872,78	598,60
		112,84	1461,23	0,68	1026,65	0,13	586,26	976,03	1256,05	1256,05	976,00
		289,73	3752,02	1,09	1939,53	1,76	1505,36	2506,17	2191,56	2191,56	1692,76
		388,45	5030,40	1,26	2094,42	3,90	2018,27	3360,08	2550,09	2550,09	1853,95
		750,10	9713,80	1,75	2513,25	7,49	3897,31	6488,37	3507,31	3507,31	2155,23
		1098,73	14228,55	2,12	2745,55	9,08	5708,69	9504,01	4179,12	4179,12	2304,57

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{ynet}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

**Tabela B7: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RSP – parte 1 – RSP80 e RSP107**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$(\delta/t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{ynet}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RSP80_20	298,15	3,82	18,63	0,20	12,57	0,47	7,04	12,07	18,63	12,07	12,07
		10,77	52,59	0,34	35,08	0,28	19,86	34,06	52,59	43,49	34,06
		24,24	118,33	0,51	78,09	0,36	44,69	76,64	118,33	116,35	76,64
		52,82	257,87	0,75	163,74	0,68	97,39	167,02	204,60	204,60	162,87
		83,60	408,14	0,94	235,50	1,44	154,14	264,34	268,05	268,05	212,51
		220,47	1076,32	1,53	292,75	7,05	406,50	697,12	440,58	440,58	286,80
		334,40	1632,55	1,88	294,47	7,05	616,58	1057,38	535,53	535,53	311,31
		575,59	2810,04	2,47	294,47	7,05	1061,29	1820,02	683,79	683,79	339,74
RSP80_30	806,08	6,34	46,43	0,19	31,77	0,26	17,53	30,07	46,43	30,07	30,07
		15,08	110,35	0,30	74,61	0,27	41,66	71,46	110,35	63,92	71,46
		32,11	235,05	0,43	156,66	0,19	88,74	152,21	235,05	234,53	152,21
		130,83	957,70	0,88	571,29	0,44	361,55	620,15	668,92	668,92	536,66
		135,68	993,17	0,89	585,41	0,46	374,94	643,12	682,99	682,99	546,65
		368,78	2699,48	1,47	850,43	4,11	1019,10	1748,03	1148,94	1148,94	762,47
		490,27	3588,75	1,70	938,93	4,94	1354,81	2323,86	1315,40	1315,40	809,72
		1017,69	7449,47	2,45	938,93	4,94	2812,30	4823,84	1832,73	1832,73	915,84
RSP80_30_10.7	832,50	3,67	26,97	0,15	18,51	0,47	10,24	17,52	26,97	17,52	17,52
		15,49	113,97	0,30	76,50	0,58	43,27	74,02	113,97	66,02	74,02
		53,85	396,35	0,56	257,35	0,38	150,48	257,41	396,35	377,25	257,41
		115,39	849,23	0,81	511,56	0,71	322,43	551,54	631,86	631,86	509,61
		247,76	1823,51	1,19	754,20	5,11	692,34	1184,29	961,26	961,26	705,38
		268,26	1974,36	1,24	784,81	7,39	749,62	1282,26	1000,87	1000,87	721,93
		484,67	3567,18	1,67	1045,82	11,79	1354,37	2316,73	1334,34	1334,34	830,44
		1045,33	7693,63	2,45	1045,82	11,79	2921,09	4996,68	1892,80	1892,80	946,27
RSP107_20	192,16	0,56	2,93	0,11	2,32	0,00	1,20	1,98	2,93	1,98	1,98
		5,62	29,70	0,35	23,48	0,04	12,15	20,03	29,70	21,26	20,03
		13,38	70,68	0,54	55,59	0,16	28,92	47,67	70,68	70,12	47,67
		54,50	287,99	1,09	170,06	1,12	117,82	194,25	181,61	181,61	144,74
		91,20	481,91	1,41	181,81	2,57	197,16	325,04	237,61	237,61	170,98
		163,87	865,88	1,89	188,34	6,22	354,25	584,02	315,35	315,35	195,01
		204,24	1079,19	2,11	191,18	8,18	441,52	727,89	349,19	349,19	202,98
		312,51	1651,25	2,61	194,77	10,98	675,56	1113,74	423,03	423,03	217,29

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{ynet}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.

**Tabela B8: Cargas últimas distorcionais e estimativa do MRD para as colunas RSP – parte 2 – RSP107 e RSP140**

Colunas	$P_{cr,D}$	$f_y$	$P_y$	$\lambda_D$	$P_u$	$( \delta /t)_{lim}$	$P_{D2}$	$P_{ynet}$	$P_{n,D}$	$P_{n,D}^{M\&S}$	$P_{n,D}^L$
RSP107_30	590,23	97,57	714,18	0,89	471,19	0,83	269,61	462,46	494,96	494,96	396,65
		162,59	1190,14	1,14	549,36	2,47	449,30	770,66	653,11	653,11	486,98
		284,99	2086,11	1,51	647,05	10,60	787,54	1350,84	863,39	863,39	565,10
		468,32	3428,12	1,94	768,92	13,61	1294,17	2219,85	1089,20	1089,20	622,70
		553,49	4051,58	2,11	803,65	14,47	1529,54	2623,56	1175,07	1175,07	640,45
RSP140_30	505,18	5,84	61,88	0,30	48,11	1,01	32,44	46,82	61,88	46,82	46,82
		14,95	158,43	0,49	120,34	1,01	83,06	119,86	158,43	158,43	119,86
		24,71	261,88	0,63	195,61	0,76	137,31	198,13	244,40	244,40	193,00
		97,48	1033,04	1,24	462,98	2,11	541,63	781,55	563,08	563,08	438,63
		123,56	1309,48	1,40	468,42	3,02	686,56	990,69	635,06	635,06	466,69
		220,35	2335,19	1,87	469,30	3,64	1224,35	1766,70	838,97	838,97	526,17
		398,13	4219,31	2,51	469,30	3,68	2212,20	3192,14	1098,16	1098,16	578,55
RSP140_50	1902,40	2,76	48,70	0,14	39,82	0,13	15,96	29,22	48,70	29,22	19,48
		26,93	475,60	0,43	379,07	0,40	155,90	285,36	475,60	465,08	190,24
		36,23	639,97	0,50	506,64	0,39	209,78	383,98	639,97	639,01	255,99
		103,44	1827,07	0,85	1326,70	0,34	598,92	1096,24	1392,44	1392,44	706,40
		232,74	4110,89	1,28	1786,35	1,90	1347,56	2466,54	2181,46	2181,46	1340,44
		380,67	6723,85	1,64	1916,14	6,72	2204,10	4034,31	2782,84	2782,84	1608,89
		443,84	7839,61	1,77	1981,16	7,59	2569,85	4703,76	2993,66	2993,66	1681,03
		1035,04	18282,07	2,70	2244,98	10,23	5992,92	10969,24	4400,70	4400,70	2014,64

Nota:  $P_{cr,D}$ ,  $P_y$ ,  $\lambda_D$ ,  $P_u$ ,  $P_{D2}$ ,  $P_{ynet}$ ,  $P_{n,D}$ ,  $P_{n,D}^{M\&S}$ ,  $P_{n,D}^L$  são dadas em kN e  $f_y$  em kN/cm<sup>2</sup>.