



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Mestrado em Engenharia Civil

---



Dário Lúcio Vale Theodoro

Análise da aplicação do Método da Seção Efetiva em colunas tipo  
rack com perfurações.

Ouro Preto-MG  
Novembro - 2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA SEÇÃO EFETIVA EM COLUNAS TIPO RACK COM PERFURAÇÕES.**

**DÁRIO LÚCIO VALE THEODORO**

**ORIENTADORES: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho**  
**Prof. Dr. Flávio Teixeira de Souza**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

Ouro Preto, novembro de 2017

T385a

Theodoro, Dário Lúcio Vale Theodoro.

Análise da aplicação do método da seção efetiva em colunas tipo rack com perfurações. [manuscrito] / Dário Lúcio Vale Theodoro Theodoro. - 2017. 82f.:

Orientadora: Profª. MScª. Arlene Maria Cunha Sarmanho.  
Coorientador: Prof. Dr. Flávio Teixeira de Souza.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Metálica.

1. Estruturas metálicas. 2. Construção metálica . 3. Perfis formados a frio .  
I. Sarmanho, Arlene Maria Cunha . II. Souza, Flávio Teixeira de . III.  
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.014

Catálogo: [www.sisbin.ufop.br](http://www.sisbin.ufop.br)

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA SEÇÃO EFETIVA EM  
COLUNAS TIPO RACK COM PERFURAÇÕES**

**AUTOR: DÁRIO LÚCIO VALE THEODORO**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 30 de novembro de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Arlene Maria Cunha Sarmanho, D. Sc. – UFOP (Presidente)



Prof. Flávio Teixeira de Souza, D. Sc. – IFMG



Prof. Vinícius Nicchio Alves, D. Sc. – Sem filiação



Prof. Ana Amélia Oliveira Mazon, D. Sc. – UFSJ

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela presença em todos os momentos na minha vida acadêmica.

A minha família, filho, pai e esposa, pelo incentivo e apoio.

Ao professor, amigo e orientador Flávio pelo seu brilhantismo didático, acadêmico e profissional, pessoa que admiro e tenho como referência e exemplo de ser humano.

A professora e orientadora Arlene pelos ensinamentos. Pela oportunidade de participar da equipe “Amigos LabEst”. Pela paciência e compreensão durante toda a fase de dissertação, períodos de muitas dificuldades e vitórias.

A todos amigos do laboratório de estruturas, um ambiente acadêmico e familiar, local de muita harmonia, pesquisas e empatia.

Ao parceiro e amigo Messias pela presença e companheirismo em todos os momentos, disciplinas, dissertação e na busca pelo tão sonhado início, da carreira docente.

Ao parceiro e amigo Gabriel pela disposição e boa vontade em ajudar e solucionar quaisquer problemas e dificuldades durante essa caminhada.

Ao amigo Mário Cabello pelas inúmeras ajudas nesta caminhada.

Aos amigos Tiago e Jairo que desde da graduação caminhamos em parceria.

Aos amigos do IFMG-OP, Flávio, Mário, Marcelo, Balu, Sandra, Ney, Gilberto, Luiz Alcides, Gilberto, José Wallace, Enilton, Sylvio Nelson e Renato com quais trabalhei concomitantemente em toda essa caminhada. Declaro que o apoio, carinho e flexibilização de vocês foram essenciais para a conclusão desse trabalho.

Aos amigos e colegas do IFMG-SL, minha nova casa, pela acolhida e incentivo para conclusão dessa dissertação e em especial ao amigo Leandro, companheiro de sala e amigo de muitos tempos por ouvir minhas angústias naturais relacionado à prazos e reconhecimento de curso pelo Mec.

A família Cabello Russo que me acolheu nessa cidade amada de Ouro Preto.

A universidade federal de Ouro Preto pela acolhida e oportunidade dessa qualificação.

## RESUMO

Os perfis formados a frio com perfurações são bastante empregados na construção civil e em sistemas de armazenagem. As perfurações são necessárias para a montagem das estruturas ou para criar caminho para instalações. As seções estão sujeitas aos modos de flambagem local, distorcional e global. Um estudo paramétrico foi realizado, analisando o comportamento das colunas com perfurações ao longo do comprimento, submetidas à compressão centrada, restrita ao modo local de instabilidade, em seções compostas por placas esbeltas e colunas curtas. Os resultados numéricos foram obtidos usando o Método dos Elementos Finitos, com a utilização do programa (ANSYS, 2011). Analisou-se a aplicação do Método da Seção Efetiva (ABNT NBR 14762, 2010), considerando o efeito das perfurações, o valor do coeficiente de flambagem local foi reduzido em relação à seção completa em função das características geométricas dos furos. Para a aplicação deste método em colunas perfuradas, foi necessário fazer a verificação da área efetiva. Para isso foram propostas três equações e foi analisado o intervalo de aplicação em função da altura dos furos. Essas equações consideram o efeito do modo localizado de placas. Os resultados das três equações foram comparados com os resultados obtidos com o Método dos Elementos Finitos. Os valores calculados pelo Método da Seção Efetiva resultou em valores próximos comparados com os resultados numéricos, em seções perfuradas submetidas à compressão centrada, analisando o modo local de instabilidade.

Palavras-chave: Estruturas metálicas, instabilidade estrutural, perfis de aço formados a frio e modo local.

## **ABSTRACT**

Cold formed steel sections with holes are widely used in civil construction and steel storage systems, called racks. Existing perforations are required to facilitate the assembly and execution of installations. The sections are under local, distortional or global buckling influence. A parametric study was carried out to verify the buckling influence in columns with hole along the length, analyzing the behavior of the perforated sections under centered compression, restricted to the local mode in sections composed of slender plates and short columns. The numerical results were obtained using the Finite Element Method, using the (ANSYS, 2011) software. The applications of the Effective Section Method (ABNT NBR 14762, 2010), considering the effect of perforations was analyzed by reducing the value of the local buckling coefficient for complete section, considering the characteristics of the perforations. For the application of this method in perforated columns, it was necessary to verify the effective area, then three equations were proposed and the application interval was analyzed as a function of the height of the holes. These equations consider the effect of the localized mode of plates. The results of the three equations were compared with the Finite Element Method. The values calculated by the Effective Section Method presented good results compared with the numerical results for perforated sections submitted to centered compression, analyzing the local mode of instability.

Keywords: Steel structures, structural instability, cold formed steel sections, local mode.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	10
1 INTRODUÇÃO .....	11
1.1 Atualização da bibliografia.....	15
1.2 Justificativa .....	18
1.3 Objetivo .....	18
1.4 Metodologia .....	18
1.5 Descrição do trabalho .....	19
2 ANÁLISE TEÓRICA .....	20
2.1 Modo Local.....	20
2.2 Teoria de placas .....	20
2.3 Métodos de dimensionamento .....	22
2.3.1 Método da Largura Efetiva.....	23
2.3.2 Método da Resistência Direta.....	23
2.3.3 Método da Seção Efetiva.....	23
3 ANÁLISE NUMÉRICA .....	27
3.1 Descrição dos modelos analisados.....	27
3.1.1 Seção analisada.....	27
3.1.2 Comprimento da coluna.....	28
3.1.3 Tipologia das perfurações.....	30
3.1.4 Colunas analisadas.....	31
3.2 Tipo de elemento .....	32
3.3 Refinamento da malha .....	33
3.3.1 Comparação entre os resultados obtidos utilizando o Método dos Elementos Finitos e valores teóricos.....	34

3.4	Condições de contorno.....	35
3.5	Análises via elementos finitos das colunas.....	36
3.5.1	Análise linear .....	36
3.5.2	Análise não linear .....	36
3.6	Validação do modelo de Elementos Finitos .....	39
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	40
4.1	Classificação de acordo com a esbeltez.....	40
4.2	Análise da inclinação do enrijecedor .....	41
4.3	Comparação entre os resultados normativos e numéricos para perfis sem perfurações .....	43
4.4	Verificação da flambagem distorcional nas seções .....	44
4.5	Coefficiente de flambagem local para seções com perfurações.....	45
5	MÉTODO DA SEÇÃO EFETIVA EM PERFIS RACK COM PERFURAÇÕES	50
5.1	Estratégia para resolução utilizando o Método da Seção Efetiva, considerando o efeito das perfurações .....	50
5.1.1	Aplicação do $k_{1,liq}$ e propriedades da seção líquida no Método da Seção Efetiva.....	50
5.2	Efeito dos furos na capacidade resistente da coluna.....	53
5.2.1	Análise do número de furos .....	53
5.2.2	Análise do modo localizado.....	56
5.2.3	Verificação da área modificada adequada .....	58
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64
	APÊNDICE.....	67
A.	Curvas de flambagem para seções perfuradas .....	67
B.	Representação gráfica do Modo Localizado de Placas.....	77
C.	Representação gráfica da variação de $k_l$ .....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representação dos sistemas de armazenagem estática. (FONTE: BERTOLINI, 2017).....	11
Figura 1.2. Representação dos sistemas de armazenagem dinâmico. (FONTE: BERTOLINI, 2017).....	12
Figura 1.3. Representação dos sistemas de armazenagem especiais. (FONTE: BERTOLINI, 2017).....	12
Figura 1.4. Sistema de armazenamento industrial tipo Porta paletes. (FONTE: MILLENNIUMRACKS, 2017).....	13
Figura 1.5. Representação das tipologias de perfurações usuais em perfis Racks. (FONTES: (a) BERTONI, 2017; (b) ÁGUIA, 2017); (c) VICTORYRACK, 2017; (d) MECALUX, 2017.).....	14
Figura 1.6. Modos de instabilidade, perfil Rack compressão centrada .....	15
Figura 1.7. Modos de flambagem observados na placa: (a) Modo Local; (b) Modo Localizado de Placa. ....	16
Figura 2.1. Modo de instabilidade local de um perfil rack. ....	20
Figura 2.2. Modo de instabilidade de uma placa sob compressão uniforme (Sarmanho (1991).).....	21
Figura 2.3. Distribuição de tensão em uma placa e a largura efetiva. ....	22
Figura 2.4. Comparação entre os valores teóricos e experimentais, realizados por Batista (2009) .....	26
Figura 3.1. Representação da seção transversal tipo rack.....	27
Figura 3.2. Tipologia das perfurações analisadas .....	31
Figura 3.3. Elemento utilizado na análise numérica: SHELL181 .....	33
Figura 3.4. Malha utilizada nas análises. ....	33
Figura 3.5. Representação dos furos na alma da coluna. ....	35
Figura 3.6. Representação das condições de contorno. ....	35
Figura 3.7. Representação das imperfeições geométricas .....	37
Figura 3.8. Diagrama Multilinear (Almeida,2013).....	38
Figura 3.9. Fluxograma das análises numérica.....	38
Figura 4.1. Curvas de flambagem de Winter para espessura 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0mm, aço $f_y=354$ MPa. ....	40
Figura 4.2. Representação da inclinação do enrijecedor. ....	41

Figura 4.3. Curva de flambagem, seções com enrijecedores inclinados e retos, espessura de 1,2mm. ....	42
Figura 4.4. Relação entre as cargas críticas e comprimentos, $b_w = 120$ mm, $t = 2$ mm e $h_f/b_w = 10\%$ , (ANSYS, 2011). ....	44
Figura 4.5. Relação entre as cargas críticas e comprimentos, $b_w = 200$ mm e $t = 1,2$ mm, $h_f/b_w = 10\%$ , (ANSYS, 2011). ....	45
Figura 4.6. Variação do valor de $k_l$ e $t = 1,2$ mm. ....	47
Figura 5.1. Representação gráfica das variáveis das equações A, B e C. ....	59
Figura C.1. Variação do valor de $k_l$ e $t = 1,4$ mm. ....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Tabela para determinação do coeficiente de flambagem local, para o perfil Rack.....	24
Tabela 3.1. Propriedades geométricas das seções selecionadas. ....	28
Tabela 3.2. Comprimento máximo para coluna curta.....	29
Tabela 3.3. Representação dos 3 primeiros modos locais. ....	29
Tabela 3.4. Participação modal em função da altura do protótipo .....	30
Tabela 3.5. Representação das almas das colunas analisadas.....	32
Tabela 3.6. Comparação entre os resultados numérico e teórico de tensão crítica para placa sem furo.....	34
Tabela 3.7. Comparação entre os resultados numéricos e experimentais.....	39
Tabela 4.1. Valores de $\lambda_p$ em função da largura e espessura dos elementos .....	41
Tabela 4.2. Comparação das propriedades geométricas das seções com enrijecedores inclinados e retos. ....	42
Tabela 4.3. Comparação entre os métodos de dimensionamento da (ABNT NBR 14762, 2010) com resultados numéricos. ....	43
Tabela 4.4. Seções que não apresentam modo distorcional.....	45
Tabela 4.5. Valores de $k_1$ para seções perfuradas. ....	46
Tabela 4.6. Comparação entre os valores de $N_1$ proposto e $N_1$ numérico. ....	48
Tabela 5.1. Resultados obtidos para a seção 150-50-30-25- t (1,2, 1,4 e 1,6 mm).....	51
Tabela 5.2. Resultados obtidos para a seção 180-50-30-25mm-t (1,2, 1,4 e 1,6 mm). .	51
Tabela 5.3. Resultados obtidos para a seção 200-50-30-25mm-t (1,2, 1,4 e 1,6 mm). .	52
Tabela 5.4. Variação do número de furos nos protótipos $b_w=150$ mm e $b_w=180$ mm. .	54
Tabela 5.5 Resistência em função do número de furos. ....	55
Tabela 5.6. Representação gráfica do Modo Localizado de placa ( $b_w=150$ mm, $t=1,2$ mm). ....	56
Tabela 5.7. Representação gráfica do Modo Localizado de placa $b_w=200$ mm, $t=1,2$ mm. ....	57
Tabela 5.8. Comparação entre a resistência pelo M.E.F e as equações propostas. ....	59
Tabela 5.9. Comparação entre a resistência pelo M.E.F as equações propostas .....	60
Tabela 5.10. Comparação entre a resistência pelo M.E.F e as equações propostas. ....	60

# 1 INTRODUÇÃO

A utilização de perfis de aço formados a frio em sistemas estruturais de armazenamento industrial, conhecidos como Racks, é muito utilizado mundialmente devido às suas vantagens, aceitabilidade de formas diversas, rapidez na fabricação, versatilidade, bem como a possibilidade de reaproveitamento da estrutura, que pode ser remontada em outro lugar.

De acordo com Bertolini (2017), os sistemas de armazenagem podem ser classificados em:

- Estático;
- Dinâmico;
- Especiais.

Os sistemas de armazenagem estática possuem diversas composições de armazenagem sendo os mais usuais aqueles compostos por Estante leve, Porta paleta convencional, Porta paleta dupla profundidade, Porta paleta de corredor estreito, Drive in e Cantilever. Esses sistemas estão representados na Figura 1.1.

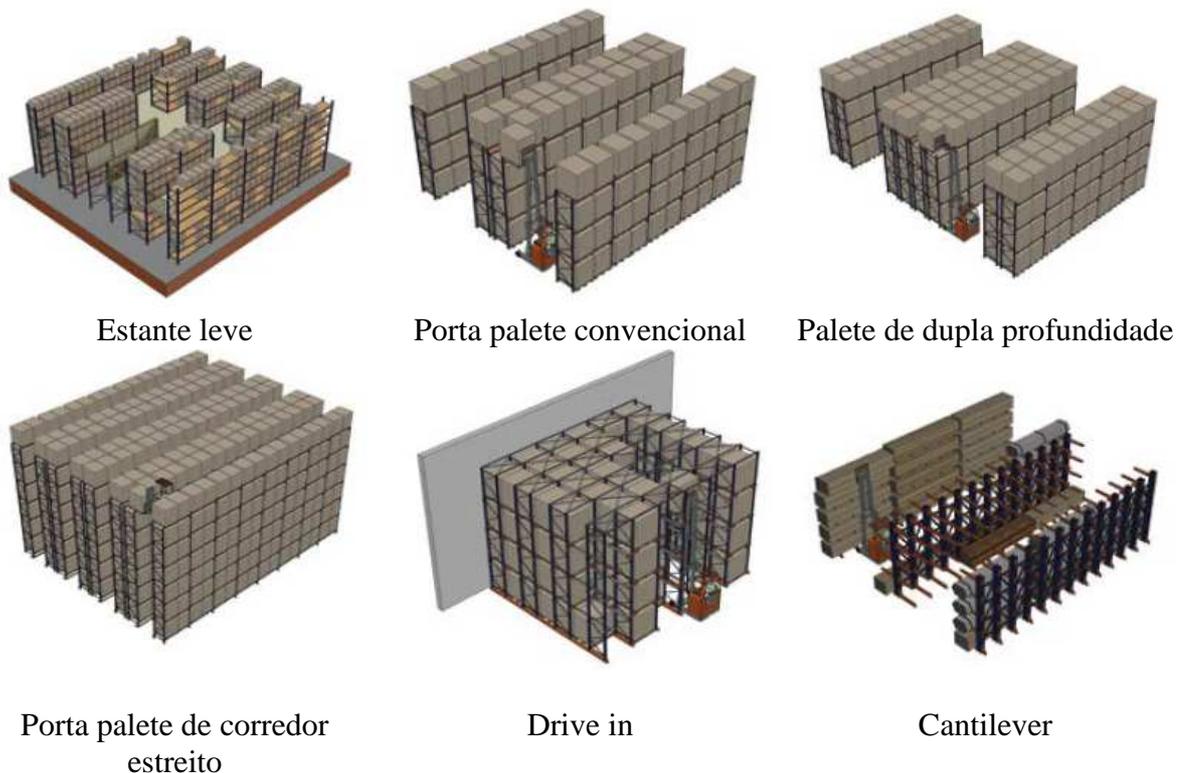
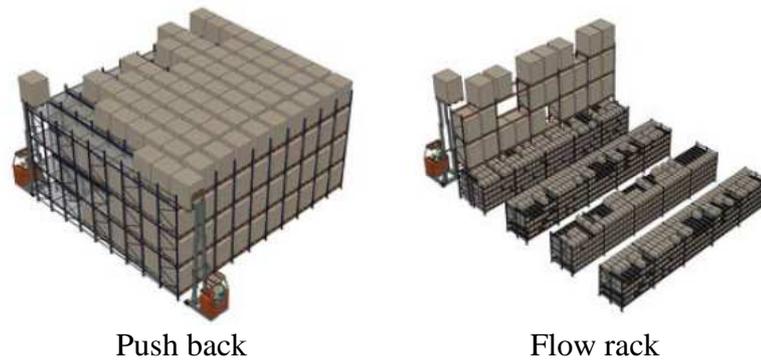


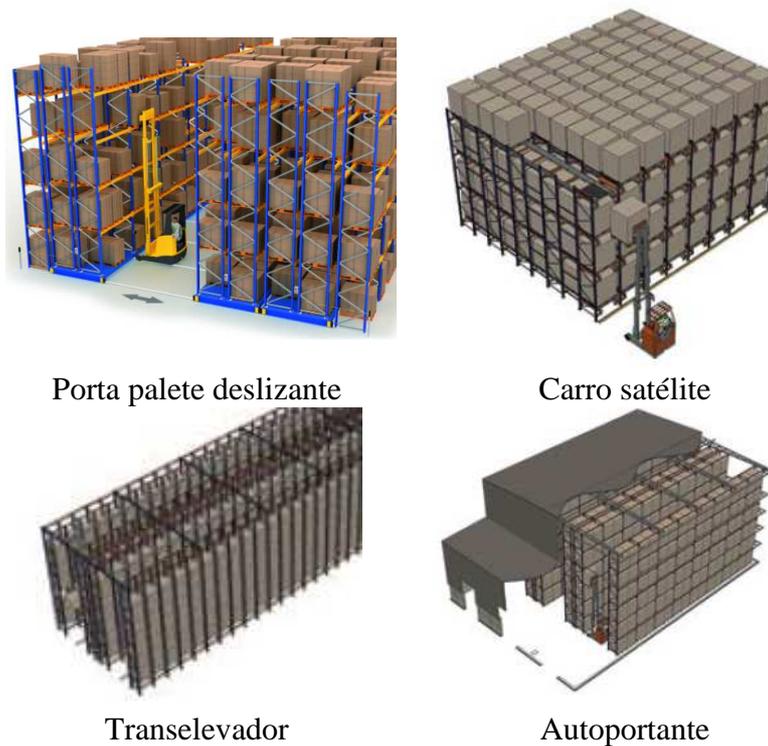
Figura 1.1. Representação dos sistemas de armazenagem estática. **(FONTE: BERTOLINI, 2017)**

Outro modelo muito utilizado em sistemas de armazenagem é o sistema dinâmico, esse sistema possui as seguintes composições: Push back e Flow rack, conforme representado na Figura 1.2.



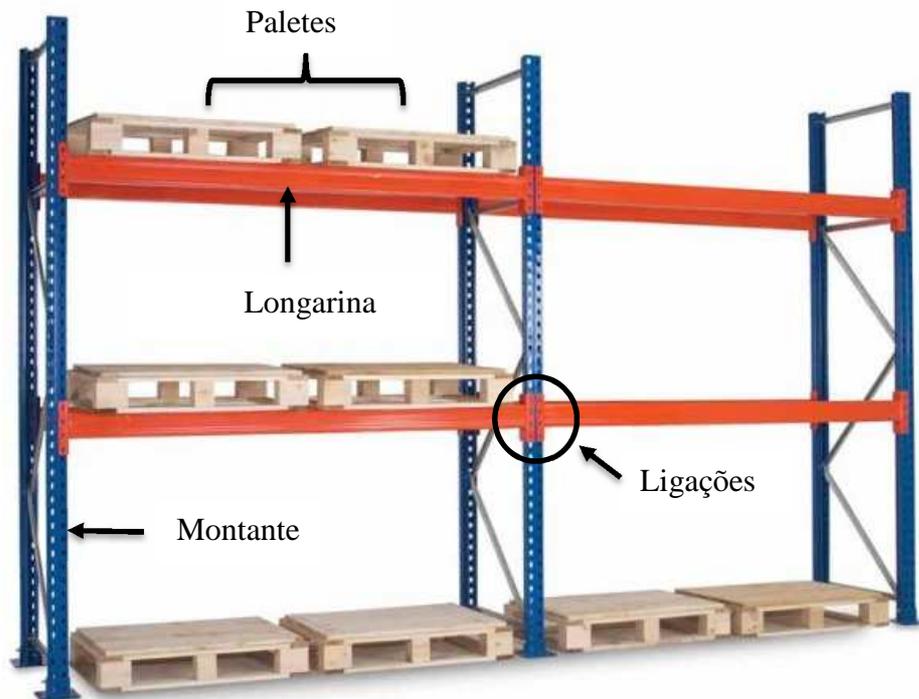
**Figura 1.2. Representação dos sistemas de armazenagem dinâmico. (FONTE: BERTOLINI, 2017)**

Em projetos em que a demanda não é atendida pelos sistemas de armazenagem estático e dinâmico, outra solução que poderá ser adotada é a utilização dos sistemas especiais. Esses sistemas são a base de sistemas chamados de Porta palete deslizante, Carro satélite, Transelevador e Autoportante. Esses sistemas estão representados na Figura 1.3.



**Figura 1.3. Representação dos sistemas de armazenagem especiais. (FONTE: BERTOLINI, 2017)**

A estrutura com ampla utilização no setor industrial é o porta palete que possibilita a adequação a várias tipologias de armazenamento. Os elementos básicos estruturais são os montantes, as longarinas e as ligações. A Figura 1.4 representa o sistema de armazenamento tipo porta palete, bem como a indicação dos elementos estruturais citados.



**Figura 1.4. Sistema de armazenamento industrial tipo Porta paletes. (FONTE: MILLENNIUMRACKS, 2017)**

O perfil formado a frio é o mais utilizado em sistemas de armazenamento, sendo obtido pelo dobramento de chapas, geralmente de pequena espessura, à temperatura ambiente. A utilização de perfis formados a frio é motivada por um conjunto de vantagens, sendo:

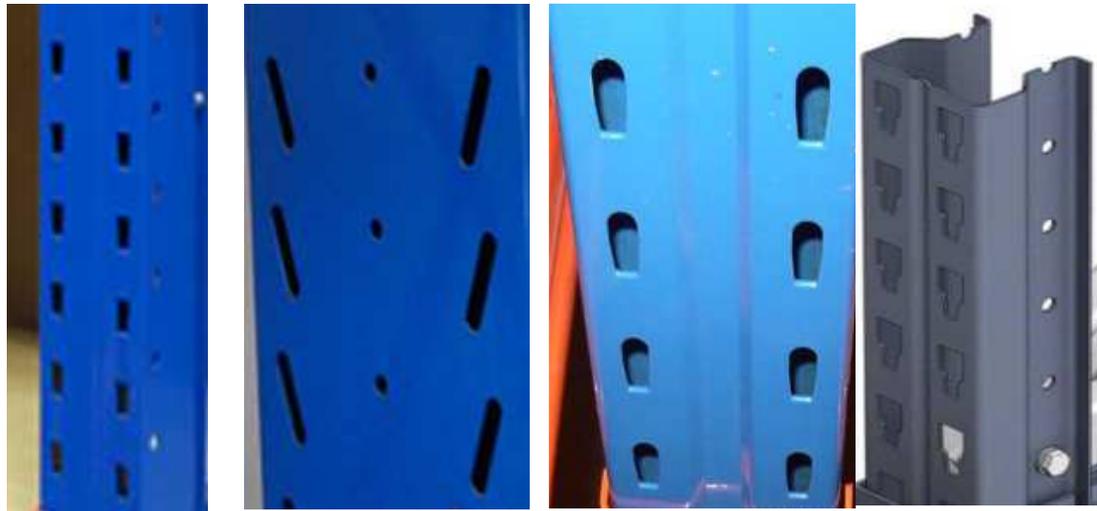
- Elevada eficiência estrutural e elevada relação resistência estrutural/peso;
- Possibilidade de criação rápida de perfis das mais variadas formas, possibilitando qualquer geometria de seção transversal;
- Rapidez de execução da obra e economia de transporte. Por se tratar de perfil leve, torna-se de fácil montagem e de necessidade de poucos equipamentos de elevação.

Os processos de fabricação podem ser por perfilagem (processo contínuo) ou por dobragem (processo não contínuo). No processo contínuo a tira de aço passa por uma série de roletes, formando a seção transversal final do perfil. No processo de dobragem, a tira de aço é prensada por punção por uma matriz, sendo cada dobra obtida isoladamente e a seção transversal dada pela composição dessas dobras.

Como estes perfis são constituídos de chapas finas, possuem baixo peso, concretizando projetos de estruturas econômicas.

As perfurações nos montantes dos sistemas de armazenagem são necessárias para o encaixe/ligação da longarina. No entanto, os furos alteram o comportamento estático da estrutura. Diversos tipos de furos são encontrados nas seções comerciais. Os furos retangulares

e circulares são mais comuns, entretanto surgem a cada momento tipologias de perfurações diferentes, propostas pelos fabricantes de estruturas de sistemas de armazenagem. A Figura 1.5 representa algumas das tipologias de perfurações encontrada nos perfis comerciais.



(a)

Furo retangular.

(b)

Furo retangular  
inclinado com chanfro  
circular nos extremos.

(c)

Furo retangular com  
chanfro circular no  
extremo superior.

(d)

Furo tipo  
“T”.

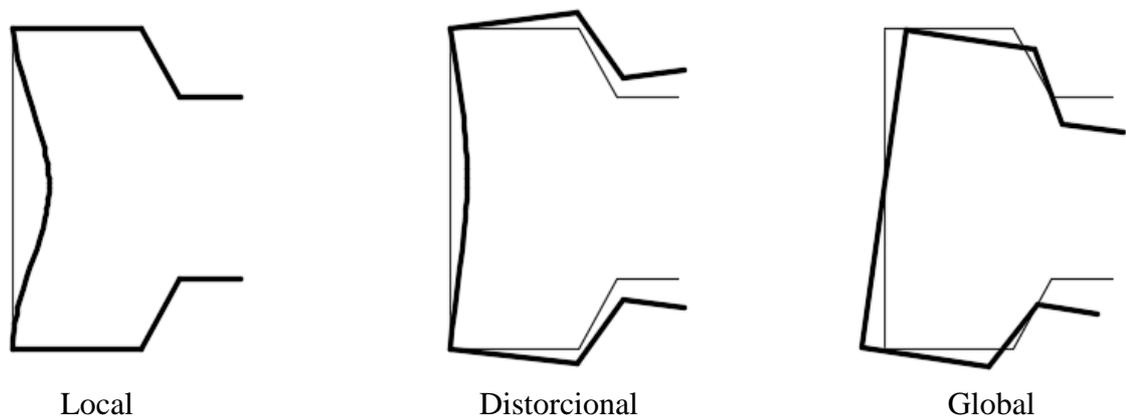
**Figura 1.5. Representação das tipologias de perfurações usuais em perfis Racks.**

(FONTES: (a) BERTONI, 2017; (b) ÁGUIA, 2017); (c) VICTORYRACK, 2017; (d) MECALUX, 2017.)

Os perfis formados a frio usados na construção metálica, por sua elevada esbeltez de seção, apresentam fenômenos de instabilidade por vezes de difícil solução.

Fenômenos de instabilidade manifestam-se repentina e violentamente, mesmo quando para uma pequena variação do acréscimo de carregamento. Assim sendo, pode-se dizer que as ruínas produzidas por instabilidade são sem aviso e quase sempre produzem grandes danos à estrutura. Nesse contexto, o projeto de uma estrutura ou de um elemento estrutural não pode basear-se unicamente em conceitos de segurança relacionados à sua resistência e à sua deformabilidade. É indispensável também a consideração da estabilidade de seu equilíbrio (BRAGA E CAPELLO, 2014).

Em colunas de perfis formados a frio, submetidas a carregamento de compressão centrada, geralmente ocorre fenômenos de instabilidade, que pode ser local, distorcional ou global. A Figura 1.6 representa esses três modos de instabilidade.



**Figura 1.6. Modos de instabilidade, perfil rack compressão centrada**

O fenômeno de instabilidade é um assunto complexo para a engenharia, e a inserção de perfurações em racks aumenta a complexidade das análises. Isso exige que os estudos de instabilidade para seções com furos sejam particularizados para cada tipologia de projeto.

### 1.1 Atualização da bibliografia

A consideração das perfurações nas análises da capacidade resistente de um elemento estrutural em perfil formado a frio não é contemplada na norma de dimensionamento de perfis formados a frio (ABNT NBR 14762, 2010). Assim, diversos estudos são realizados com o objetivo de determinar a influência dos furos na resistência e no comportamento dos perfis formados a frio. Vários trabalhos contribuíram para o aperfeiçoamento de técnicas e análises de projetos utilizando colunas perfuradas e os principais são citados a seguir.

Batista (2009) elaborou o Método da Seção Efetiva, que foi incorporado à (ABNT NBR 14762, 2010), como uma das três opções de dimensionamento de perfis formados a frio. Nesse método analisa a flambagem local da seção transversal no dimensionamento de elementos comprimidos. O método considera o modo de instabilidade local e a interação entre o local e o global.

Silvestre et al. (2010) desenvolveram um trabalho com o objetivo de ampliar o uso do método da resistência direta, aplicáveis a interação entre os modos local, global e distorcional de flambagem elástica. As equações propostas foram validadas experimentalmente e o acoplamento entre os modos leva a uma redução da capacidade resistente da seção.

Souza (2013) e Faria (2013) contribuíram para o entendimento da influência das perfurações nos modos local, distorcional e global das colunas utilizadas em estruturas de sistemas de armazenagem. Observaram pela análise experimental e numérica que furos de pequenas dimensões induzem ao modo local (Figura 1.4 (a)) e furos maiores induzem outro

modo, com concentração dos deslocamentos na região entre os furos (Figura 1.7 (b)). Este modo foi chamado “Modo Localizado de Placa”.



**Figura 1.7. Modos de flambagem observados na placa: (a) Modo Local; (b) Modo Localizado de Placa.**

Braga e Campello (2014) compararam três metodologias para análise linear da estabilidade de perfis formados a frio. Os métodos utilizados foram o método das faixas finitas, a teoria generalizada de vigas e o Método dos Elementos Finitos, utilizando elementos de casca. Para fazer as comparações entre as metodologias, foram consideradas colunas de seção U enrijecido biarticulado, submetidos ao carregamento de compressão e sem restrição ao empenamento nas extremidades. A partir das análises realizadas verificaram que a análise com o Método dos Elementos Finitos, utilizando elementos de casca, apesar de ser mais confiável, requer a imposição criteriosa das condições de contorno e dos carregamentos nas seções extremas.

Smith e Moen (2014) estudaram métodos para determinação da capacidade resistente de seções do tipo rack, baseado no Método da Resistência Direta. A carga de flambagem elástica global, incluindo as perfurações são calculadas reduzindo a carga de flambagem da seção transversal sem perfurações e usando a média ponderada do momento de inércia líquido e bruto da seção ao longo da altura do protótipo analisado. Esse método utilizou a solução de energia de Rayleigh-Ritz que simula a influência da redução da rigidez de flexão da placa longitudinal e transversal causada por perfuração.

Ling et al. (2015) analisaram numericamente, via elementos finitos, a flambagem lateral com torção do perfil U enrijecido, com perfurações do tipo, circular, octogonal, hexagonal e oblongo. O objetivo do estudo foi verificar a geometria de furo que induz a menor redução do momento fletor máximo resistente da viga. Os fatores que influenciaram na redução da

capacidade de carga foram, a distância da extremidade do perfil até o furo adjacente, o número de perfurações e também o espaçamento entre elas. O furo de forma hexagonal mostrou maior eficiência em termos de resistência, comparando as áreas equivalentes entre os outros tipos de furos.

Faria (2016) iniciou seus trabalhos a partir dos estudos de Souza (2013), o autor identificou que o aumento da altura dos furos na alma do perfil rack, induzia para o modo localizado de placa. A relação encontrada no trabalho, válido para a tipologia de furo analisada, levou a conclusão que a partir de 50% da altura do furo em relação a largura da alma do perfil, o modo de flambagem dominante ocorrerá entre os furos.

Cai e Moem (2016) desenvolveram um método para realizar análises de flambagem no perfil U enrijecido de paredes finas e com perfurações retangulares, utilizando a teoria generalizada de vigas (GBT). A distribuição longitudinal normal de tensões na proximidade dos furos não é linear e a rigidez geométrica também é alterada, então foi necessário introduzir essas condições na (GBT). Os membros perfurados são tratados como várias subdivisões com equações de compatibilidade para o deslocamento.

Phan (2017) estudou a influência dos furos circulares e retangulares no perfil U enrijecido. A presença dessas perfurações, influencia na distribuição das tensões e conseqüentemente, mudanças na carga crítica de flambagem e capacidade resistente da seção.

Szymczak e Kujawa (2017) estudaram o comportamento da coluna I compacta de parede fina considerando as imperfeições geométricas iniciais. As formulas analíticas foram adaptadas para colunas com flanges enrijecidos e comparadas com resultados obtidos via Método dos Elementos Finitos. Como resultado determinou-se fórmulas analíticas para as cargas críticas de torção e flexão.

Sales (2017) estudou a força axial de compressão resistente de uma coluna constituída por perfis formados a frio, tipo rack submetidos à compressão centrada, sujeitos à flambagem distorcional e com perfurações retangulares. O autor propôs a adaptação de procedimentos normativos em que foi avaliado o efeito dos furos associados ao modo distorcional de flambagem. O trabalho teve como resultado a contribuição na adaptação do método da resistência direta, previsto no anexo C da (ABNT NBR 14762, 2010), analisando colunas perfuradas e sujeitas ao modo distorcional.

Neiva (2017) estudou a influência das perfurações nas colunas tipo rack submetidos aos modos de flambagem local e distorcional quando submetidos a carregamento centrado e excêntrico. Nesse estudo, foram analisadas 25 seções transversais variando-se a largura da

alma, as espessuras da chapa e adotando perfurações verticais e inclinadas, resultando em um total de 160 modelos. Como resultado foram propostas adequações para as curvas do Método da Resistência Direta, de modo que as mesmas pudessem ser utilizadas no dimensionamento das seções e tipologias de perfurações analisadas.

## 1.2 Justificativa

A flambagem local em perfis de paredes esbeltas é considerada na avaliação da força axial de compressão em seções compostas por perfis formados a frio por meio do Método da Largura Efetiva, do Método da Seção Efetiva, ou pelo Método da Resistência Direta (NBR14726:2010). No caso de seções com perfurações, os efeitos da flambagem local são considerados a partir de resultados empíricos de colunas curtas, e uma sistemática de avaliação via prescrição de norma seria adequada para avaliar a força axial de flambagem elástica, no entanto essa prescrição não é encontrada. Associado a necessidade de formulação normativa observa-se que existem poucos estudos que consideram a influência da tipologia do furo na capacidade resistente das colunas.

## 1.3 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento de perfis tipo rack com perfurações, sujeitos ao modo de flambagem local. Para isso, será utilizado o Método da Seção Efetiva para prever a carga crítica de flambagem elástica para essa tipologia de seção. O objetivo específico é ajustar o Método da Seção Efetiva para o dimensionamento de perfis tipo rack, considerando o efeito das perfurações e o modo Local.

## 1.4 Metodologia

Para o dimensionamento dos perfis formados a frio, o Brasil dispõe das especificações da (ABNT NBR 14762, 2010). Para dimensionar estruturas em que o modo local é dominante um dos métodos indicados é o Método da Seção Efetiva. Para considerar os efeitos das perfurações foram propostas modificações neste método.

As seções analisadas foram previamente selecionadas, de modo que, a geometria e comprimento dos protótipos sejam capazes de representar uma série variada de tipologia utilizadas comercialmente e que apresentam o modo local dominante.

Foram analisados perfis rack's com perfurações retangulares, em que a dimensão do furo considerado na alma é proporcional a largura da mesma. A distribuição dos furos foi padronizada em uma tipologia bastante usual pelos fabricantes de sistemas de armazenagem

industrial. As espessuras analisadas também estão de acordo com as principais chapas utilizadas na confecção de perfis formados a frio, utilizou espessuras de (1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0) mm.

As colunas analisadas estão na classe esbelta e medianamente esbelta. Utilizando essa tática elimina-se as ponderações relacionadas aos efeitos das imperfeições geométrica e tensões residuais do material.

A determinação do coeficiente de flambagem local, para seções perfuradas, foi obtida por regressão não linear, variando a altura dos furos.

Por último, a influência da área efetiva foi determinada considerando os modos de instabilidade e a tipologia das perfurações.

## **1.5 Descrição do trabalho**

No capítulo 2 é realizada uma análise teórica, descrevendo o modo local, teoria de placa e os métodos de dimensionamento prescritos na (ABNT NBR, 14762).

No capítulo 3 é apresentado a análise numérica adotada no trabalho, detalhando a modelagem realizada utilizando o Método dos Elementos Finitos e o software (ANSYS, 2011). Também é detalhado o modelo analisado, seções, comprimento e tipologia de perfurações com as variações dos tamanhos dos furos.

No capítulo 4 é feita a apresentação e análise dos resultados, considerando a inclinação do enrijecedor, comparação dos resultados normativos e numéricos para perfis sem perfurações, verificação da flambagem distorcional nas seções e determinado o coeficiente de flambagem local para seções com perfurações.

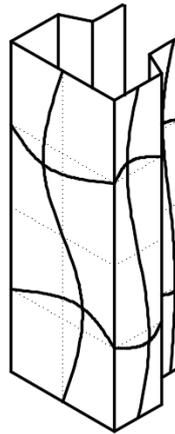
No capítulo 5 é verificado a aplicação do Método da Seção Efetiva em perfis rack com perfurações.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas com esse estudo.

## 2 ANÁLISE TEÓRICA

### 2.1 Modo Local

O modo de flambagem local se caracteriza pelas ondulações de um ou mais elementos do perfil sem que haja deslocamento das arestas da seção transversal. Este modo apresenta resistência pós flambagem com redistribuição de tensões. A Figura 2.1 apresenta o modo local no perfil rack.



**Figura 2.1. Modo de instabilidade local de um perfil rack.**

### 2.2 Teoria de placas

No estudo de elementos estruturais com paredes finas é necessário o conhecimento do comportamento das placas esbeltas, sendo estas entendidas como elementos estruturais cuja relação largura-espessura é importante, influenciando na sua estabilidade elástica quando solicitadas por carregamento de compressão aplicado no seu plano (Sarmanho,1991).

A tensão crítica teórica em uma placa retangular ou quadrada pode ser obtida utilizando as propriedades geométricas (largura e espessura) e as propriedades do material (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson).

A equação (1) representa a expressão para determinação da tensão crítica de uma placa.

$$f_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (1)$$

Sendo:

**k** – coeficiente de flambagem da placa;

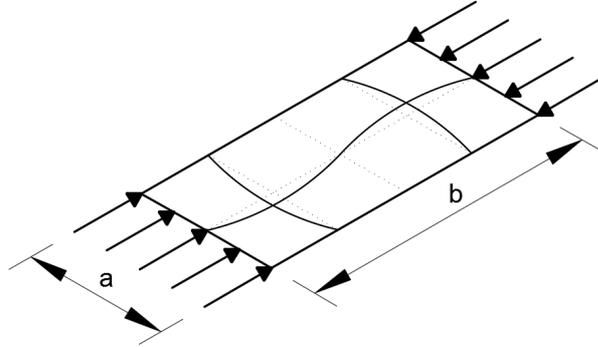
**E** – módulo de elasticidade do material;

**$\nu$**  – coeficiente de Poisson do material;

**b** – largura da chapa;

**t** – espessura da chapa.

A Figura 2.2 representa uma placa sob compressão uniforme



**Figura 2.2. Modo de instabilidade de uma placa sob compressão uniforme**

(Sarmanho, 1991.)

A classificação das placas depende da esbeltez relativa  $\lambda_p$ . Sua expressão foi desenvolvida empiricamente por (Winter, 1947 apud Sarmanho, 1991) e está descrita pela equação (2).

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}} \quad (2)$$

Sendo:

$\lambda_p$  – esbeltez relativa do elemento de placa;

**b** – largura do elemento de placa;

**t** – espessura do elemento de placa;

**k** – coeficiente de flambagem associado às condições de contorno;

**E** – módulo de elasticidade longitudinal;

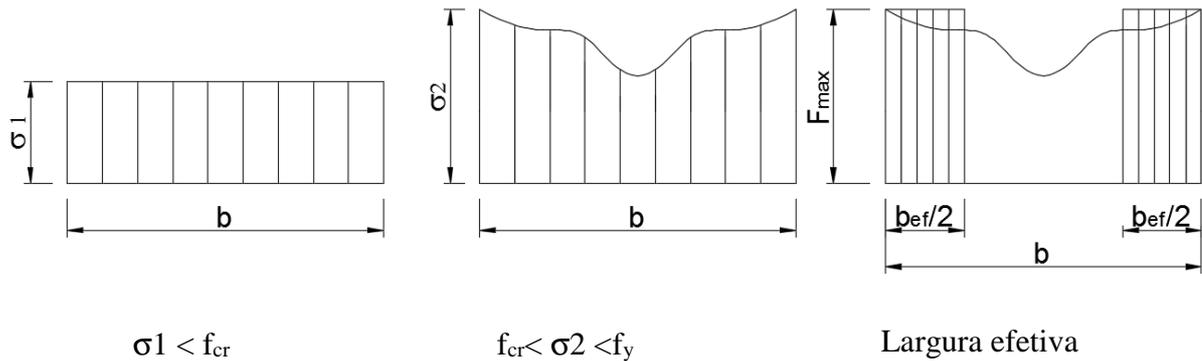
$\sigma$  – tensão máxima admitida no elemento de placa.

De acordo com a teoria clássica, os elementos de placa podem ser classificados conforme os limites relacionados abaixo:

- I.  $\lambda_p < 0,673$ , o elemento de placa é compacto, não há consideração do fenômeno de flambagem local e o colapso ocorre no regime plástico.
- II.  $\lambda_p > 0,673$ , o elemento de placa é medianamente esbelto, há consideração do fenômeno de flambagem local e o colapso ocorre no regime elasto-plástico.

- III.  $\lambda_p \gg 0,673$ , o elemento de placa é esbelto, há considerações do fenômeno de flambagem local e o colapso ocorre no regime elástico. De acordo com (Sarmanho,1991) para o valor de  $\lambda_p > 1,2$ , o elemento é considerado esbelto.

As placas resistem a acréscimos de carga mesmo depois de atingir a tensão crítica, essa resistência adicional é conhecida como resistência pós flambagem. A Figura 2.3 representa a distribuição de tensão em uma placa e a largura efetiva.



**Figura 2.3. Distribuição de tensão em uma placa e a largura efetiva.**

A consideração da flambagem local é feita retirando uma parte do elemento comprimido. Sendo assim, adota-se um valor para a largura efetiva, que é calculada de acordo com as equações (3) e (4).

$$b_{ef} = b \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673 \quad (3)$$

$$b_{ef} = \frac{b \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right)}{\lambda_p} \quad \text{para } \lambda_p > 0,673 \quad (4)$$

Sendo:

**b** – largura do elemento de placa;

**b<sub>ef</sub>** – largura efetiva do elemento de placa;

**λ<sub>p</sub>** – esbeltez relativa do elemento de placa.

## 2.3 Métodos de dimensionamento

Os procedimentos de cálculo previstos na (ABNT NBR 14762, 2010) para a verificação de perfis formados a frio, são baseados nos métodos de largura efetiva e seção efetiva.

### 2.3.1 Método da Largura Efetiva

O Método da Largura Efetiva é um método aproximado que analisa cada elemento de placa que forma o perfil de maneira isolada, porém levando em conta as condições de vizinhanças com as outras placas componentes do perfil. Este método foi originalmente proposto por von Karman et al.(1932) e posteriormente modificado e ajustado através de dados experimentais por Winter (1968).

### 2.3.2 Método da Resistência Direta

A complexidade e principalmente as limitações dos procedimentos de cálculo prescritos pelas normas atuais para o dimensionamento de barras submetidas aos modos de flambagem local e distorcional é admitida no trabalho de Schafer e Pekoz (1998). Devido ao desenvolvimento de novas tecnologias, a tendência atual é que as peças estruturais de aço formadas a frio tenham geometria de suas seções transversais cada vez mais complexas, dificultando com isso a modelagem matemática requerida (Carvalho *et al.* 2014).

Para contornar problemas com relação à diversidade das seções transversais que as novas tecnologias produzem, Schafer e Pekoz (1998) propuseram o Método da Resistência Direta como uma alternativa ao Método da Largura Efetiva, na determinação da resistência de perfis formados a frio submetido à compressão ou flexão.

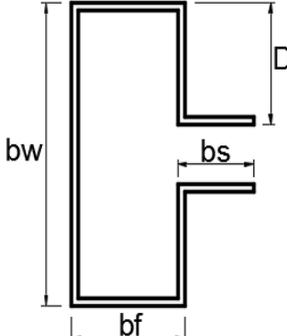
### 2.3.3 Método da Seção Efetiva

O Método da Seção Efetiva é um método para o cálculo das propriedades efetivas do perfil, que considera a seção transversal como associação de placas e não os elementos isolados como no Método da Largura Efetiva.

Batista (2009) desenvolveu o Método da Seção Efetiva sendo selecionadas algumas seções transversais dos perfis mais empregados nas estruturas e foram propostas equações práticas e objetivas para determinação da capacidade resistente de projeto dos PFFs e inseridos na (ABNT NBR14762, 2010).

A ABNT NBR 14762 (2010), no Método da Seção Efetiva, apresenta uma equação e uma tabela para determinação do coeficiente de flambagem local  $k_1$ , conforme representa a Tabela 2.1. Essas formulações são aplicadas para o perfil rack, com enrijecedores perpendiculares à alma, sem perfurações.

**Tabela 2.1. Tabela para determinação do coeficiente de flambagem local, para o perfil Rack.**

Equação do coeficiente de flambagem local $k_l$ para a seção completa em barras sob compressão centrada	
	$k_l = 6,5 - 3\eta + 2,8\eta^2 - 1,6\eta^3$ $(0,1 \leq \eta \leq 1,0; 0,1 \leq \frac{D}{b_w} \leq 0,3 \text{ e } 0,1 \leq \frac{b_s}{b_w} \leq 0,4)$ $\eta = \frac{b_f}{b_w}$
Tabela do coeficiente de flambagem local $k_l$ para barras sob compressão centrada	
$\eta = \frac{b_f}{b_w}$	$k_l$
0,3	5,76
0,4	5,61
0,5	5,47
0,6	5,35
0,7	5,23
0,8	5,10
0,9	4,85
1,0	4,56

Batista (2009) concluiu que a determinação do coeficiente de flambagem local  $k_l$  para a seção completa em barras sob compressão centrada é função das dimensões nominais dos elementos que constituem o perfil rack. É importante ressaltar que, a variação da espessura não influencia no valor de  $k_l$ .

De acordo com a ABNT NBR:14762 (2010), os valores tabelados são mais precisos do que os obtidos pela expressão de  $k_l$ . No Método da Seção Efetiva, a área efetiva é obtida conforme as equações (5), (6) e (7):

$$A_{ef} = A \quad \text{Para } \lambda_p \leq 0,776 \quad (5)$$

$$A_{ef} = A \left( 1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}} \right) \frac{1}{\lambda_p^{0,8}} \leq A \quad \text{Para } \lambda_p > 0,776 \quad (6)$$

$$\lambda_p = \left( \frac{\chi A f_y}{N_l} \right)^{0,5} \quad (7)$$

Sendo:

$A$  – área bruta da seção transversal;

$f_y$  – tensão de escoamento do aço;

$\lambda_p$  – índice de esbeltez reduzido de um elemento / placa.

$N_l$  – força axial de flambagem local elástica, calculada por meio de análise de estabilidade elástica, de forma direta, segundo a equação (8), ou, sendo que para seções com perfurações, o valor de  $k_l$  será obtido consultando as equações propostas no capítulo 4:

$\chi$  – fator de redução da força axial de compressão resistente, associada à flambagem global.

$$N_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)(b_w/t)^2} A \quad (8)$$

O Método da Seção Efetiva considera o efeito do acoplamento entre os modos local e global, imposto via parâmetro  $\chi$ . A seguir é descrito o cálculo de  $\chi$ .

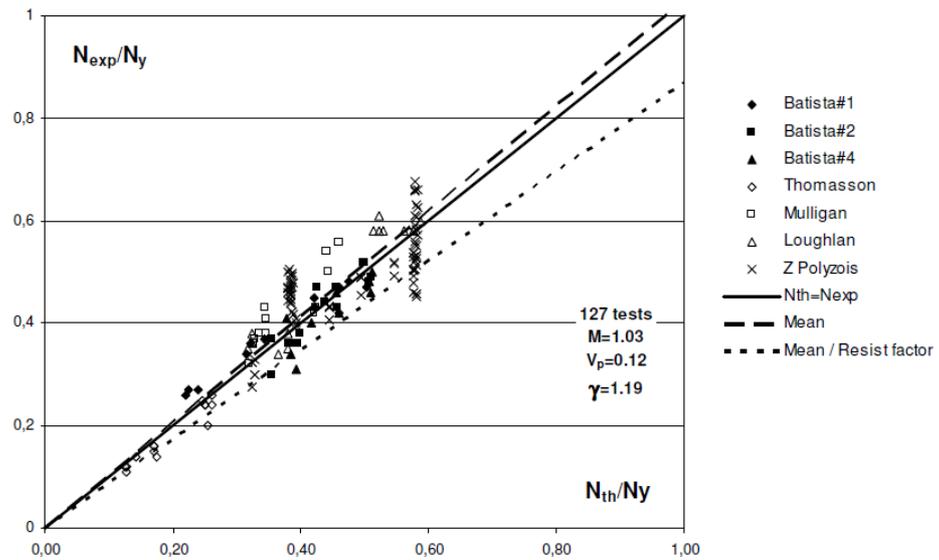
$$\text{Se } \lambda_0 \leq 1,5 \quad : \quad \chi = 0,658 \lambda_0^2 \quad (9)$$

$$\text{Se } \lambda_0 > 1,5 \quad : \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (10)$$

O índice de esbeltez reduzido ( $\lambda_0$ ), equação (11):

$$\lambda_0 = \left( \frac{A f_y}{N_e} \right)^{0,5} \quad (11)$$

Para a definição dos parâmetros a serem adotados na (ABNT NBR 14762, 2010), Batista (2009) realizou a calibração do método, por critérios de confiabilidade frente aos resultados experimentais e teóricos calibrados, utilizando uma série de 127 ensaios experimentais de colunas de perfis formados a frio, de seção U enrijecido, Z e Z enrijecido. A Figura 2.4 representa a comparação entre os valores teóricos e experimentais.



**Figura 2.4. Comparação entre os valores teóricos e experimentais, realizados por Batista (2009)**

De acordo com a representação da Figura 2.4, a comparação entre os valores teóricos e experimentais tem um valor médio de 1,03, variação de 12% e um fator de ponderação da resistência de 1,2.

Observa-se que o Método da Seção Efetiva foi calibrado em termos de imperfeições geométricas, tensões residuais e confiabilidade, baseado em perfis comerciais.

### 3 ANÁLISE NUMÉRICA

O Método dos Elementos Finitos é uma técnica matemática utilizada para determinar soluções aproximadas, a partir da divisão de uma geometria complexa em um número finito de elementos. A capacidade de discretizar os domínios irregulares com elementos finitos faz com que método seja uma ferramenta de análise valiosa e prática para a solução de problemas complexos da engenharia (Madenci e Guven, 2006).

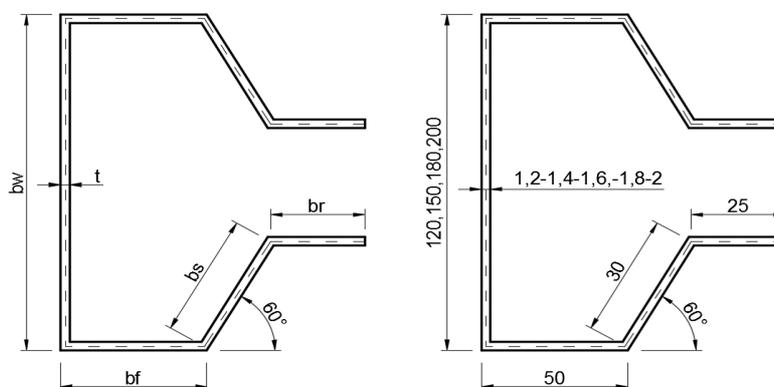
Existem vários programas comerciais de análise estrutural baseados no Método dos Elementos Finitos. Neste trabalho foi utilizado o programa ANSYS (2011) que possibilita realizar análises paramétricas a partir de sua linguagem de programação APDL (ANSYS Parametric Design Language).

#### 3.1 Descrição dos modelos analisados

A seguir tem-se a descrição dos modelos utilizados nas análises, tais como suas seções transversais, comprimento, tipologia e variações do tamanho das perfurações.

##### 3.1.1 Seção analisada

A Figura 3.1 representa as dimensões da seção transversal tipo rack analisada.



**Figura 3.1. Representação da seção transversal tipo rack**

Sendo:

$b_w$  – largura da alma (mm);

$b_f$  – largura do flange (mm);

$b_s$  – largura do enrijecedor (mm);

$b_r$  – largura do flange de ligação (mm);

$t$  – espessura das paredes da seção (mm).

Foram analisados protótipos com largura de alma de 120, 150, 180 e 200 mm. As espessuras de chapa adotada foram de 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 e 2,0 mm. A variação destas dimensões possibilita a obtenção de diferentes índices de esbeltez. As larguras do flange, do enrijecedor e

do flange de ligação foram fixadas em 50, 30 e 25mm, respectivamente, esses valores foram escolhidos por representar tipologia de seções comerciais.

### 3.1.2 Comprimento da coluna

A flambagem local ocorre em um ou mais elementos que compõem a seção transversal do perfil, e pode ocorrer de forma isolada ou em interação com outros modos de flambagem. A flambagem local no geral ocorre de forma isolada em colunas curtas e com paredes esbeltas, como ocorre na alma dos perfis de seção transversal do tipo rack analisados. A Tabela 3.1 representa as propriedades da seção transversal para as seções utilizadas. O comprimento do protótipo e a espessura da chapa influenciam fortemente no modo dominante da coluna. Assim, as colunas selecionadas possuem comprimentos em que o modo local de flambagem seja dominante.

**Tabela 3.1. Propriedades geométricas das seções selecionadas.**

Propriedades geométricas								
Seção ( $b_w \times b_{fx}$ $b_s \times b_r$ )	t (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	$I_x$ (mm <sup>4</sup> )	$I_y$ (mm <sup>4</sup> )	$C_w$ (mm <sup>6</sup> )	J (mm <sup>4</sup> )	$X_{cg}$ (mm)	$r_x$ (mm)
120x50x 30x25	1,2	396	837400	351900	1969000000	190,1	29,773	29,81
	1,4	462	977000	410600	2298000000	301,8	29,773	29,81
	1,6	528	1117000	469200	2626000000	450,6	29,773	29,81
	1,8	594	1256000	527900	2954000000	641,5	29,773	29,81
	2,0	660	1396000	586600	3283000000	880	29,773	29,81
150x50x 30x25	1,2	432	1438000	381200	2752000000	207,4	27,292	57,69
	1,4	504	1677000	444700	3211000000	329,3	27,292	57,68
	1,6	576	1917000	508200	3670000000	491,5	27,292	57,69
	1,8	648	2156000	571800	4129000000	699,8	27,292	57,68
	2,0	720	2396000	635300	4588000000	960	27,292	57,69
180x50x 30x25	1,2	468	2232000	405900	3730000000	224,6	25,192	69,06
	1,4	546	2604000	473600	4352000000	356,7	25,192	69,06
	1,6	624	2976000	541300	4974000000	532,5	25,192	69,06
	1,8	702	3348000	608900	5596000000	758	25,192	69,06
	2,0	780	3732000	676600	6218000000	1040	25,192	69,17
200x50x 30x25	1,2	492	2878000	420400	4497000000	236,2	23,963	76,48
	1,4	574	3358000	490500	5246000000	375	23,963	76,48
	1,6	656	3837000	560600	5996000000	559,8	23,963	76,48
	1,8	738	4317000	630700	6746000000	797	23,963	76,48
	2,0	820	4797000	700800	7495000000	1093	23,963	76,48

t – espessura da chapa.

A – área da seção transversal.

$I_x$  ;  $I_y$  - momentos de inércia da seção bruta em relação aos eixos principais x e y.

$C_w$  – constante de empenamento da seção transversal.

J – constante de torção.

$x_{cg}$  – coordenada x em relação ao centroide.

$r_x$  – raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal x.

Considerando as propriedades geométricas relacionadas na Tabela 3.1, foram determinados comprimentos máximos dos protótipos analisados, com o objetivo de selecionar colunas curtas. A Equação 12, de acordo com (Carvalho *et al.* 2014), indica o limite máximo para dominar apenas o modo local, para colunas sem perfurações, considerando o coeficiente de flambagem,  $k$ , igual a bi-rotulado ( $k=1$ ).

$$\frac{kL}{r} < 20 \quad (12)$$

Na Tabela 3.2 tem-se os comprimentos máximos dos protótipos, calculados a partir da Equação 12.

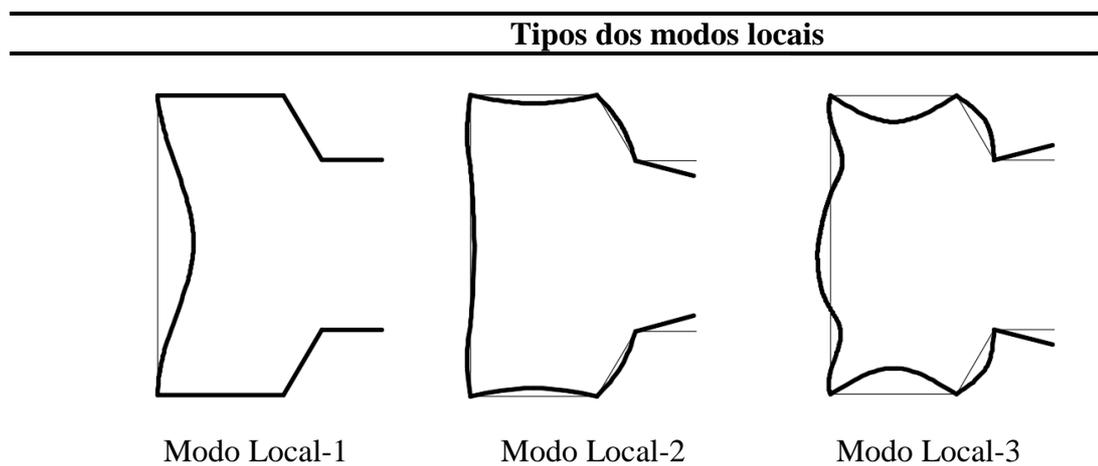
**Tabela 3.2. Comprimento máximo para coluna curta.**

$b_w$ (mm)	$L_{max}$ (mm)
120	596,2
150	1153,8
180	1381,2
200	1529,6

$b_w$  – largura da alma.  
 $L_{max}$  – comprimento máximo da coluna.

Além da classificação da coluna como curta, para a análise apenas do modo de flambagem local via Método da Seção Efetiva, é necessário garantir a não participação do modo distorcional. Na Tabela 3.4 tem-se os três primeiros modos locais para seção rack.

**Tabela 3.3. Representação dos 3 primeiros modos locais.**



Na Tabela 3.4 tem-se as seções, comprimentos e espessuras das colunas em que o modo distorcional não é presente. Nessa tabela é apresentado para cada modo indicado na Tabela 3.3 a participação percentual dos três modos locais de flambagem. O resultado dessa análise foi obtido via GBTul (Bebiano *et al.* 2008).

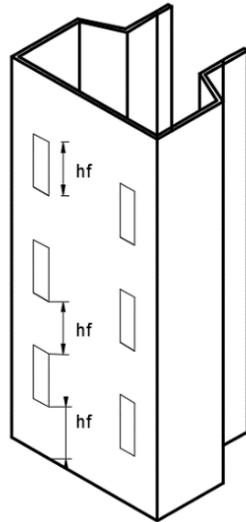
**Tabela 3.4. Participação modal em função da altura do protótipo**

<b>Seção</b>	<b>t</b>	<b>L</b>	<b>Modo</b>	<b>Modo</b>	<b>Modo</b>	<b>Outros</b>
<b>b<sub>w</sub>-b<sub>r</sub>-b<sub>s</sub>-b<sub>r</sub></b>	(mm)	(mm)	<b>Local-1</b>	<b>Local-2</b>	<b>Local-3</b>	(%)
(mm)			(%)	(%)	(%)	
120-50-30-25	1,2	280	95,79	2,26	0,88	1,07
	1,4	240	94,65	2,93	1,27	1,16
	1,6	240	94,57	2,91	1,27	1,25
	1,8	220	95,37	1,87	0,95	1,81
	2,0	220	95,06	1,82	1,18	1,94
150-50-30-25	1,2	450	96,96	0,82	0,55	1,67
	1,4	420	96,73	0,73	0,68	1,86
	1,6	420	96,39	0,96	0,65	2,01
	1,8	300	95,98	1,04	1,00	1,98
	2,0	280	95,54	1,18	1,18	2,10
180-50-30-25	1,2	550	96,34	1,21	0,81	1,65
	1,4	520	96,13	1,16	0,96	1,76
	1,6	480	95,95	1,15	1,04	1,87
	1,8	320	94,86	2,11	1,41	1,62
	2,0	300	94,76	2,10	1,40	1,74
200-50-30-25	1,2	580	96,67	0,99	0,91	1,43
	1,4	580	96,11	1,35	0,92	1,64
	1,6	560	95,99	1,25	1,05	1,71
	1,8	360	95,57	1,87	1,25	1,31
	2,0	340	95,44	1,87	1,24	1,45

De acordo com os valores apresentados na Tabela 3.4, as colunas com largura de alma 120 mm não apresentam comprimentos suficiente para a inserção e variação das perfurações, por isso não serão analisadas.

### 3.1.3 Tipologia das perfurações

Os perfis utilizados para a fabricação das colunas dos sistemas de armazenagem industrial possuem perfurações ao longo de sua altura, para facilitar a conexão das ligações, essas perfurações influenciam na resistência destes elementos (SOUZA, 2013). As análises realizadas utilizaram a tipologia de furos representada na Figura 3.2.



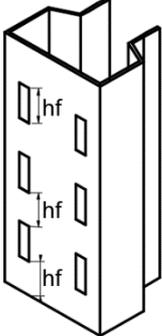
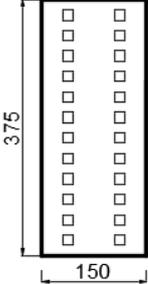
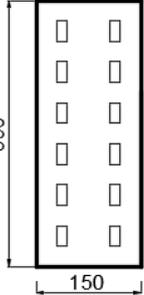
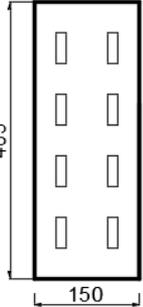
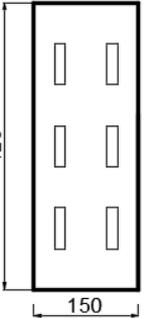
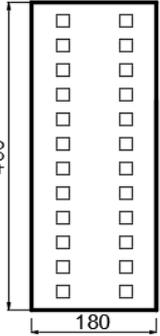
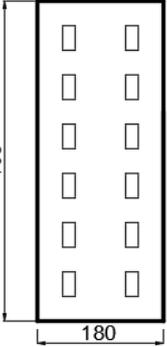
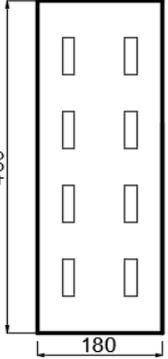
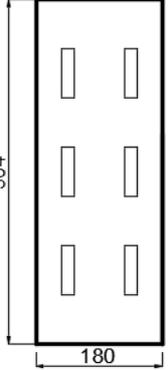
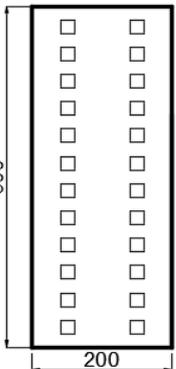
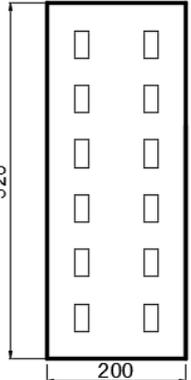
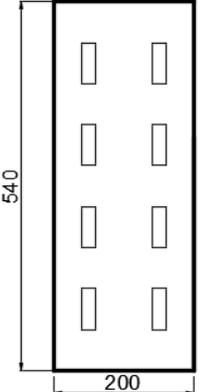
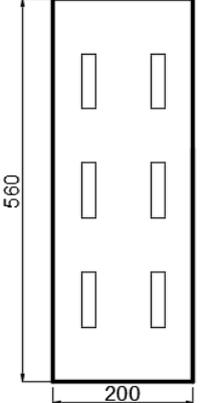
**Figura 3.2 .Tipologia das perfurações analisadas**

Foram consideradas perfurações na alma do perfil rack, com altura do furo de 10%, 20%, 30% e 40% da largura da alma ( $b_w$ ) e largura igual a 10% deste mesmo valor.

#### **3.1.4 Colunas analisadas.**

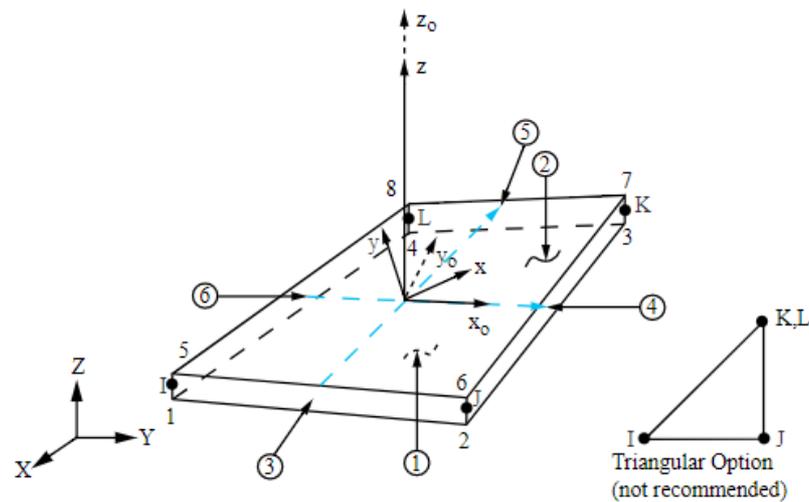
De acordo com os comprimentos máximos determinados na seção 3.1.2, com a tipologia das perfurações e a variação da altura dos furos, na Tabela 3.5, tem-se os comprimentos das colunas analisadas.

Tabela 3.5. Representação das almas das colunas analisadas

	$\frac{h_f}{b_w} = 10\%$	$\frac{h_f}{b_w} = 20\%$	$\frac{h_f}{b_w} = 30\%$	$\frac{h_f}{b_w} = 40\%$
				
				
				

### 3.2 Tipo de elemento

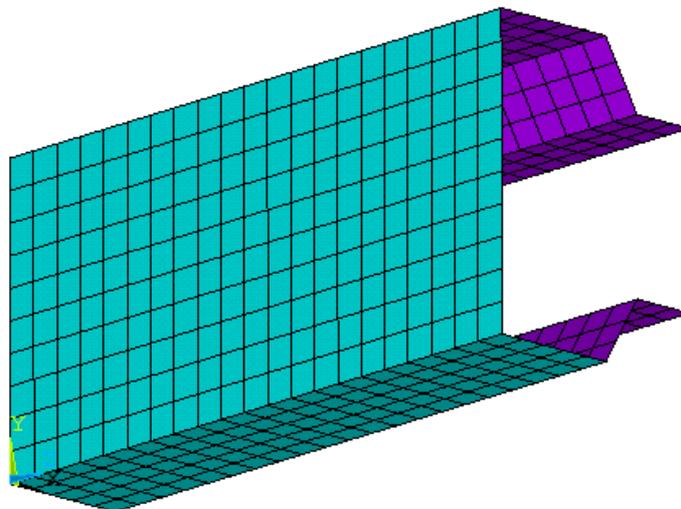
Souza (2013) comparou quatro tipos de elementos de casca (Shell 63, Shell 181 IR, Shell 181 IC e Shell281) os resultados obtidos pela análise através de elementos finitos foram comparados a resultados numéricos do GBTul. Os resultados mostraram que a utilização do elemento de casca SHELL181 IC com quatro nós é o mais adequado para as colunas analisadas. Esse elemento é representado pela Figura 3.3.



**Figura 3.3. Elemento utilizado na análise numérica: SHELL181**  
**FONTE: ANSYS (2011)**

### 3.3 Refinamento da malha

Com relação ao refinamento da malha, Souza (2013) e Faria (2016) indicam que elementos retangulares com lado igual a 10% em relação a largura da alma leva a uma malha adequada para a análise das colunas utilizadas nesse trabalho. Os autores compararam elementos com lado igual a 5% e 10% da alma e a partir das análises, concluiu-se que esse último é o mais indicado para a simulação por apresentar uma melhor correlação entre os resultados da análise de estabilidade via GBT. Na Figura 3.4 tem-se a representação da malha utilizada nas análises.



**Figura 3.4. Malha utilizada nas análises.**

### 3.3.1 Comparação entre os resultados obtidos utilizando o Método dos Elementos Finitos e valores teóricos

A Tabela 3.6 faz uma comparação entre os resultados de tensão crítica obtidos para placas, via Método dos Elementos Finitos, utilizando refinamento da malha  $b_w/10$  e os valores teóricos para tensão crítica, de acordo com a equação 1. Nesta tabela também está descrito as larguras das almas e espessuras da chapa utilizada.

**Tabela 3.6. Comparação entre os resultados numérico e teórico de tensão crítica para placa sem furo.**

$b_w$ (mm)	$t$ (mm)	M.E.F (MPa)	$f_{cr}$ (MPa)	% var
120	1,2	72,16	72,30	0,19
	1,4	98,17	98,40	0,23
	1,6	128,17	128,53	0,28
	1,8	162,13	162,67	0,33
	2,0	200,05	200,83	0,39
150	1,2	45,54	46,23	1,52
	1,4	61,98	62,92	1,52
	1,6	80,91	82,18	1,57
	1,8	102,37	104,01	1,60
	2,0	126,36	128,41	1,62
180	1,2	31,63	32,10	1,49
	1,4	43,05	43,70	1,51
	1,6	56,21	57,07	1,53
	1,8	71,12	72,23	1,56
	2,0	88,79	89,17	0,43
200	1,2	25,62	26,00	1,48
	1,4	34,87	35,39	1,49
	1,6	45,54	46,23	1,52
	1,8	57,63	58,51	1,53
	2,0	71,13	72,23	1,55

$b_w$  – largura da alma.

$t$  – espessura da chapa.

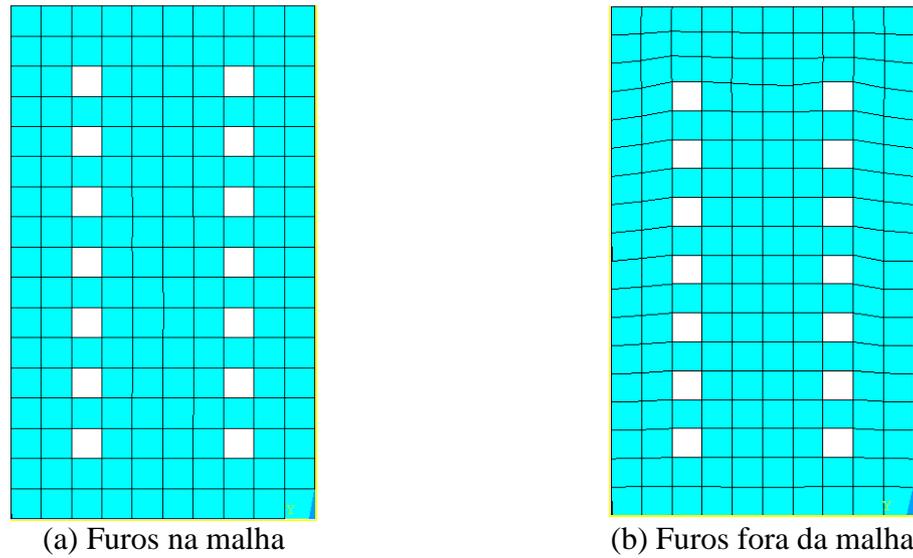
M.E.F – método dos Elementos Finitos-ANSYS.

$f_{cr}$  – tensão crítica de placa equação 1.

% var – variação percentual.  $\left(\frac{f_{cr}-M.E.F}{M.E.F}\right) \times 100$

De acordo com a tabela 3.6, onde a maior variação observada é de 1,62% na análise elástica, conclui-se que o nível de refinamento proposto é adequado as análises.

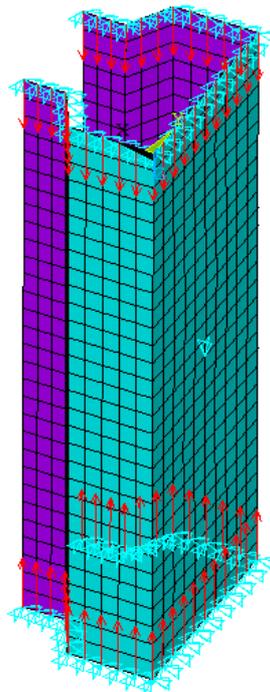
Para analisar colunas com perfurações, visando melhorar a convergência, buscou-se que os furos se adequem a malha da alma da coluna. Para isso foram adotados comprimentos da coluna que acomodassem adequadamente as perfurações. A Figura 3.5, ilustra a adequação do furo na malha (a) e o caso, não utilizado, onde o furo não acompanha a divisão da malha (b).



**Figura 3.5. Representação dos furos na alma da coluna.**

### 3.4 Condições de contorno

As condições de contorno adotadas representam uma coluna bi-rotulada. O deslocamento de corpo rígido foi impedido na direção axial da coluna, utilizando um nó à meia altura do modelo como apoio de segundo gênero. O carregamento aplicado é distribuído em todos os nós de extremidade, garantindo compressão uniforme nas colunas analisadas. Na Figura 3.6 tem-se as condições de contorno adotadas.



**Figura 3.6. Representação das condições de contorno.**

### 3.5 Análises via elementos finitos das colunas

A análise via elementos finitos da coluna foi dividida em duas etapas, análise linear e análise não linear.

#### 3.5.1 Análise linear

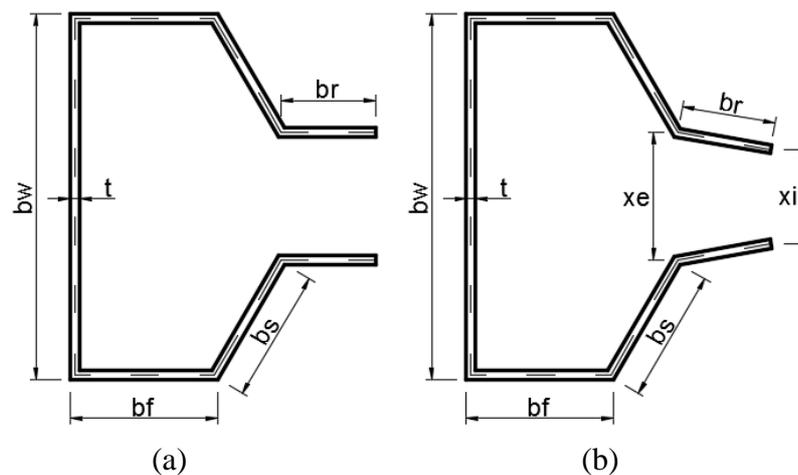
A análise linear foi realizada para obtenção das cargas críticas das colunas. A seguir tem-se a sequência utilizada.

1. Definição de parâmetros físicos e geométricos:
  - a) Dimensões da seção (alma, flange, flange de ligação e enrijecedor);
  - b) Comprimento do protótipo;
  - c) Definição do tipo de elemento;
  - d) Propriedades mecânicas do aço, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.
2. Criação da geometria:
  - a) Localização dos pontos chaves;
  - b) Criação das áreas;
  - c) Inserção das perfurações, quando houver.
3. Geração da malha de elementos finitos:
  - a) De acordo com o nível de refinamento descrito em 3.3.
4. Aplicação das restrições e cargas:
  - a) Condições de apoio nas extremidades;
  - b) Impedimento de deslocamento de corpo rígido;
  - c) Aplicação do carregamento unitário.
5. Solução do problema de auto valor:
  - a) Determinação do modo de flambagem e o valor da carga crítica associada a ele.
6. Armazenamento dos resultados:
  - a) Utiliza-se um vetor para armazenamento dos resultados.

#### 3.5.2 Análise não linear

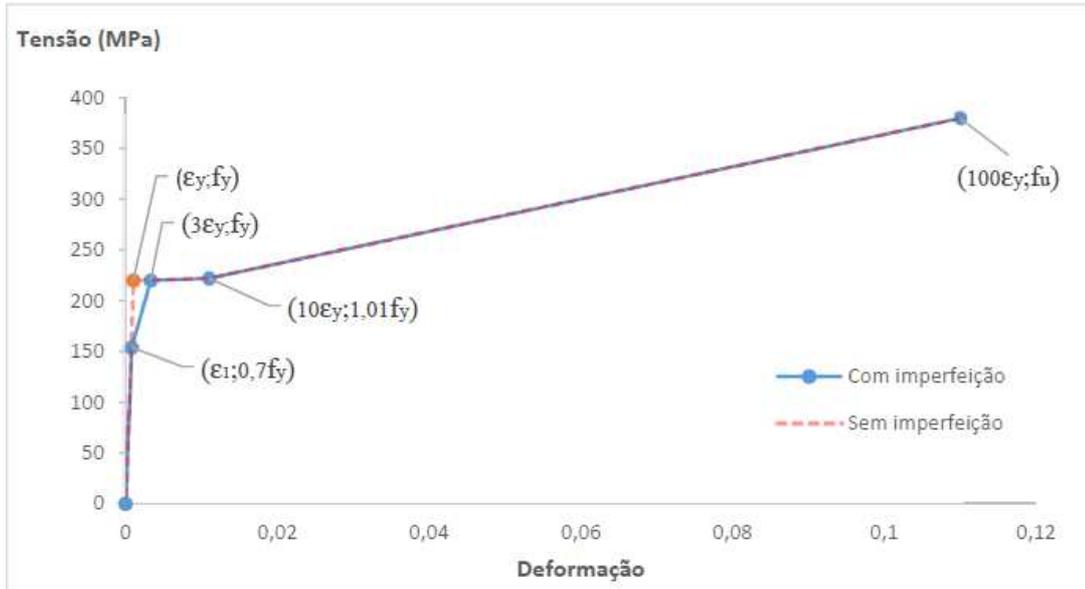
Também foi realizada a análise não linear dos perfis tipos rack submetidos à compressão centrada. São consideradas nessa análise as propriedades elasto-plásticas do aço e os efeitos de segunda ordem. A linguagem de programação APDL foi mantida para implementação da nova rotina.

1. Mesma sequência adotada no item 3.5.1, considerando nessa etapa a carga crítica de flambagem e o modo associado.
2. Ajuste da amplitude da imperfeição:
  - a) Fator de imperfeição adotada de 0,7, nos flanges de ligação, de acordo com valores observados por Faria (2016).
3. Atualização da geometria com as imperfeições:
  - a) Essa etapa atualiza a geometria, de acordo com o nível de imperfeição adotado. Na Figura 3.7 tem-se a comparação dos modelos original(a) com a geometria atualizada (b), Observa-se na seção transversal (b) a alteração da posição dos nós da extremidade dos flanges de ligação.



**Figura 3.7 Representação das imperfeições geométricas**

4. Introdução das propriedades elasto-plásticas do aço:
  - a) Tensão de escoamento  $f_y=354\text{MPa}$  e tensão de ruptura  $f_u=507\text{ MPa}$ , conforme caracterização de Silva(2011).
  - b) Aproximação por diagrama multilinear de acordo com Almeida (2012) e Faria (2016) , conforme representado pela Figura 3.8.

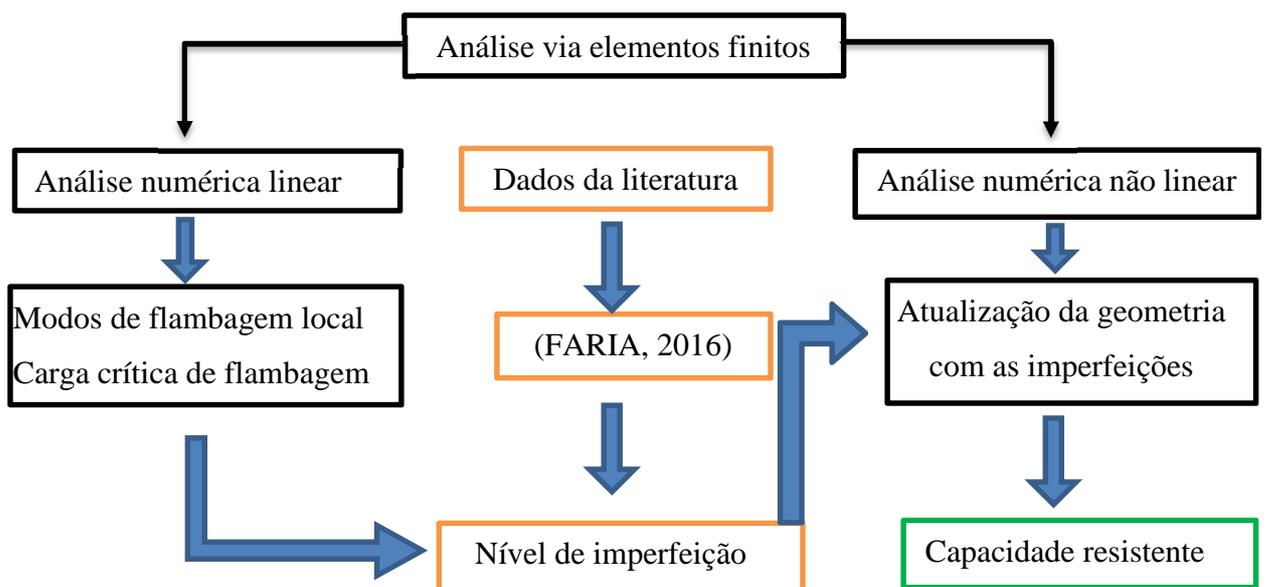


**Figura 3.8. Diagrama Multilinear (Faria, 2016).**

5. Solução do problema não linear:

- a) Carregamento aplicado no sentido axial, de valor superior àquele esperado no escoamento da seção;
- b) Para garantir a convergência, o carregamento foi aplicado em 50 subetapas e utilizado o Método do Comprimento de Arco. O critério de parada foi a fixação de um deslocamento limite na estrutura de 5mm, a fim de garantir a obtenção do colapso do modelo antes de atingir a interrupção da solução.

A Figura 3.9 resume as etapas realizadas nas análises via elementos finitos.



**Figura 3.9 Fluxograma das análises numérica.**

### 3.6 Validação do modelo de Elementos Finitos

Para validação do modelo numérico foi realizada a comparação entre resultados experimentais e numéricos. A validação foi referente ao modo local de flambagem de placas do perfil rack com perfurações. Os resultados experimentais utilizados são da pesquisa de Silva (2011), que realizou uma análise teórico-experimental de colunas curtas perfuradas, sendo o modo local dominante. A Tabela 3.7 apresenta os valores obtidos na análise experimental e os resultados numérico via Método dos Elementos Finitos.

**Tabela 3.7. Comparação entre os resultados numéricos e experimentais**

<b>Protótipo (Silva, 2011)</b>	<b><math>P_{cr,exp}</math> (kN) (Silva, 2011)</b>	<b><math>P_{cr,num}</math> (kN)</b>	<b><math>\frac{P_{num,exp}}{P_{cr,num}}</math></b>
SF-1,5-CP1	83,28	81,15	0,97
SF-1,5-CP2	79,77	81,15	1,02
SF-1,8-CP3	128,00	139,00	1,09
2F-1,5-CP1	77,19	80,00	1,04
2F-1,5-CP3	77,07	80,00	1,04
2F-1,8-CP1	126,70	132,00	1,04
2F-1,8-CP2	128,90	132,00	1,02

**SF** – Coluna sem perfurações.

**2F** – Coluna com dois furos.

**1,5 e 1,8** – Espessura de chapa em mm utilizada.

**CP (1, 2 e 3)** – Identificação do corpo de prova.

**$P_{cr,exp}$**  – Carga crítica experimental, (Silva, 2011)

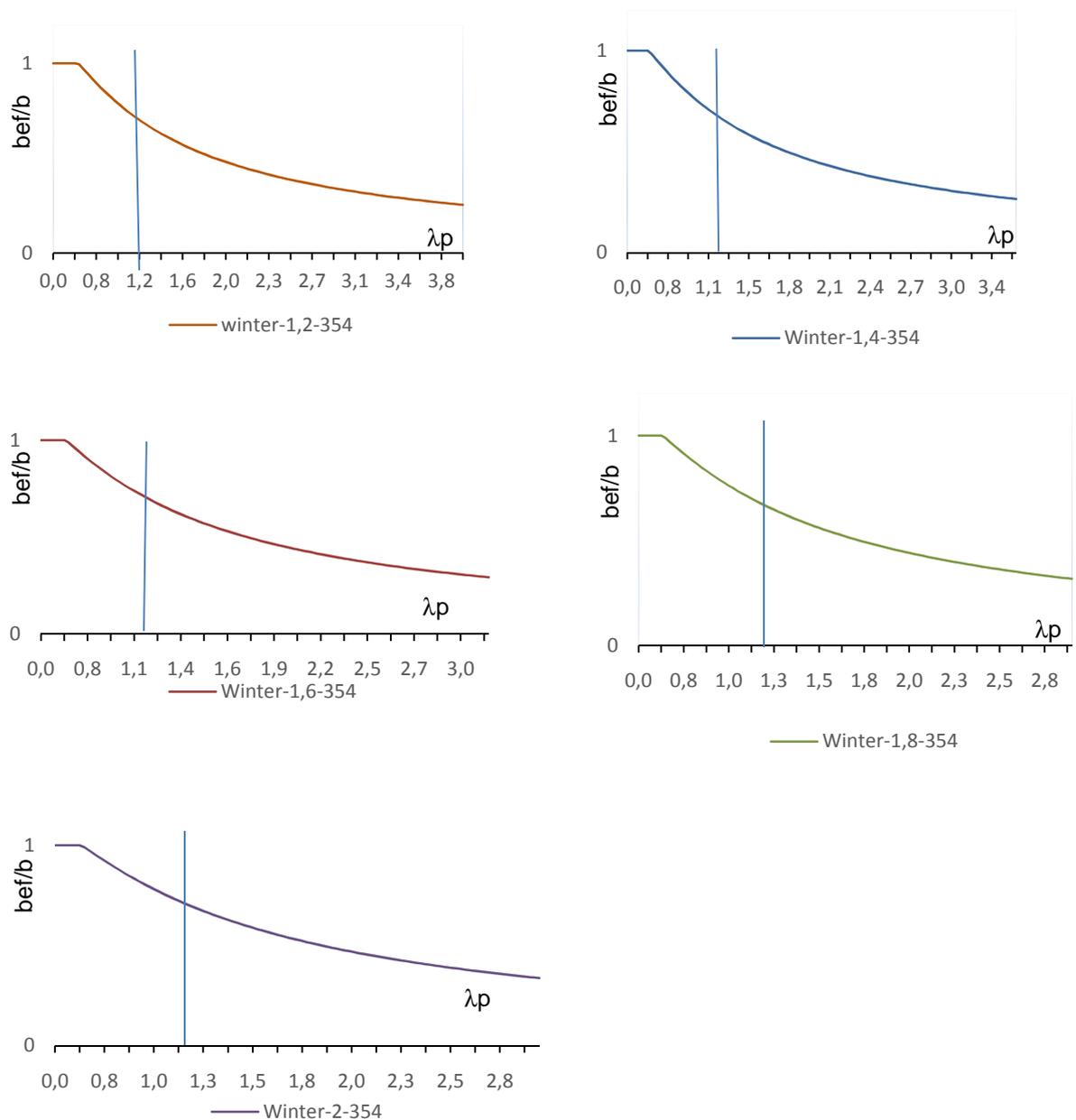
**$P_{cr,num}$**  – Carga crítica numérica, ANSYS (ANSYS, 2011).

Os resultados da Tabela 3.7 comprovam a validade do modelo numérico a partir da comparação dos resultados numéricos e experimentais, com boa correlação dos resultados.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Classificação de acordo com a esbeltez

Para classificar as colunas de acordo com a esbeltez da alma, foi utilizada a curva de Winter. A Figura 4.1 representa curvas de Winter nas espessuras de 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 e 2,0 mm, considerando o aço com  $f_y = 354$  MPa (SILVA, 2011). Essas curvas representam a variação da largura efetiva em relação ao índice de esbeltez relativo  $\lambda_p$ , no lado direito da linha vertical,  $\lambda_p > 1,2$ , estão as placas esbeltas, que apresentam comportamento elástico (Sarmanho, 1991).



**Figura 4.1.** Curvas de flambagem de Winter para espessura 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0mm, aço  $f_y=354$  MPa.

A Tabela 4.1 representa os valores do limite da esbelteza relativa  $\lambda_p$  para as larguras dos elementos de placa de 150, 180 e 200 mm.

**Tabela 4.1. Valores de  $\lambda_p$  em função da largura e espessura dos elementos**

<b>b (mm)</b>	<b>t (mm)</b>				
	1,2	1,4	1,6	1,8	2
150	2,7	2,4	2,1	1,8	1,7
180	3,3	2,8	2,5	2,2	1,9
200	3,7	3,2	2,8	2,5	2,2

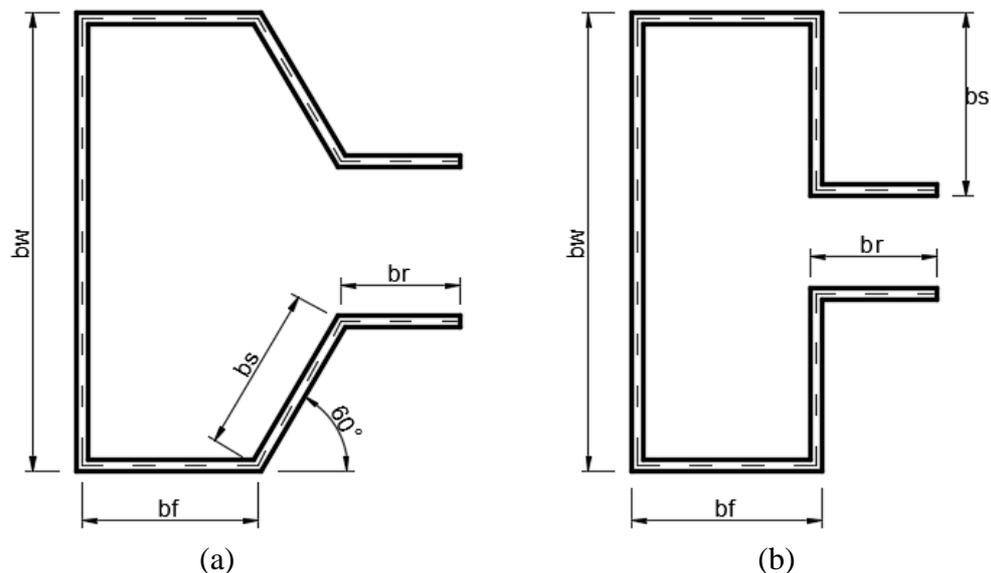
**b** – Largura da placa.

**t** – Espessura da chapa.

De acordo com os valores da esbelteza limite representados na Tabela 4.1, conclui-se que os elementos com largura de 150,180 e 200mm, utilizando chapas de espessuras 1,2, 1,4, 1,6, 1,8 e 2,0 mm, serão todos classificados como esbeltos, pois os valores de  $\lambda_p$  são superiores à 1,2. O colapso ocorrerá no regime elástico.

## 4.2 Análise da inclinação do enrijecedor

A Figura 4.2 (a) representa um perfil de seção transversal tipo rack, com enrijecedor inclinado em relação ao flange e a Figura 4.2 (b) um perfil com enrijecedor perpendicular ao flange.



**Figura 4.2. Representação da inclinação do enrijecedor.**

A resistência das seções está relacionada às suas propriedades geométricas, ou seja, quando for possível alterar as propriedades visando melhorias no comportamento e na resistência, utilizando a mesma quantidade de material, haverá melhoria da relação custo-

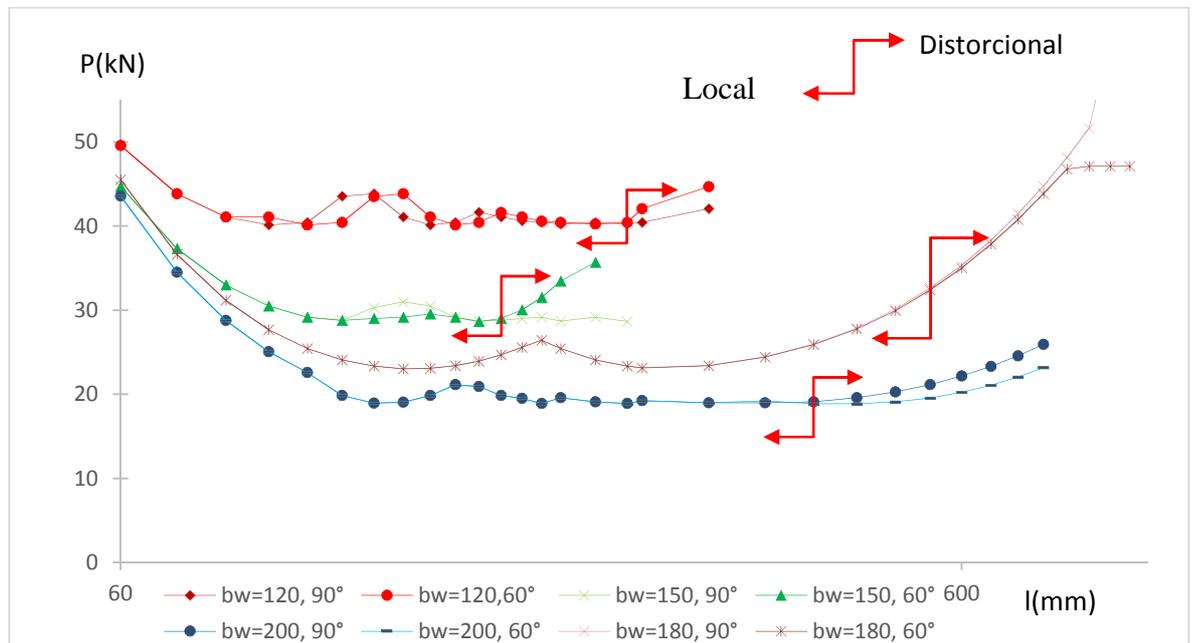
benefício. A Tabela 4.2 representa a comparação entre as propriedades geométricas das seções com enrijecedor inclinado e com enrijecedor perpendicular ao flange.

**Tabela 4.2. Comparação das propriedades geométricas das seções com enrijecedores inclinados e retos.**

Seção	Propriedades geométricas			
	Enrijecedor (90°)		Enrijecedor (60°)	
b <sub>w</sub> =150mm	Área (mm <sup>2</sup> )	432	Área (mm <sup>2</sup> )	432
	I <sub>1</sub> (mm <sup>4</sup> )	1399000	I <sub>1</sub> (mm <sup>4</sup> )	1438000
	I <sub>2</sub> (mm <sup>4</sup> )	269600	I <sub>2</sub> (mm <sup>4</sup> )	381200

Os momentos de inércia têm valores maiores, quando se utilizam enrijecedores inclinados em relação ao flange. A (ABNT NBR 14762, 2010), no Método da Seção Efetiva, apresenta apenas formulações para o perfil rack com enrijecedores retos.

Em estudos relacionados com flambagem local, a determinação do valor da força axial de flambagem local elástica (N<sub>l</sub>) é essencial. Esse valor é obtido por análise de estabilidade elástica. Os valores da força axial de flambagem local elástica para seções do tipo rack com as mesmas dimensões, alterando apenas a inclinação do enrijecedor, têm sempre valores aproximados. A Figura 4.3 representa graficamente o comportamento das seções, onde a mudança do modo local para o modo distorcional é representado por uma seta dupla.



**Figura 4.3. Curva de flambagem, seções com enrijecedores inclinados e retos, espessura de 1,2mm.**

Observa-se que em relação ao modo local não há dispersões consideráveis no valor da força axial de flambagem local. As diferenças começam a aparecer no trecho associado à flambagem distorcional, devido à inclinação do enrijecedor, o que indica a viabilidade da

aplicação do Método da Seção Efetiva para avaliação da flambagem local em seções do tipo rack com enrijecedores inclinados.

### 4.3 Comparação entre os resultados normativos e numéricos para perfis sem perfurações

A ABNT NBR 14762 (2010) apresenta três métodos de dimensionamento de barras submetidas à compressão centrada, o Método da Largura Efetiva, o Método da Seção Efetiva e o Método da Resistência Direta. Será realizada uma comparação entre os três métodos recomendados por norma e o Método dos Elementos Finitos, via (ANSYS, 2011), para seções sem perfurações. As seções analisadas serão as seções tipo rack utilizadas no desenvolvimento desse trabalho, com o objetivo de, mais uma vez, validar o procedimento. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3. Comparação entre os métodos de dimensionamento da (ABNT NBR 14762, 2010) com resultados numéricos.**

<b>b<sub>w</sub>(mm)</b>	<b>t(mm)</b>	<b>L(mm)</b>	<b>M.L.E(kN)</b>	<b>M.S.E(kN)</b>	<b>M.R.D(kN)</b>	<b>M.E.F(kN)</b>
120	1,2	288	71,93	63,98	65,09	65,14
	1,4	288	94,02	83,33	84,80	86,49
	1,6	288	126,23	104,49	106,45	101,72
	1,8	288	147,52	127,51	129,81	121,76
	2	288	169,58	152,17	154,87	139,73
150	1,2	360	81,84	59,61	60,70	64,05
	1,4	360	104,10	77,81	79,20	83,95
	1,6	360	126,64	97,88	99,60	105,03
	1,8	360	148,26	119,70	121,74	127,36
	2	360	170,74	143,17	145,56	142,15
180	1,2	432	81,76	56,59	57,72	62,14
	1,4	432	104,07	73,98	75,42	79,94
	1,6	432	125,54	92,48	94,33	102,00
	1,8	432	148,44	114,16	116,27	124,02
	2	432	171,15	136,74	139,22	139,33
200	1,2	480	81,57	55,01	56,16	62,69
	1,4	480	103,86	71,95	73,44	79,53
	1,6	480	126,40	90,72	92,72	105,04
	1,8	480	148,22	111,20	113,37	118,50
	2	480	171,03	133,31	135,83	132,84

**b<sub>w</sub>** – largura da alma.

**t** – espessura da chapa.

**L** – comprimento da coluna.

**M.L.E** – Método da Largura Efetiva

**M.S.E** – Método da Seção Efetiva

**M.E.F** – Método dos Elementos Finitos, ANSYS (2011)

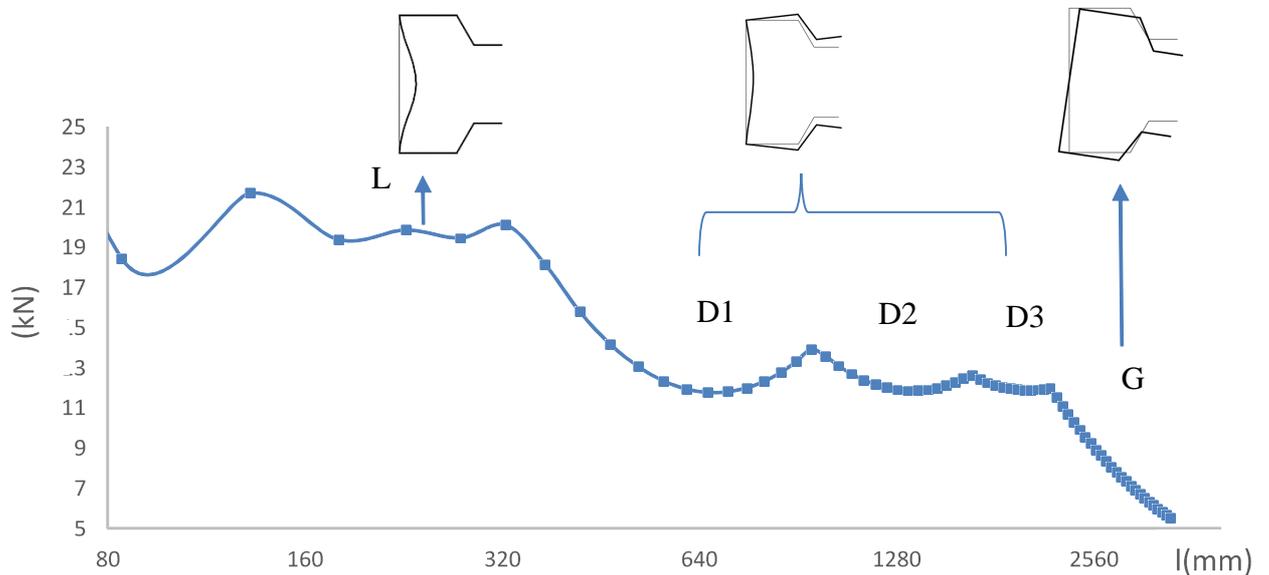
**M.R.D** – Método da Resistência Direta.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.3, o Método da Largura Efetiva apresenta grandes dispersões quando comparado com o Método dos Elementos Finitos, por ser um método aproximado que analisa as placas do perfil de forma isolada. O Método da Resistência Direta tem a melhor aproximação com o Método dos Elementos Finitos. O Método da Seção Efetiva, que foi baseado no Método da Resistência Direta, apresenta boa correlação com os resultados numéricos para as seções avaliadas, pequenas dispersões são justificadas por tratar-se de um método simplificado.

#### 4.4 Verificação da flambagem distorcional nas seções

As seções do tipo Rack estão mais suscetíveis a apresentar o modo de flambagem distorcional. O Método da Seção Efetiva não considera ocorrência deste modo de flambagem, para determinação do valor característico da força axial de compressão resistente a introdução das perfurações nos perfis formados a frio pode alterar o modo de estabilidade das colunas. Foi realizada uma análise de estabilidade para seções com perfurações.

Para fazer a análise de estabilidade em perfis com perfurações foi necessário variar o número de perfurações, de 1 até o comprimento de ocorrência da flambagem global. A Figura 4.4 representa uma seção que desenvolve o modo local, distorcional e global.

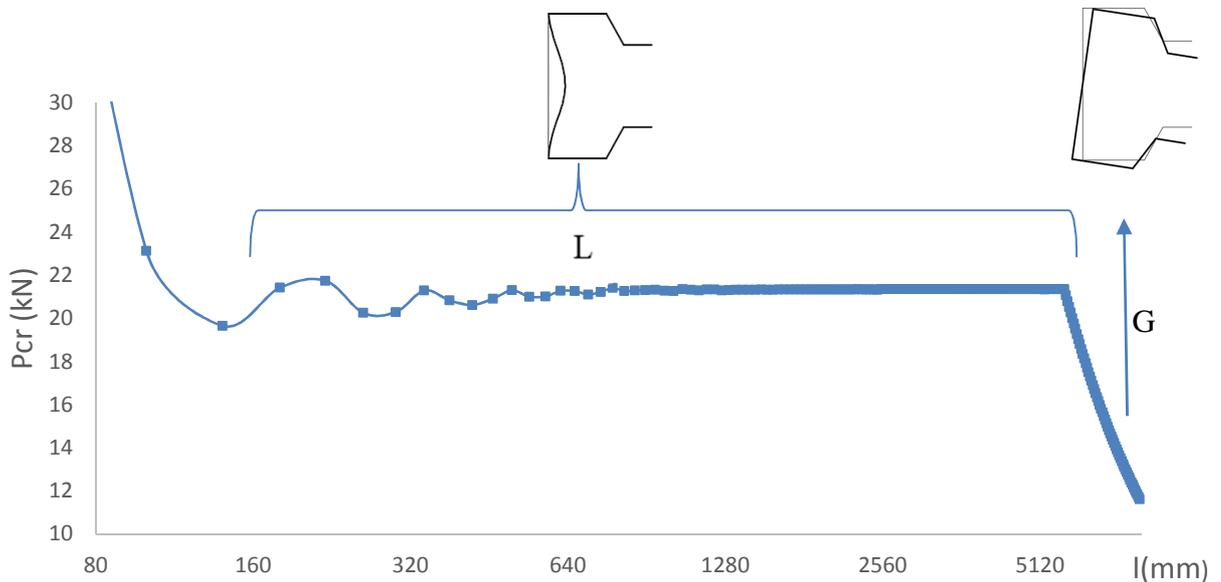


**Figura 4.4. Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 120$  mm,  $t = 2$  mm e  $h_f/b_w = 10\%$ , (ANSYS, 2011).**

Observa-se o desenvolvimento dos três modos de flambagem na seção representada pela Figura 4.4. O modo predominante é o distorcional, nesse caso não é adequada a aplicação do

Método da Seção Efetiva. Dessa forma a seção de  $b_w = 120$  mm não será considerada para as análises.

A Figura 4.5 representa a análise de estabilidade de uma seção que não apresenta o modo distorcional.



**Figura 4.5. Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 200$  mm e  $t = 1,2$  mm,  $h_f/b_w=10\%$ , (ANSYS, 2011).**

A seção representada pela Figura 4.5 tem o modo local dominante e pode ser dimensionada pelo Método da Seção Efetiva. As demais análises de estabilidade com seções perfuradas, totalizando 100 seções, estão representadas no apêndice A. As seções que não apresentam o modo distorcional estão apresentadas na Tabela 4.4, totalizando 36 seções.

**Tabela 4.4. Seções que não apresentam modo distorcional**

$b_w$ (mm)	$t$ (mm)	$\frac{h_f}{b_w}$ (%)
150	1,2; 1,4 e 1,6	10, 20, 30 e 40
180	1,2; 1,4 e 1,6	10, 20, 30 e 40
200	1,2; 1,4 e 1,6	10, 20, 30 e 40

$b_w$  – largura da alma.

$t$  – espessura da chapa.

$\frac{h_f}{b_w}$  – relação entre a altura do furo e a largura da alma.

#### 4.5 Coeficiente de flambagem local para seções com perfurações

As perfurações nas paredes das colunas são comuns em sistemas estruturais utilizados em edificações, sistemas de armazenagem industrial e em projetos de aeronaves. A análise de estabilidade elástica da seção é feita por meio de programas específicos, como o GBTul

(Bebiano et al. (2008)). No entanto, a complexidade na interpretação dos resultados desta análise faz com que ela não esteja presente no cotidiano dos escritórios de projeto. Desta forma, Batista (2009) desenvolveu o Método da Seção Efetiva, onde a utilização de parâmetros substitui a análise de estabilidade para seções sem perfurações. Foi realizada a adaptação deste método para seções com perfurações

Para determinação do valor de  $k_{l,liq}$  (coeficiente de flambagem local, considerando o efeito das perfurações), será utilizado a equação (13), de acordo com Batista (2009).

$$N_{l,liq} = k_{l,liq} \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{b_w}{t}\right)^2} A \quad (13)$$

Sendo:

$N_{l,liq}$  – força axial de flambagem elástica em perfis perfurados;

$k_{l,liq}$  – coeficiente de flambagem local, considerando as perfurações;

$E$  – módulo de elasticidade do aço;

$\nu$  – Coeficiente de Poisson do aço;

$b_w$  – largura da alma do perfil analisado;

$t$  – espessura da chapa do perfil;

$A$  – área da seção bruta.

O objetivo desse trabalho é utilizar o Método da Seção Efetiva. Esse método estabelece, o valor do coeficiente de flambagem local para seções brutas,  $k_l$ . Esse valor é obtido em análise de estabilidade elástica com seções sem furo e aplicando o valor de  $N_l$  na equação(13). Foi realizado procedimento similar, considerando as seções com perfurações, sendo o valor de  $N_l$  obtido via ANSYS (2011). A Tabela 4.5 representa a variação de  $k_l$  em função da altura do furo. Para  $h_f/b_w = 0\%$ , tem-se o valor de  $k_l$  para seção bruta. Para estudar o comportamento do modo local, considerando os efeitos das perfurações, os valores da Tabela 4.5 estão representados graficamente na Figura 4.6.

**Tabela 4.5. Valores de  $k_l$  para seções perfuradas.**

t (mm)		1,2		1,4		1,6	
$b_w$ (mm)	$h_f/b_w$	$P_{cr,liq}$ (kN)	$k_{l,liq}$	$P_{cr,liq}$ (kN)	$k_{l,liq}$	$P_{cr,liq}$ (kN)	$k_{l,liq}$
200	0%	19,86	6,20	31,46	6,19	47,10	6,21
	10%	19,65	6,14	31,16	6,13	46,43	6,12
	20%	19,44	6,07	30,87	6,07	46,07	6,07
	30%	18,30	5,72	29,06	5,72	43,37	5,71
	40%	17,61	5,50	27,91	5,49	41,53	5,47

**Tabela 4.5. Valores de  $k_l$  para seções perfuradas (Continuação).**

t (mm)		1,2		1,4		1,6	
180	0%	22,20	5,94	35,59	5,96	57,87	5,93
	10%	21,27	5,69	33,73	5,65	50,27	5,64
	20%	21,51	5,76	34,15	5,72	50,95	5,72
	30%	20,49	5,48	32,53	5,45	49,12	5,51
	40%	19,60	5,25	31,32	5,25	46,70	5,24
150	0%	29,03	5,70	45,32	5,71	67,41	5,69
	10%	26,79	5,36	42,48	5,35	63,31	5,34
	20%	26,90	5,38	42,69	5,38	63,67	5,37
	30%	25,50	5,10	40,46	5,10	60,33	5,09
	40%	23,90	4,78	37,88	4,77	56,57	4,78

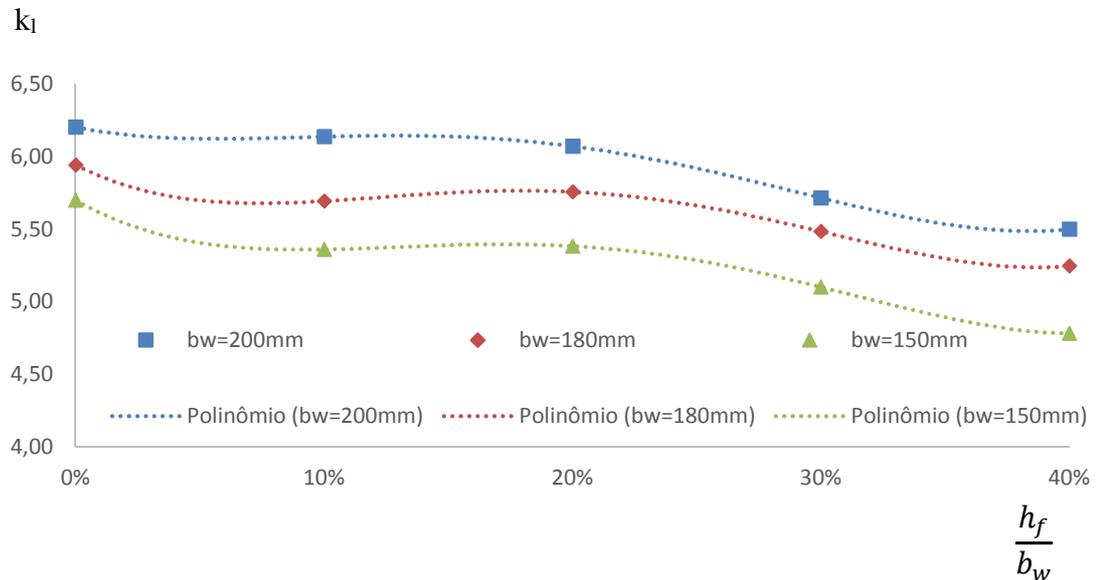
$b_w$  – largura da alma.

$h_f/b_w$  – relação entre a altura do furo e a largura da alma.

$P_{cr,liq}$  – carga crítica para seções com perfurações (ANSYS, 2011).

$k_{l,liq}$  – coeficiente de flambagem local para seções perfuradas.

A Figura 4.6 representa graficamente os resultados apresentados na Tabela 4.5, para as seções com espessura de chapa de 1,2mm. No apêndice C estão representados os gráficos correspondentes as espessuras de 1,4 mm e 1,6 mm.

**Figura 4.6. Variação do valor de  $k_l$  e  $t=1,2$ mm.**

Observa-se, de acordo com as representações gráficas apresentadas na Figura 4.6, que o efeito das perfurações reduz o valor de  $k_l$  e que as curvas têm comportamentos semelhantes. Utilizando a regressão não linear, foram determinadas as equações que representam as três curvas. A equação obtida foi polinomial de 4º grau, de acordo com a Equação (14).

$$k_{l,liq} = 388,09 \left(\frac{h_f}{b_w}\right)^4 - 343,93 \left(\frac{h_f}{b_w}\right)^3 + 94,14 \left(\frac{h_f}{b_w}\right)^2 - 9,76 \left(\frac{h_f}{b_w}\right) + k_l \quad (14)$$

Os termos iniciais foram denominados como  $k_{red}$ , coeficiente de flambagem local reduzido para seções perfuradas. Logo, tem-se:

$$k_{l,liq} = k_{red} + k_l \quad (15)$$

Para verificar o comportamento da Equação (14), os resultados obtidos foram comparados a resultados numéricos obtidos via Método dos Elementos Finitos (ANSYS, 2011), conforme apresentados na Tabela 4.6. O  $N_{l,liq}$  para seções com perfurações é calculado de acordo com a Equação (16).

$$N_{l,liq} = k_{l,liq} \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)(b_w/t)^2} A \quad (16)$$

$N_{l,liq}$  –força axial de flambagem local elástica para seções perfuradas;

$k_{l,liq}$  – coeficiente de flambagem local para seções perfuradas, conforme Equação (14).

**Tabela 4.6. Comparação entre os valores de  $N_l$  proposto e  $N_l$  numérico.**

$b_w$ (mm)	$t$ (mm)	$h_f/b_w$ (%)	$k_{l,liq}$	$N_{l,liq}$ (kN)	$N_{l,num}$ (kN)	$\frac{N_{l,liq}}{N_{l,num}}$
150	1,2	10	5,36	26,76	26,789	1,00
		20	5,38	26,88	26,903	1,00
		30	5,10	25,47	25,498	1,00
		40	4,78	23,87	23,898	1,00
	1,4	10	5,37	42,58	42,48	1,00
		20	5,39	42,76	42,69	1,00
		30	5,11	40,53	40,46	1,00
		40	4,79	37,99	37,88	1,00
	1,6	10	5,35	63,32	63,31	1,00
		20	5,37	63,59	63,67	1,00
		30	5,09	60,26	60,33	1,00
		40	4,77	56,47	56,57	1,00
180	1,2	10	5,60	21,03	21,27	0,99
		20	5,62	21,12	21,51	0,98
		30	5,34	20,06	20,49	0,98
		40	5,02	18,86	19,6	0,96
	1,4	10	5,60	33,40	33,73	0,99
		20	5,62	33,54	34,15	0,98
		30	5,34	31,86	32,53	0,98
		40	5,02	29,95	31,32	0,96
	1,6	10	5,59	49,77	50,27	0,99
		20	5,61	49,97	50,95	0,98
		30	5,33	47,47	49,12	0,97
		40	5,01	44,62	46,7	0,96

**Tabela 4.6. Comparação entre os valores de  $N_l$  proposto e  $N_l$  numérico (Continuação).**

$b_w$ (mm)	$t$ (mm)	$h_f/b_w$ (%)	$k_{l, liq}$	$N_{l, liq}$ (kN)	$N_{l, num}$ (kN)	$\frac{N_{l, liq}}{N_{l, num}}$
200	1,2	10	5,86	18,74	19,65	0,95
		20	5,88	18,82	19,44	0,97
		30	5,60	17,92	18,30	0,98
		40	5,28	16,89	17,61	0,96
	1,4	10	5,85	29,71	31,16	0,95
		20	5,87	29,83	30,87	0,97
		30	5,59	28,40	29,06	0,98
		40	5,27	26,78	27,91	0,96
	1,6	10	5,86	44,83	46,43	0,96
		20	5,88	44,60	46,07	0,97
		30	5,60	42,47	43,37	0,98
		40	5,28	40,24	41,51	0,97

$k_{l, liq}$  – Coeficiente de flambagem local para seções perfuradas.  
 $N_{l, liq}$  – força axial de flambagem local elástica, considerando as perfurações.  
 $N_{l, num}$  – força axial de flambagem local elástica numérico, seções perfuradas (ANSYS, 2011).

A Equação (14) é válida para seções tipo rack, com esbeltez da alma dentro do intervalo  $2,08 \leq \lambda_p \leq 3,69$  e relação entre a largura do flange e largura da alma, esteja entre  $0,25 \leq \frac{b_f}{b_w} \leq 0,33$ , esses valores são referentes as colunas analisadas.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4.6, verifica-se que a equação proposta, apresenta bons resultados para o valor da força axial de flambagem local elástica, considerando o modo local e perfurações no padrão apresentado.

## 5 MÉTODO DA SEÇÃO EFETIVA EM PERFIS RACK COM PERFURAÇÕES

Neste capítulo é apresentada a possibilidade da aplicação do Método da Seção Efetiva em barras perfuradas, submetidas à compressão centrada e limitado à ocorrência do modo local.

### 5.1 Estratégia para resolução utilizando o Método da Seção Efetiva, considerando o efeito das perfurações

Com o objetivo de sugerir uma metodologia para aplicação do Método da Seção Efetiva em protótipos com perfurações, foram avaliadas diferentes análises para validar o procedimento, inserção do  $k_{l,liq}$  no Método da Seção Efetiva, determinação da área efetiva em colunas perfuradas e análise do modo localizado de placa.

#### 5.1.1 Aplicação do $k_{l,liq}$ e propriedades da seção líquida no Método da Seção Efetiva

Neste item será apresentada a verificação da resistência de cálculo à compressão, utilizando o Método dos Elementos Finitos e comparados os resultados com os valores obtidos, adotando o Método da Seção Efetiva, com as modificações listada a seguir.

- Adotar o valor do  $k_{l,liq}$ , para determinação da força axial de flambagem local elástica;
- Utilizar as propriedades geométricas da seção com furo ( $A_{liq}$ ).

O valor de  $N_i$ , necessário para dimensionar utilizando o Método da Seção Efetiva, foi calculado conforme a metodologia descrita no capítulo 4. Também foram comparados o valor da resistência via M.E.F para as seções perfuradas e não perfuradas para avaliar os efeitos causados pela inserção das perfurações na capacidade resistente das colunas verificadas. Os resultados estão descritos na Tabela 5.1 para o perfil 150-50-30-25mm e espessuras 1,2, 1,4 e 1,6 mm.

Os resultados representados na Tabela 5.1, mostram uma boa correlação entre o Método dos Elementos Finitos e o Método da Seção Efetiva Modificado, onde a diferença é inferior a 3% para furos de comprimento igual a 10% e 20% da largura da alma. No entanto, para furos maiores (30% e 40% de  $b_w$ ), observam-se maiores dispersões, chegando a 20% nos casos mais críticos.

**Tabela 5.1. Resultados obtidos para a seção 150-50-30-25- t (1,2, 1,4 e 1,6 mm).**

<b>t</b> (mm)	<b>L</b> (mm)	$\frac{h_f}{b_w}$ (%)	<b>P<sub>u-liq</sub></b> M.E.F (kN)	<b>M.S.E.M</b> (kN)	$\frac{P_{u-liq}}{M.S.E.M}$	<b>P<sub>u-sf</sub></b> (kN)
1,2	375	10	54,91	54,92	1,00	61,17
	390	20	56,49	54,96	1,03	60,65
	405	30	<u>65,26</u>	54,36	1,20	<u>62,01</u>
	420	40	<u>63,11</u>	52,71	1,20	<u>61,69</u>
1,4	375	10	71,56	71,65	1,00	76,00
	390	20	72,08	71,71	1,01	75,08
	405	30	<u>82,47</u>	70,95	1,16	<u>76,16</u>
	420	40	<u>77,93</u>	68,77	1,13	<u>75,65</u>
1,6	375	10	88,85	90,07	0,99	91,18
	390	20	89,76	90,16	1,00	90,07
	405	30	<u>100,65</u>	88,36	1,14	<u>91,11</u>
	420	40	<u>92,38</u>	86,35	1,07	<u>90,02</u>

**t** – espessura da chapa.

**L** – comprimento da coluna.

$\frac{h_f}{b_w}$  – relação entre a altura do furo e a largura da alma.

**P<sub>u-liq</sub>** – carga última seção perfurada (ANSYS, 2011).

**M.S.E.M** – Método dos Elementos Finitos Modificado, utilizando área mínima.

**P<sub>u-sf</sub>** – carga última seção não perfurada (ANSYS, 2011).

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos para o perfil 180-50-30-25mm e espessuras (1,2, 1,4 e 1,6 mm).

**Tabela 5.2. Resultados obtidos para a seção 180-50-30-25mm-t (1,2, 1,4 e 1,6 mm).**

<b>t</b> (mm)	<b>L</b> (mm)	$\frac{h_f}{b_w}$ (%)	<b>P<sub>u-liq</sub></b> M.E.F (kN)	<b>M.S.E.M</b> (kN)	$\frac{P_{u-liq}}{M.S.E}$	<b>P<sub>u-sf</sub></b> (kN)
1,2	450	10	52,84	52,44	1,01	58,43
	468	20	57,03	52,57	1,08	60,69
	486	30	60,51	51,55	1,17	59,73
	504	40	59,30	50,80	1,17	58,86
1,4	450	10	68,34	68,51	1,00	72,93
	468	20	72,93	67,75	1,07	75,09
	486	30	<u>75,14</u>	67,40	1,11	<u>71,93</u>
	504	40	<u>73,72</u>	66,79	1,10	<u>72,95</u>
1,6	450	10	85,39	86,26	0,99	87,36
	468	20	88,74	86,55	1,03	89,74
	486	30	<u>91,26</u>	85,28	1,07	<u>87,86</u>
	504	40	<u>87,75</u>	83,59	1,05	<u>87,10</u>

**Tabela 5.2. Resultados obtidos para a seção 180-50-30-25mm-t (1,2, 1,4 e 1,6mm)**  
(Continuação).

**t** – espessura da chapa.  
**L** – comprimento da coluna.  
 $\frac{h_f}{b_w}$  – relação entre a altura do furo e a largura da alma.  
**P<sub>u-liq</sub>** – carga última seção perfurada (ANSYS, 2011).  
**M.S.E.M** – Método dos Elementos Finitos Modificado, utilizando área mínima.  
**P<sub>u-sf</sub>** – carga última seção não perfurada (ANSYS, 2011).

Os resultados representados na Tabela 5.2, mostram uma boa correlação entre o Método dos Elementos Finitos e o Método da Seção Efetiva Modificado, onde a diferença é inferior a 8% para furos de comprimento igual a 10% e 20% da largura da alma. No entanto, para furos maiores (30% e 40% de  $b_w$ ), observam-se maiores dispersões, chegando a 17,38% nos casos mais críticos.

A última comparação, entre as resistências obtidas via Método dos Elementos Finitos e Método da Seção Efetiva Modificado, foi realizada no perfil 200-50-30-25mm e (1,2, 1,4 e 1,6 mm). A Tabela 5.3 apresenta os valores de resistência para essa seção.

**Tabela 5.3. Resultados obtidos para a seção 200-50-30-25mm-t (1,2, 1,4 e 1,6 mm).**

<b>t</b> (mm)	<b>L</b> (mm)	$\frac{h_f}{b_w}$ (%)	<b>P<sub>u-liq</sub></b> M.E.F (kN)	<b>M.S.E.M</b> (kN)	$\frac{P_{u-liq}}{M.S.E}$	<b>P<sub>u-sf</sub></b> (kN)
1,2	500	10	54,29	52,07	1,04	55,45
	520	20	55,89	51,77	1,08	57,43
	540	30	55,23	50,9	1,09	55,72
	560	40	54,03	49,94	1,08	54,56
1,4	500	10	70,74	68,06	1,04	68,92
	520	20	70,52	68,52	1,03	70,84
	540	30	69,26	66,08	1,05	69,96
	560	40	66,98	64,97	1,03	67,95
1,6	500	10	82,53	81,75	1,01	83,37
	520	20	83,83	80,57	1,04	84,86
	540	30	<u>86,73</u>	79,59	1,09	<u>82,41</u>
	560	40	<u>83,08</u>	76,23	1,09	<u>81,58</u>

**t** – Espessura da chapa.  
**L** – Comprimento da coluna.  
 $\frac{h_f}{b_w}$  – Relação entre a altura do furo e a largura da alma.  
**P<sub>u-liq</sub>** – Carga última seção perfurada (ANSYS, 2011).  
**M.S.E.M** – Método da Seção Efetiva Modificado, utilizando área mínima.  
**P<sub>u-sf</sub>** – Carga última seção não perfurada (ANSYS, 2011)

Os resultados representados pela Tabela 5.3, mostra uma boa relação entre Método dos Elementos Finitos com o Método da Seção Efetiva Modificado, onde a diferença percentual não ultrapassou 9% para as perfurações consideradas.

Avaliando os resultados descritos nesse item, observa-se uma boa correlação entre a capacidade resistente obtidas utilizando o Método dos Elementos Finitos e o Método da Seção Efetiva Modificado. Melhores aproximações acontecem para perfurações de comprimento igual a 10% e 20% de  $b_w$ . Em alguns casos, observa-se uma resistência maior nas colunas com perfurações quando comparadas com colunas não perfuradas, conforme pode-se observar nas tabelas anteriores, com os valores sublinhado. Esse fato também foi observado na análise experimental de (SILVA, 2011).

## 5.2 Efeito dos furos na capacidade resistente da coluna.

O ganho de resistência e a diferença apresentada pelo Método dos Elementos Finitos e o Método da Seção Efetiva Modificado pode ser explicado por dois motivos:

- Número de furos nos protótipos;
- Influência do modo localizado de placas (SOUZA, 2013).

Serão apresentadas a seguir as análises em que foram consideradas estas duas hipóteses.

### 5.2.1 Análise do número de furos

O número de furos distribuídos ao longo do eixo longitudinal do protótipo pode influenciar na resposta do modelo numérico, devido aos efeitos das extremidades. Para verificar a ocorrência desses efeitos, foram analisadas as resistências da coluna variando o número de perfurações. O número de perfurações foi incrementado de 1 até uma altura limite, em que a participação do modo local seja dominante. Essa verificação é realizada nos protótipos 150-50-30-25 mm ( $t = 1,2; 1,4$  e  $1,6$  mm) e 180-50-30-25 mm ( $t = 1,2; 1,4$  e  $1,6$  mm), (30% e 40% de  $b_w$ ), pois esses apresentaram dispersões maiores que 10%. A Tabela 5.4 apresenta as distribuições das perfurações nos protótipos analisados. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.4. Variação do número de furos nos protótipos  $b_w=150$  mm e  $b_w=180$  mm.

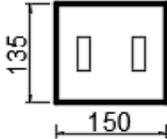
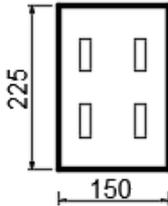
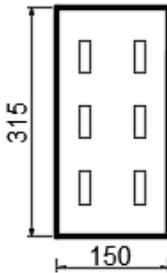
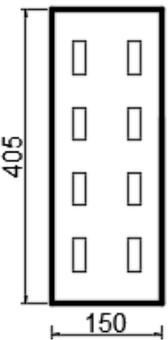
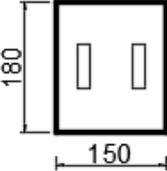
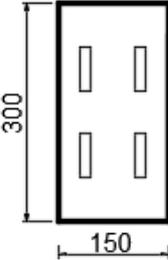
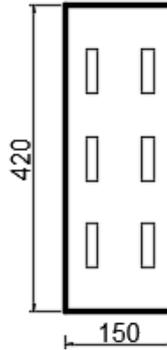
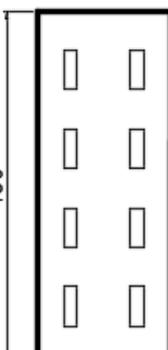
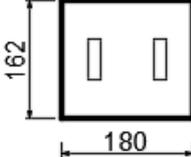
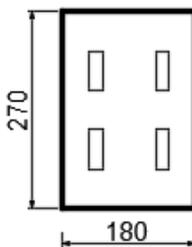
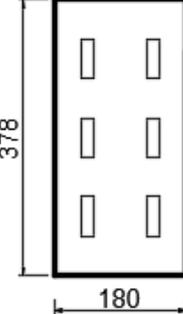
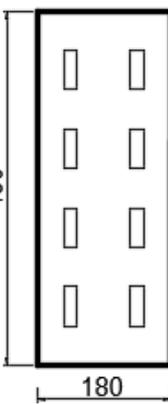
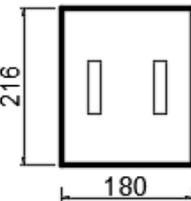
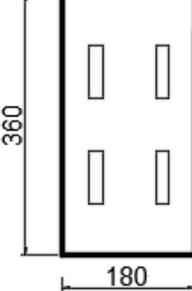
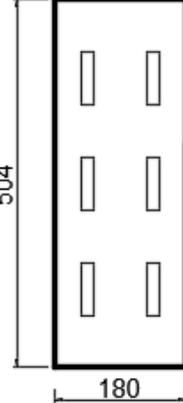
$\frac{h_f}{b_w}$ (%)	$n_f = 1$	$n_f = 2$	$n_f = 3$	$n_f = 4$
30				
40				
30				
40				

Tabela 5.5 Resistência em função do número de furos.

$b_w-t \frac{h_f}{b_w}$	L (mm)	n <sub>f</sub>	P <sub>u,liq</sub> M.E.F (kN)	P <sub>u-sf</sub> (kN)	M.S.E.M (kN)	$\frac{P_{u,liq}}{M.S.E.M}$
150-1,2-30%	135	1	66,31	64,07	54,51	1,22
	225	2	65,26	64,64	54,36	1,20
	315	3	65,42	63,7	54,14	1,21
	405	4	65,26	62,01	54,46	1,20
150-1,2-40%	180	1	66,66	62,46	53,37	1,25
	300	2	64,72	63,4	53,11	1,22
	420	3	63,11	61,69	52,71	1,20
150-1,4-30%	135	1	86,06	84,41	71,15	1,21
	225	2	82,47	83,82	70,95	1,16
	315	3	82,77	79,23	70,65	1,17
	405	4	82,47	76,16	70,95	1,16
150-1,4-40%	180	1	90,21	80,41	69,64	1,30
	300	2	80,84	80,11	69,3	1,17
	420	3	77,93	75,65	68,78	1,13
150-1,6-30%	135	1	105,24	107,72	89,49	1,18
	225	2	103,76	100,31	89,24	1,16
	315	3	102,52	94,67	88,86	1,15
	405	4	100,65	91,11	88,36	1,14
150-1,6-40%	180	1	100,99	100,62	87,34	1,16
	300	2	96,79	96,07	86,9	1,11
	420	3	92,38	90,02	86,35	1,07
180-1,2-30%	162	1	64,02	62,32	52,53	1,22
	270	2	62,32	62,51	52,31	1,19
	378	3	63,72	60,72	51,98	1,23
	486	4	60,51	59,73	51,55	1,17
180-1,2-40%	216	1	64,68	62,35	51,75	1,25
	360	2	61,51	61,01	51,37	1,20
	504	3	59,3	58,86	50,8	1,17
180-1,4-30%	162	1	83,93	81,87	68,69	1,22
	270	2	79,86	78,98	68,4	1,17
	378	3	83,99	76,3	67,97	1,24
	486	4	75,14	71,93	67,4	1,11
180-1,4-40%	216	1	77,12	80,51	67,61	1,14
	360	2	77,27	76,78	67,11	1,15
	504	3	73,72	72,95	66,79	1,10

P<sub>u,liq</sub> – carga última seção perfurada (ANSYS, 2011).

M.S.E.M – Método dos Elementos Finitos Modificado.

P<sub>u-sf</sub> - carga última seção não perfurada (ANSYS, 2011).

n<sub>f</sub> – número de furos.

L – comprimento da coluna.

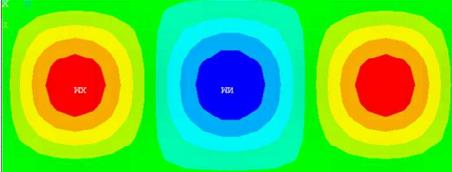
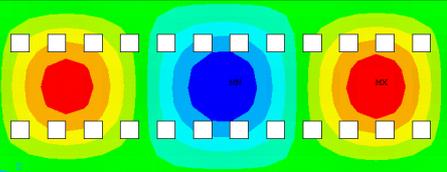
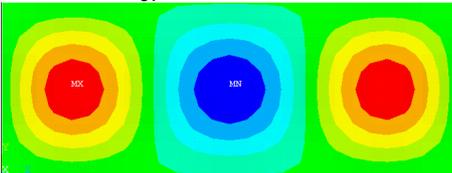
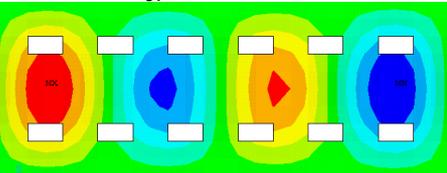
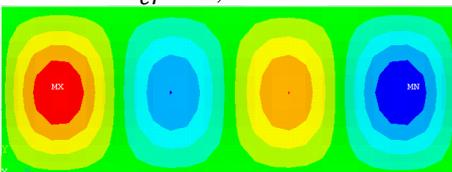
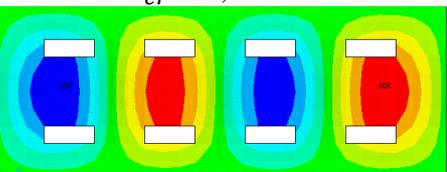
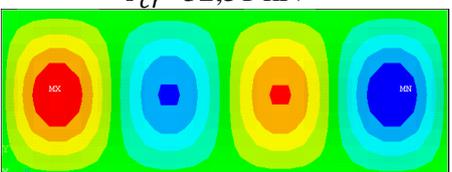
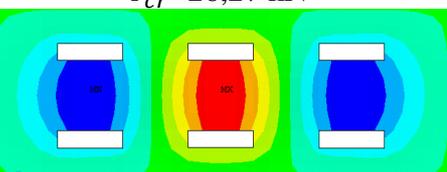
Os valores destacados são referentes aos números de furos adotados nas análises apresentadas no item 5.1.1. Observa-se na Tabela 5.6 que o número de furos não influencia

significativamente a alteração da resistência das colunas perfuradas e as dispersões entre os resultados obtidos pelo Método da Seção Efetiva Modificado e o Método dos Elementos Finitos permanecem bem próximos, independente dos números das perfurações.

### 5.2.2 Análise do modo localizado

De acordo com Souza (2013), uma outra consideração que deve ser feita é a ocorrência do Modo Localizado de Placa (MLP), nas regiões entre os furos das colunas perfuradas. Foram realizadas várias análises de estabilidade, nas seções perfuradas e não perfuradas, comparando-se as meias-ondas desenvolvidas na alma do perfil rack e seus deslocamentos. A Tabela 5.6 apresenta graficamente o desenvolvimento do modo localizado de placas para colunas de  $b_w=150\text{mm}$  e  $t=1,2\text{mm}$ .

**Tabela 5.6. Representação gráfica do Modo Localizado de placa ( $b_w=150\text{mm}$ ,  $t=1,2\text{mm}$ ).**

$t$ (mm)	$\frac{h_f}{b_w}$ (%)	SF	CF
10			
		$P_{cr}=32,07 \text{ kN}$	$P_{cr}=29,29 \text{ kN}$
20			
		$P_{cr}=32,56 \text{ kN}$	$P_{cr}=28,28 \text{ kN}$
1,2	30		
		$P_{cr}=32,51 \text{ kN}$	$P_{cr}=26,27 \text{ kN}$
40			
		$P_{cr}=32,19 \text{ kN}$	$P_{cr}=24,83 \text{ kN}$

$t$  – espessura da chapa.  
 $\frac{h_f}{b_w}$  – relação entre a altura do furo e largura da alma.  
 SF – coluna não perfurada.  
 CF – coluna perfurada.

Comparando o desenvolvimento do modo local, na figura anterior, observa-se que para alturas ( $b_f = 30\%$  e  $40\%$  de  $b_w$ ) onde acontece o ganho de resistência, há mudanças significativas no modo de flambagem apresentado:

- As cristas e vales das meias-ondas são maiores nos protótipos perfurados;
- Nas colunas perfuradas, onde há ganho de resistência devido a inserção das perfurações, o Modo Localizado de Placas é dominante ( $b_f = 30\%$  e  $40\%$  de  $b_w$ ).

A Tabela 5.7 representa graficamente o desenvolvimento do modo localizado de placas no perfil  $b_w = 200$  mm, essa seção apresenta pequenas variações quanto a comparação entre o Método dos Elementos Finitos e o Método da Seção Efetiva Modificado.

**Tabela 5.7. Representação gráfica do Modo Localizado de placa  $b_w=200$ mm,  $t=1,2$ mm.**

$t$ mm	$\frac{h_f}{b_w}$ %	SF	CF
1,2	10	 $P_{cr}=23,71$ kN	 $P_{cr}=21,30$ kN
	20	 $P_{cr}=23,85$ kN	 $P_{cr}=20,52$ kN
	30	 $P_{cr}=23,72$ kN	 $P_{cr}=19,13$ kN
	40	 $P_{cr}=23,53$ kN	 $P_{cr}=18,28$ kN

$t$  – Espessura da chapa.  
 $\frac{h_f}{b_w}$  – Relação entre a altura do furo e largura da alma  
**SF** – Coluna não perfurada.  
**CF** – Coluna perfurada.

O Modo Localizado de Placa ocorre em seções com perfurações iguais a 30% e 40% de  $b_w$ , e influencia na resistência das colunas. Elevada esbelteza de placa minimiza a influência do Modo Localizado associado à resistência das colunas, conforme observado para o perfil  $b_w = 200\text{mm}$  e  $t = 1,2\text{ mm}$ . No apêndice B estão representados graficamente os modos desenvolvidos em todas as 36 seções analisadas.

### 5.2.3 Verificação da área modificada adequada

Observa-se que no item 5.1 para colunas com perfurações de comprimentos iguais a 10% e 20% da largura da alma a área mínima utilizada no Método da Seção Efetiva Modificado, apresenta resultados bem próximos ao Método dos Elementos Finitos. Para colunas com perfurações de altura 30% e 40% de  $b_w$  os resultados sofrem dispersões.

A área mínima não é adequada na maioria dos casos analisados. A seguir tem-se as equações que consideram a área bruta e área mínima ao longo da altura da coluna, a influência da altura dos furos e a distância entre os furos. São propostas três equações para a avaliação da área líquida efetiva.

$$(A) \quad A_{mod} = A_g - \xi A_f$$

$$(B) \quad A_{mod} = A_g - (1 - \varphi) A_f$$

$$(C) \quad A_{mod} = A_g - (10,5\delta)^{\frac{h_f}{b_w}} A_f$$

Sendo:

$A_{mod}$  – área utilizada no Método da Seção Efetiva Modificado;

$A_g$  – área bruta;

$A_f$  – área dos furos;

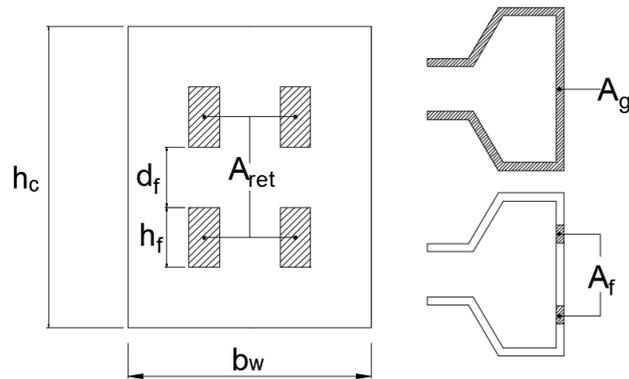
$\xi$  – relação entre as alturas do furo e da coluna;

$\varphi$  – relação entre a altura do furo e distância entre os furos ao longo da altura  $\frac{h_f}{d_f}$ ;

$\delta$  – relação entre as áreas retiradas ( $A_{ret}$ ) para inserção dos furos e área da alma ( $b_w \cdot h_c$ );

$\frac{h_f}{b_w}$  – relação entre a altura dos furos e largura da alma.

A Figura 5.1 representa as variáveis das equações A, B e C.



**Figura 5.1. Representação gráfica das variáveis das equações A, B e C.**

A Tabela 5.8 representa os valores das resistências obtidas utilizando as equações A, B e C, para a seção  $b_w=150\text{mm}$  e  $t = (1,2; 1,4 \text{ e } 1,6) \text{ mm}$ .

**Tabela 5.8. Comparação entre a resistência pelo M.E.F e as equações propostas.**

$b_w$ (mm)	$t$ (mm)	$\frac{h_f}{b_w}$	$P_{u,liq}$ M.E.F (kN)	Eq-A (kN)	Eq-B (kN)	Eq-C (kN)	$\frac{P_{u,liq}}{Eq - A}$	$\frac{P_{u,liq}}{Eq - B}$	$\frac{P_{u,liq}}{Eq - C}$
150	1,2	10	54,91	56,52	58,50	53,77	0,97	0,94	1,02
		20	56,49	56,66	58,23	56,54	1,00	0,97	1,00
		30	65,26	55,61	56,79	56,96	1,17	1,15	1,15
		40	63,10	54,56	55,40	56,23	1,16	1,14	1,12
	1,4	10	71,56	73,74	76,32	70,17	0,97	0,94	1,02
		20	72,08	73,96	76,01	73,81	0,97	0,95	0,98
		30	82,47	72,60	74,13	74,36	1,14	1,11	1,11
		40	77,93	71,20	72,30	73,39	1,09	1,08	1,06
	1,6	10	88,85	92,73	95,97	88,24	0,96	0,93	1,01
		20	89,76	93,01	95,58	92,83	0,97	0,94	0,97
		30	100,65	91,33	93,26	93,56	1,10	1,08	1,08
		40	92,38	89,31	90,69	92,06	1,03	1,02	1,00

**Eq-(A, B e C)** – valores obtidos utilizando o Método da Seção Efetiva Modificado.

$b_w$  – largura da alma.

$t$  – espessura da chapa.

$\frac{h_f}{b_w}$  – relação entre a altura do furo e a largura da alma.

$P_{u,liq}$  – carga última seção perfurada (ANSYS,2011).

De acordo com a Tabela 5.8, a equação C é a mais adequada para determinação da resistência, comparando-se os resultados com o Método dos Elementos Finitos. As maiores dispersões acontecem devido ao Modo Localizado de Placa nas seções em que ele pode ocorrer.

A Tabela 5.9 representa os valores das resistência obtidas utilizando as equações A, B e C, para a seção  $b_w = 180\text{mm}$  e  $t = (1,2; 1,4 \text{ e } 1,6)\text{mm}$ .

**Tabela 5.9. Comparação entre a resistência pelo M.E.F as equações propostas**

$b_w$ (mm)	$t$ (mm)	$\frac{h_f}{b_w}$	$P_{u,liq}$ M.E.F (kN)	Eq-A (kN)	Eq-B (kN)	Eq-C (kN)	$\frac{P_{u,liq}}{Eq - A}$	$\frac{P_{u,liq}}{Eq - B}$	$\frac{P_{u,liq}}{Eq - C}$
180	1,2	10	52,84	54,09	56,20	51,16	0,98	0,94	1,03
		20	57,03	54,38	56,05	54,24	1,05	1,02	1,05
		30	60,51	53,46	54,72	54,90	1,13	1,11	1,10
		40	59,30	52,46	53,37	54,25	1,13	1,11	1,09
	1,4	10	68,34	70,67	73,42	66,85	0,97	0,93	1,02
		20	72,93	71,07	73,26	70,90	1,03	1,00	1,03
		30	75,14	69,89	71,53	71,77	1,08	1,05	1,05
		40	73,72	68,54	69,71	70,87	1,08	1,06	1,04
	1,6	10	85,39	88,98	92,44	84,18	0,96	0,92	1,01
		20	88,74	89,51	92,26	89,31	0,99	0,96	0,99
		30	91,26	88,43	90,51	90,82	1,03	1,01	1,00
		40	87,75	86,31	87,79	89,25	1,02	1,00	0,98

Eq-(A, B e C) – valores obtidos utilizando o Método da Seção Efetiva Modificado.

$b_w$  – largura da alma.

$t$  – espessura da chapa.

$\frac{h_f}{b_w}$  – relação entre a altura do furo e a largura da alma.

$P_{u,liq}$  – carga última seção perfurada (ANSYS, 2011).

Conforme verifica-se na Tabela 5.9, a equação C é a mais adequada para determinação da resistência, comparando com o Método dos Elementos Finitos.

A Tabela 5.10 representa os valores das resistências obtidas utilizando as equações A, B e C, para a seção  $b_w = 200\text{mm}$  e  $t = (1,2; 1,4 \text{ e } 1,6)$  mm.

**Tabela 5.10. Comparação entre a resistência pelo M.E.F e as equações propostas.**

$b_w$ (mm)	$t$ (mm)	$\frac{h_f}{b_w}$	$P_{u,liq}$ (kN)	Eq-A (kN)	Eq-B (kN)	Eq-C (kN)	$\frac{P_{u,liq}}{Eq - A}$	$\frac{P_{u,liq}}{Eq - B}$	$\frac{P_{u,liq}}{Eq - C}$
200	1,2	10	54,29	53,76	55,98	50,67	1,01	0,97	1,07
		20	55,89	53,61	55,35	53,46	1,04	1,01	1,05
		30	55,23	52,47	53,78	53,96	1,05	1,03	1,02
		40	54,03	51,78	52,72	53,64	1,04	1,02	1,01
	1,4	10	70,74	70,27	73,17	66,24	1,01	0,97	1,07
		20	70,52	70,97	73,28	70,79	0,99	0,96	1,00
		30	69,26	68,64	70,35	70,60	1,01	0,98	0,98
		40	66,98	67,69	68,92	70,13	0,99	0,97	0,96
	1,6	10	82,53	89,58	93,28	84,46	0,92	0,88	0,98
		20	83,83	90,29	93,23	90,07	0,93	0,90	0,93
		30	86,73	86,53	88,69	89,01	1,00	0,98	0,97
		40	83,08	85,25	86,80	88,33	0,97	0,96	0,94

**Tabela 5.10 (Continuação).**


---

**Eq-(A, B e C)** – valores obtidos utilizando o Método da Seção Efetiva Modificado.

**$b_w$**  – largura da alma.

**$t$**  – espessura da chapa.

**$\frac{h_f}{b_w}$**  – relação entre a altura do furo e a largura da alma.

**$P_{u-liq}$**  – carga última seção perfurada (ANSYS, 2011).

---

Observa-se que para essa seção, todas as equações apresentam resultados bem próximo ao valor obtido utilizando o Método dos Elementos Finitos, os melhores resultado são obtidos pela equação A. A elevada esbeltez da alma minimiza os efeitos do Modo localizado de placa

Conforme os resultados obtidos neste capítulo, conclui-se que as equações propostas são adequadas para aplicação no Método da Seção Efetiva Modificado. Essas equações apresentam melhores resultados em função da relação  $h_f / b_w$ , sendo recomendado:

- Para  $h_f / b_w = 10\%$  e  $20\%$  o uso das equações A ou C;
- Para  $h_f / b_w = 30\%$  o uso das equações B ou C;
- Para  $h_f / b_w = 40\%$  o uso da equação C.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de armazenagem industrial são, geralmente, constituídos por seções desenvolvidas com o intuito de facilitar a montagem. Uma característica destes perfis é a existência de perfurações, utilizadas para encaixar as ligações. Apesar do ganho de velocidade na montagem, estas perfurações alteram o comportamento dos perfis formados a frio, podendo potencializar a ocorrência de seus modos de instabilidade característicos.

Um destes modos de instabilidade é a flambagem local que, embora presente em todos os tipos de perfis em aço, é mais presente nos perfis formados a frio devido à elevada esbelteza das chapas que os constituem. E a existência das perfurações nestes elementos torna mais difícil a previsão da ocorrência deste fenômeno, demandando, na maioria das vezes, testes experimentais para esta previsão.

Neste trabalho, procurou-se avaliar a utilização de um processo normativo, o Método da Seção Efetiva, para a avaliação do comportamento e da resistência de perfis rack sujeitos à flambagem local. Os estudos foram conduzidos utilizando-se o Método dos Elementos Finitos, por meio do software (ANSYS, 2011), para esta avaliação.

A partir de uma série de seções sujeitas unicamente à ocorrência de flambagem local, variando-se a espessura da chapa e a largura da alma, foram comparados resultados obtidos a partir das prescrições normativas com resultados numéricos obtidos via elementos finitos. A boa correlação entre os resultados indicou a validade do modelo numérico na previsão da resistência da coluna. Uma observação importante é que a inclinação do enrijecedor na seção não altera o comportamento no que se refere à flambagem local, ficando sua influência restrita à flambagem distorcional e global.

O modelo numérico, uma vez validado, foi utilizado para simular colunas com perfurações. A partir de seus resultados, foi determinado coeficiente de flambagem local, considerando o efeito das perfurações ( $k_{1,liq}$ ). Este coeficiente foi ajustado através de uma equação polinomial em função da relação entre o comprimento do furo e a largura da alma ( $h_f/b_w$ ) e, para a faixa de esbelteza considerada na análise, demonstrou resultados promissores.

O procedimento validado foi utilizado para a análise de diversas seções com perfurações. Apesar de serem observadas boas correlações para as colunas com menores perfurações ( $h_f=10\%$  e  $20\%$  de  $b_w$ ), para as colunas em que se consideraram as maiores perfurações ( $h_f=30\%$  e  $40\%$  de  $b_w$ ) observaram-se maiores dispersões.

Foram realizadas simulações com o objetivo de explicar estas dispersões, e foi observado, nas colunas em que elas ocorriam, a existência do Modo Localizado de Placa

(SOUZA, 2013), fenômeno em que os deslocamentos da alma, decorrentes do modo local, concentram-se nas regiões entre as perfurações, evidenciando sua influência na força axial resistente à compressão da coluna.

Com o objetivo de considerar a influência do comprimento do furo na resistência da coluna foram, então, testadas três equações para a determinação da área utilizada no Método da Seção Efetiva Modificado ( $A_{mod}$ ) que considera a área bruta e área mínima ao longo da altura da coluna, a influência da altura dos furos e a distância entre os furos. As três equações levam a boa correlação entre os resultados numéricos, via (ANSYS, 2011), a utilização de cada equação é condicionada de acordo com a relação  $h_f / b_w$ .

Para sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Avaliação de outras seções do tipo rack com o objetivo de ampliar a faixa de esbeltes considerada;
- Avaliação do comportamento de outras seções previstas na norma com a inserção das perfurações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Águia. <<http://www.aguiasistemas.com.br/>> Disponível em (2017).
- ABNT. **NBR 14762:2010 . Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio.**
- Almeida, P. H. F. **Estudo numérico de um dispositivo de transferências de cargas em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto.** Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 70-71, (2012).
- ANSYS. **User's Manual for revision 14.** Swanson Analysis Systems Inc. Inc., Houston, PA, 2011.
- Batista, E., M. **Local–global buckling interaction procedures for the design of cold-formed columns: Effective width and direct method integrated approach.** Thin-walled structures 47 (2009) 1218–1231.
- Batista, E., M., Freitas, A., M., S., Pimenta, R., J., Fakury, R.,H., Requena, J., A., V., Araújo, A., H., M. **Resistência de barras comprimidas de aço: curvas de flambagem para perfis laminados a quente e soldados, formados a frio e tubulares.** CONSTRUMETAL, 2010, São Paulo.
- Bebiano R., Pina P., Silvestre N. and Camotim D. (2008). **GBTUL – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members**, DECivil/IST, Technical University of Lisbon (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>).
- Bertolini. < <http://www.bertoliniarmazenagem.com.br/>> Disponível em (2017).
- Braga, D. C., Campello, E. M. B.. **Avaliação de métodos numéricos de análise linear de estabilidade para perfis de aço formados a frio.** In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 5., 2014, São Paulo. Anais... . São Paulo: Abcem, 2014. v. 4, p. 1 . 19.
- Cai, J., Moen, C., D. **Elastic buckling analysis of thin-walled structural members with rectangular holes using generalized beam theory.** Thin-walled structures 107 (2016) 274–286.
- Carvalho, P. C., GRIGOLETTI, G., BARBOSA, D. B., **Curso Básico de Perfis Formado a Frio.**3.ed..Porto Alegre ,2014. 370p.
- Faria, V. O. **Análise e dimensionamento de elementos estruturais em perfis formados a frio com perfurações – Sistemas “racks”.** Monografia de conclusão de curso. UFOP-PROPEC, 2013.

- Faria, V. O. **Análise da estabilidade de perfis formados a frio com perfurações**. Dissertação de Mestrado,. UFOP-PROPEC, 2016.
- Ling, J.,Y., Kong, S.,L., De'nam, F. **Numerical study of buckling of cold-formed C-channel steel purlin with perforation**. Procedia Engineering 125 (2015) 1135-1141.
- Madenci, E.; GUVEN, I.,The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®. Ed. Springer, 2006.
- Mecalux.<<https://www.mecalux.cn/pallet-racks/drive-in-pallet-racking>>disponível em (2017).
- Millenniumracks. <<http://millenniumracks.com/>>disponível em (2017).
- Neiva, L. H. A. **Análise da influência da variação de perfurações no comportamento e capacidade de carga de perfis formados a frio de seção tipo rack**. Dissertação de Mestrado,. UFOP-PROPEC, 2017.
- Pham, c., h. **Shear buckling of plates and thin-walled channel sections with holes** Journal of Constructional Steel Research 128 (2017) 800–811
- Sales, A. E. C. A(2017). **Análise da aplicação do Método da Resistência Direta a perfis formados a frio com perfurações submetidos à compressão**. Dissertação de Mestrado,. UFOP-MECOM, 2017.
- Sarmanho, A. M. C. **Estudo do Comportamento Pós-Crítico de Paredes Esbeltas de PerfisMetálicos**. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, (1991).
- Schafer, B., Pekoz, T. (1998). **Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions**. 14th International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures, St Louis, Missouri.
- Silva, G. G. **Análise Teórico-Experimental de Colunas Perfuradas**. Dissertação de Mestrado, UFOP, (2011).
- Silvestre, N.; Dinis, P.; Camotim, D.; Batista, E. M. **Dsm design of lipped channel columns undergoing local/distortional/global mode interaction**. In: stability and ductility of steel structures, 10., 2010, Rio de Janeiro: Sdss, 2010. p. 124 - 132.
- Smith, F., H., Moen, C., D. **Finitestripestasticbucklingsolutionsforthin-walledmetalcolumns with perforationpatterns**. Thin-walled structures 79 (2014) 187–201.

- Souza, F. T. **Análise teórico Experimental da estabilidade de colunas perfuradas em perfis de aço formados a frio de seções tipo rack**. Tese de Doutorado. UFOP-PROPEC, 2013.
- Szymczak, C., Kujawa, M. **Buckling of thin-walled columns accounting for initial geometrical imperfections**. International Journal of Non-Linear Mechanics 95 (2017) 1–9. Victoryrack. < [http://www.victoryrack.com/products\\_list.html](http://www.victoryrack.com/products_list.html)> Disponível em (2017).
- Von Karmam, T., Sechler, E. E., and Donnell, L. H. **The Strength of Thin Plates in Compression**. Transactions A.S.M.E. – Applied Mechanics, APM-54-5, 53-57, 1932
- Winter, G. **Theoretical Solutions and test Results**, Thinn-Walled structures. Preliminary Publications of the Eighth Congress, IABSE, 1968, p. 101-112.

## APÊNDICE

### A. Curvas de flambagem para seções perfuradas

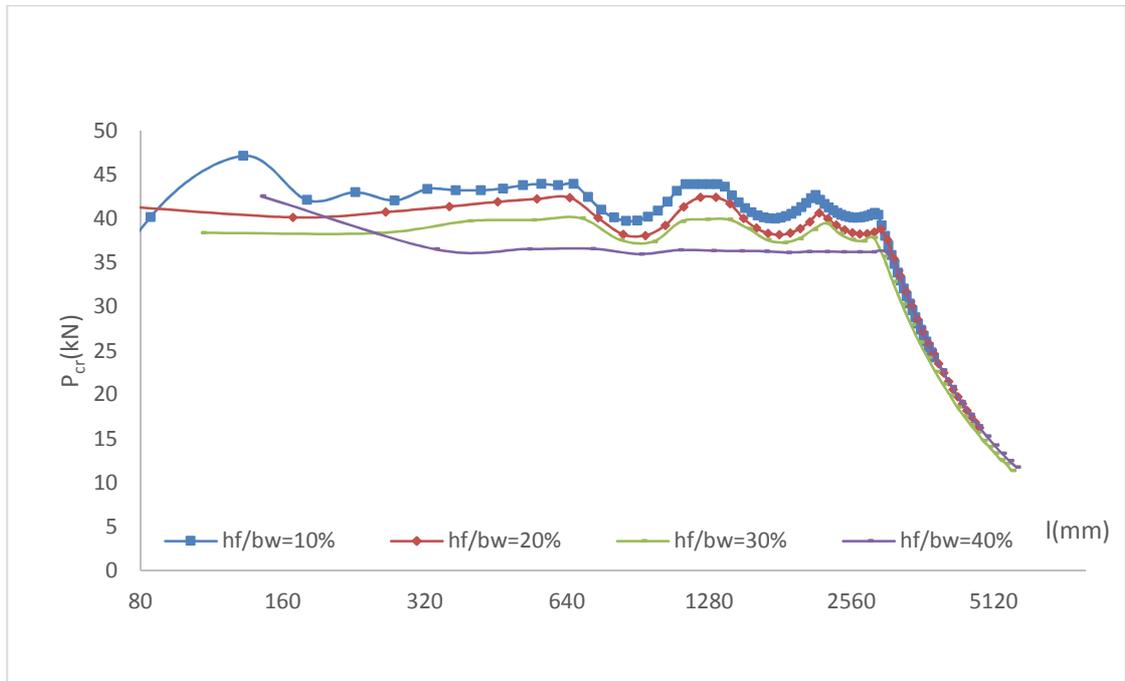


Figura A.1. Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 120\text{mm}$  e  $t = 1,2\text{mm}$

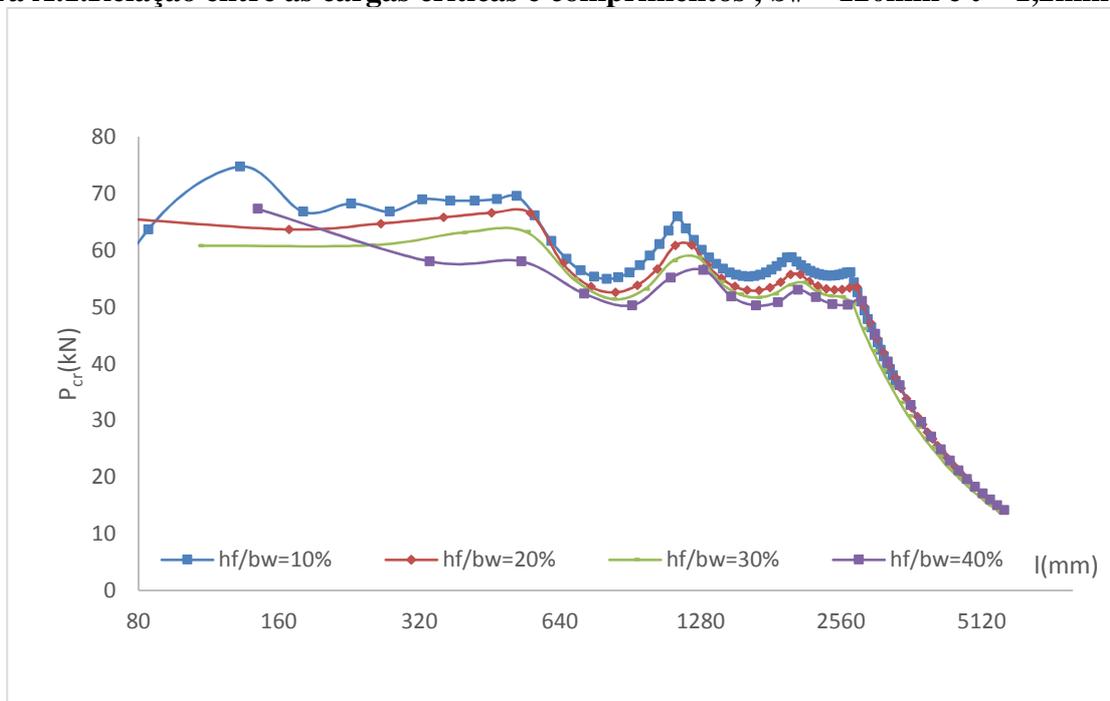
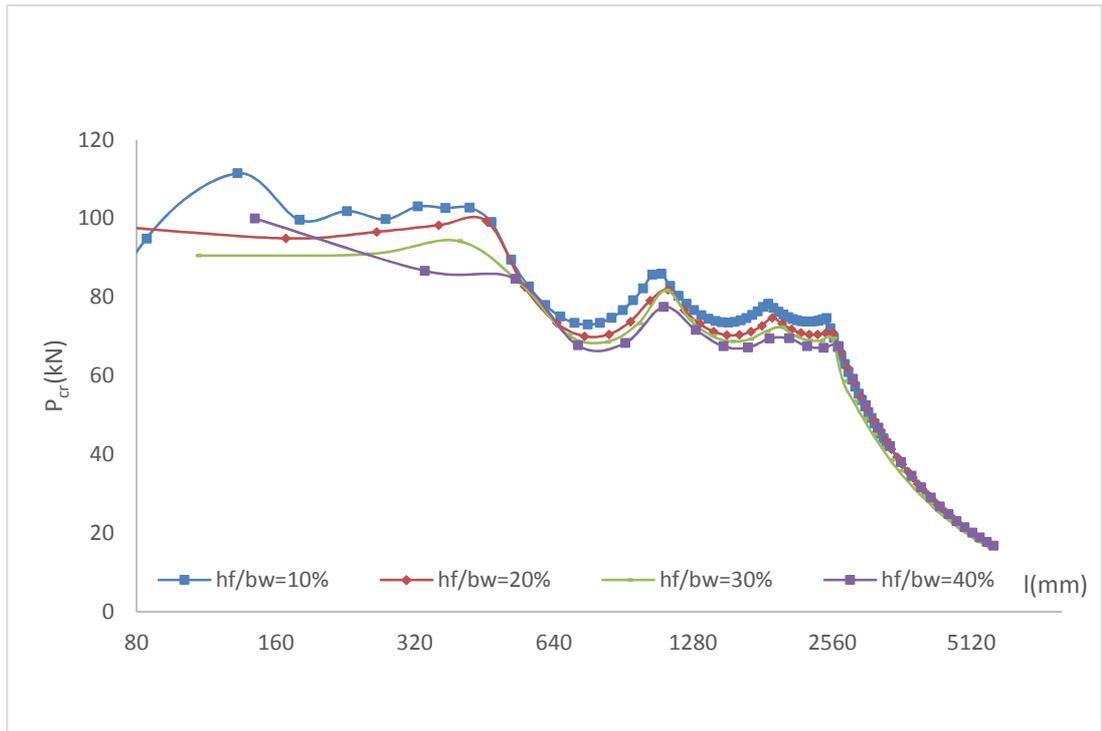
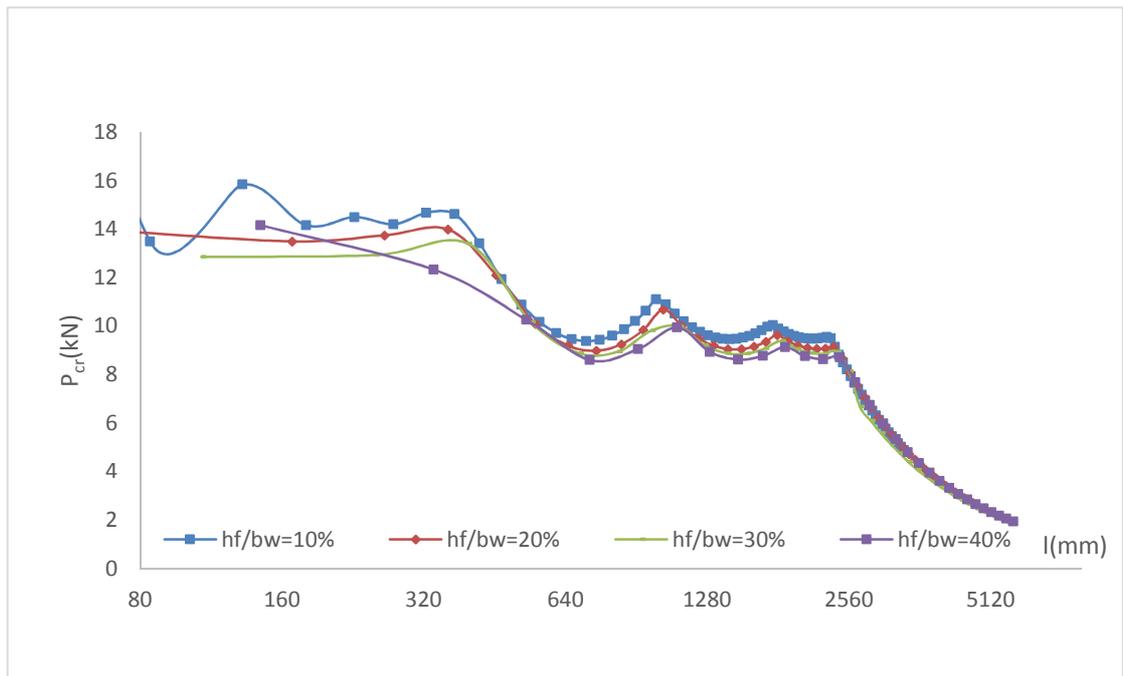


Figura A.2. Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 120\text{mm}$  e  $t = 1,4\text{mm}$



**Figura A.3. Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 120\text{mm}$  e  $t = 1,6\text{mm}$**



**Figura A.4. Relação entre as cargas críticas e comprimentos para  $b_w = 120\text{mm}$  e  $t = 1,8\text{mm}$**

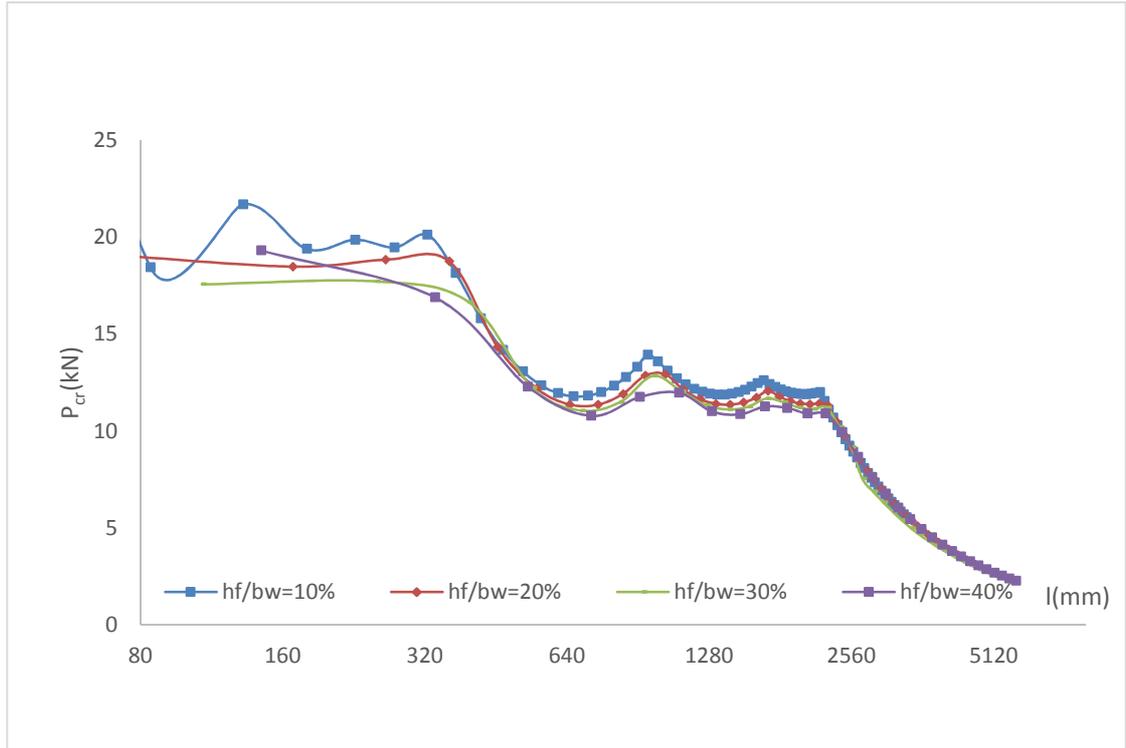


Figura A.5. Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 120\text{mm}$  e  $t = 2,0\text{mm}$

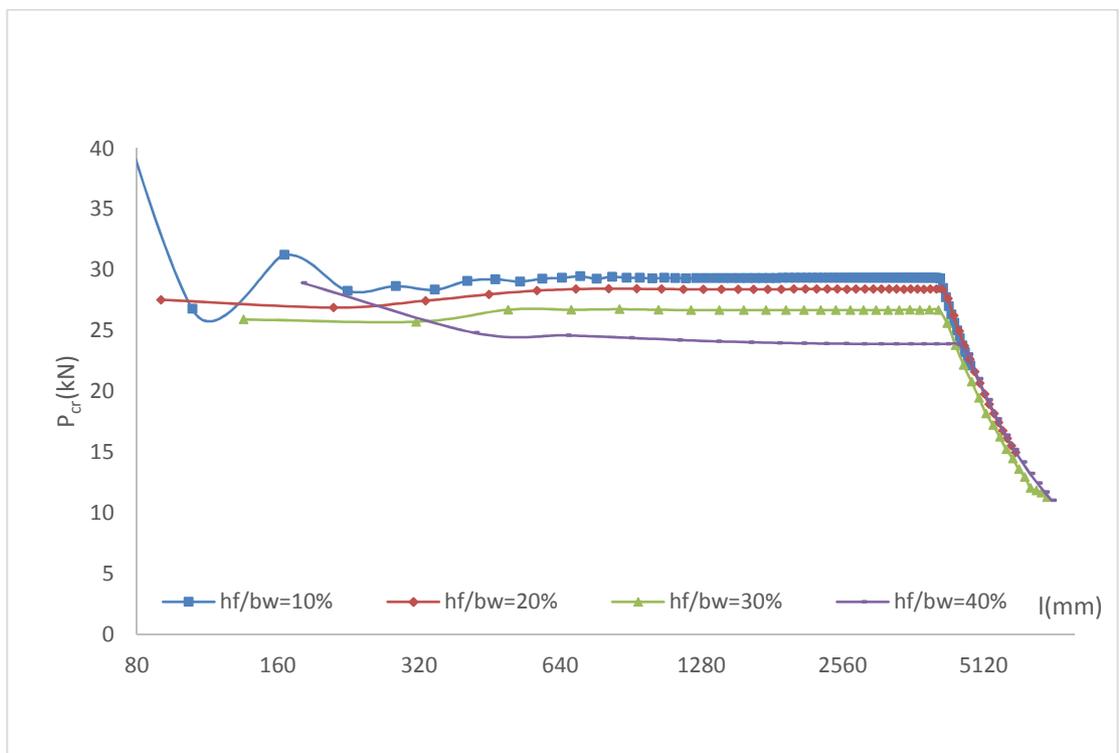
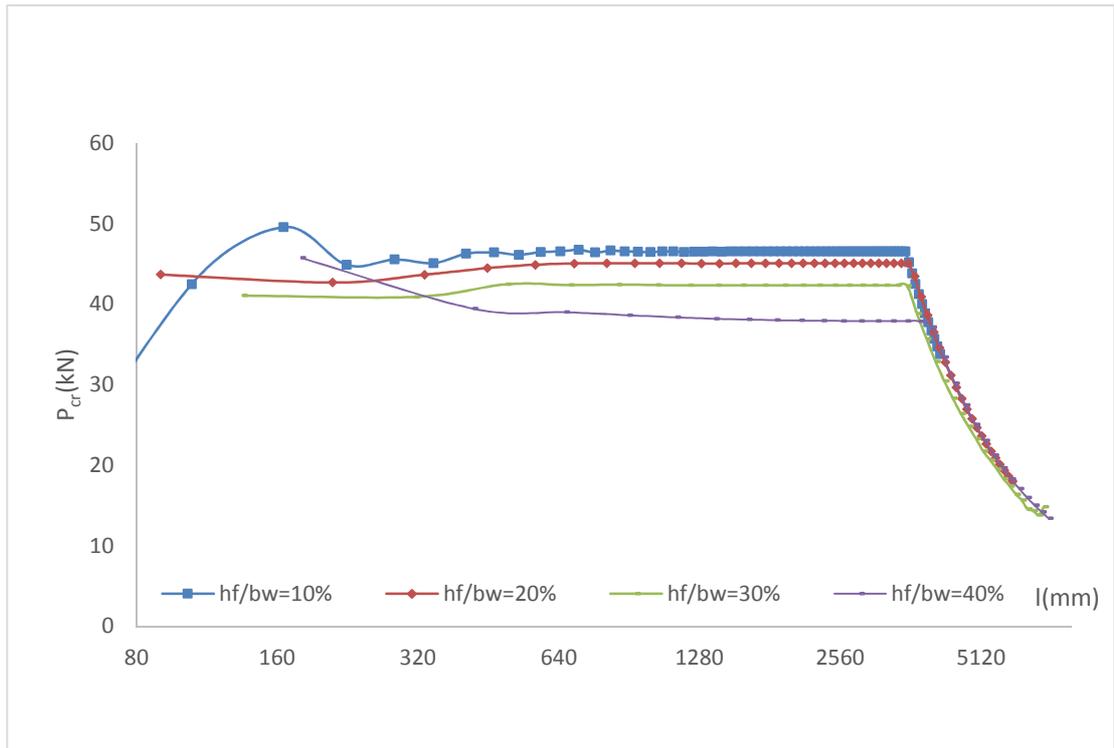
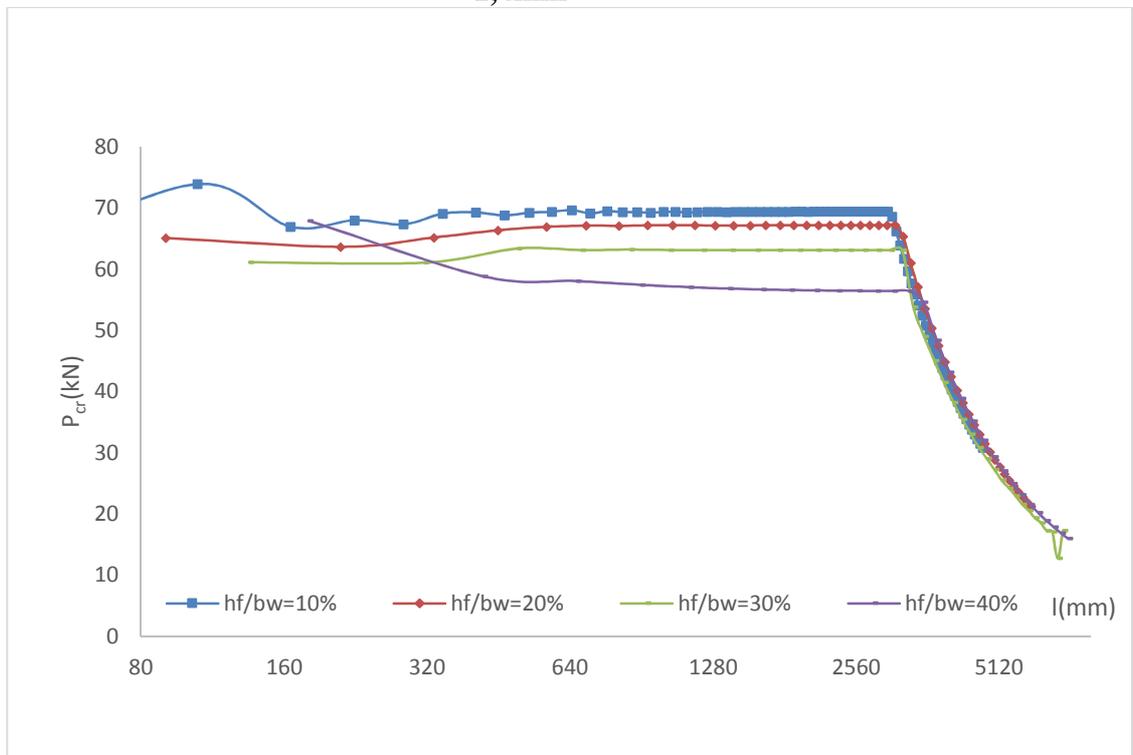


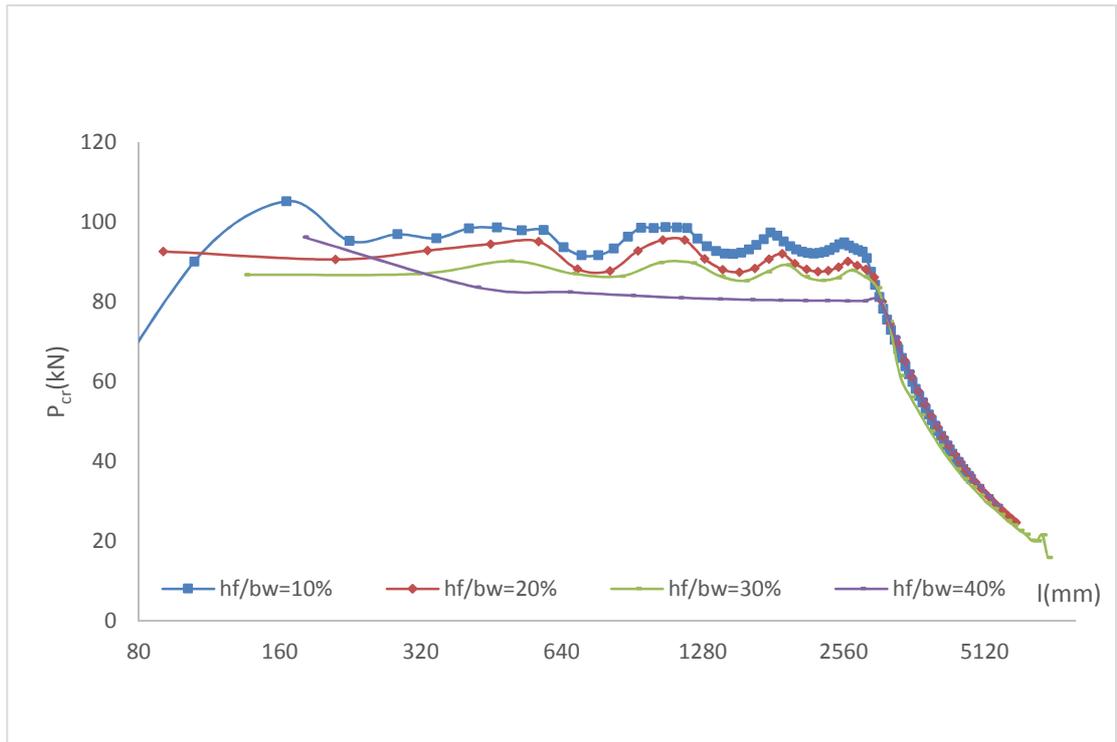
Figura A.6. Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 150\text{mm}$  e  $t = 1,2\text{mm}$



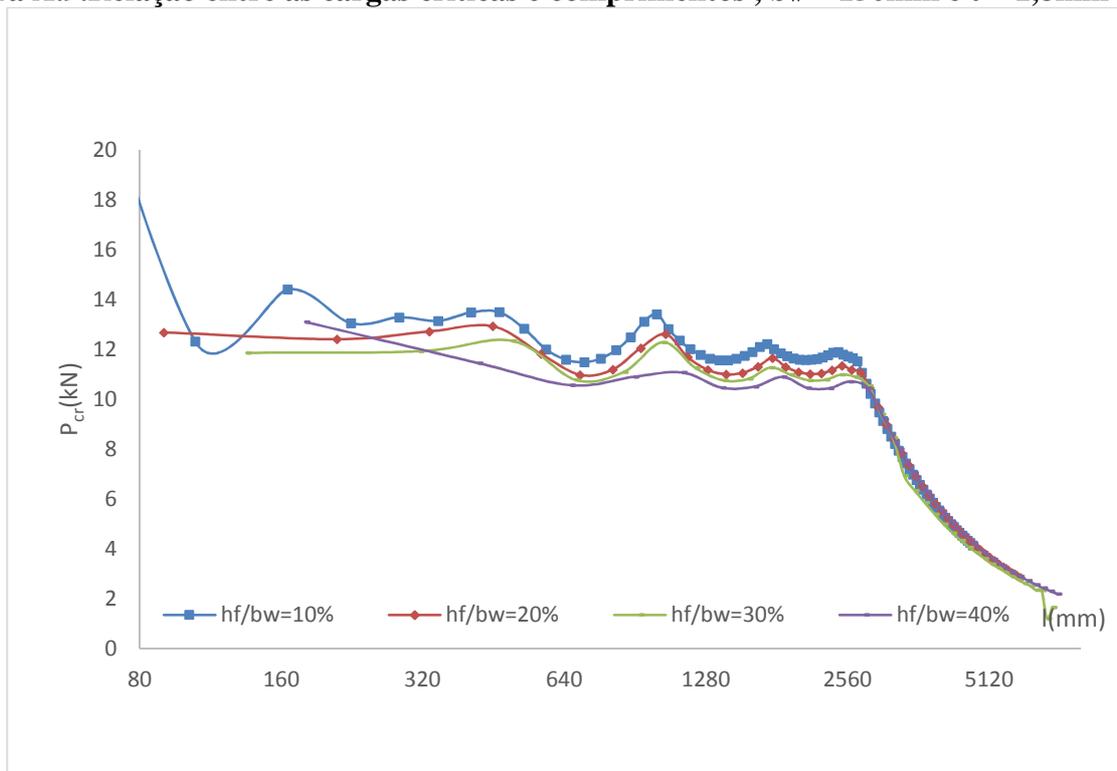
**Figura A.7.**Relação entre as cargas críticas e comprimentos para  $b_w = 150\text{mm}$  e  $t = 1,4\text{mm}$



**Figura A.8.**Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 150\text{mm}$  e  $t = 1,6\text{mm}$



**Figura A.9.**Relação entre as cargas críticas e comprimentos ,  $b_w = 150\text{mm}$  e  $t = 1,8\text{mm}$



**Figura A.10 .**Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 150\text{mm}$  e  $t = 2,0\text{mm}$

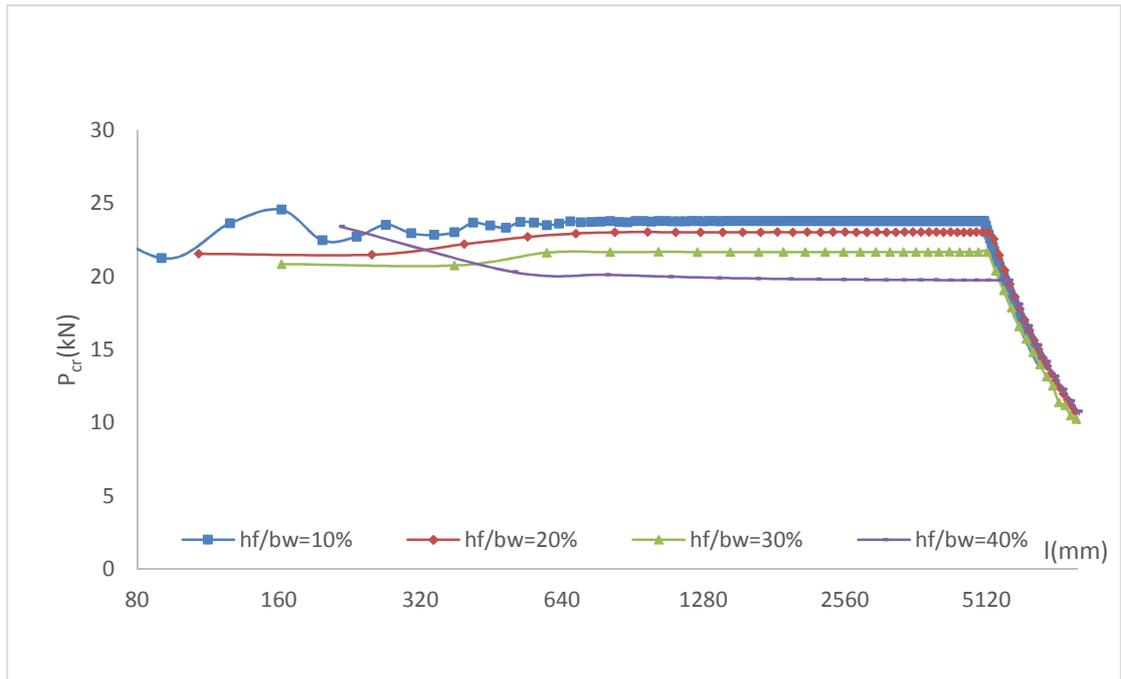


Figura A.11 .Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 180\text{mm}$  e  $t = 1,2\text{mm}$

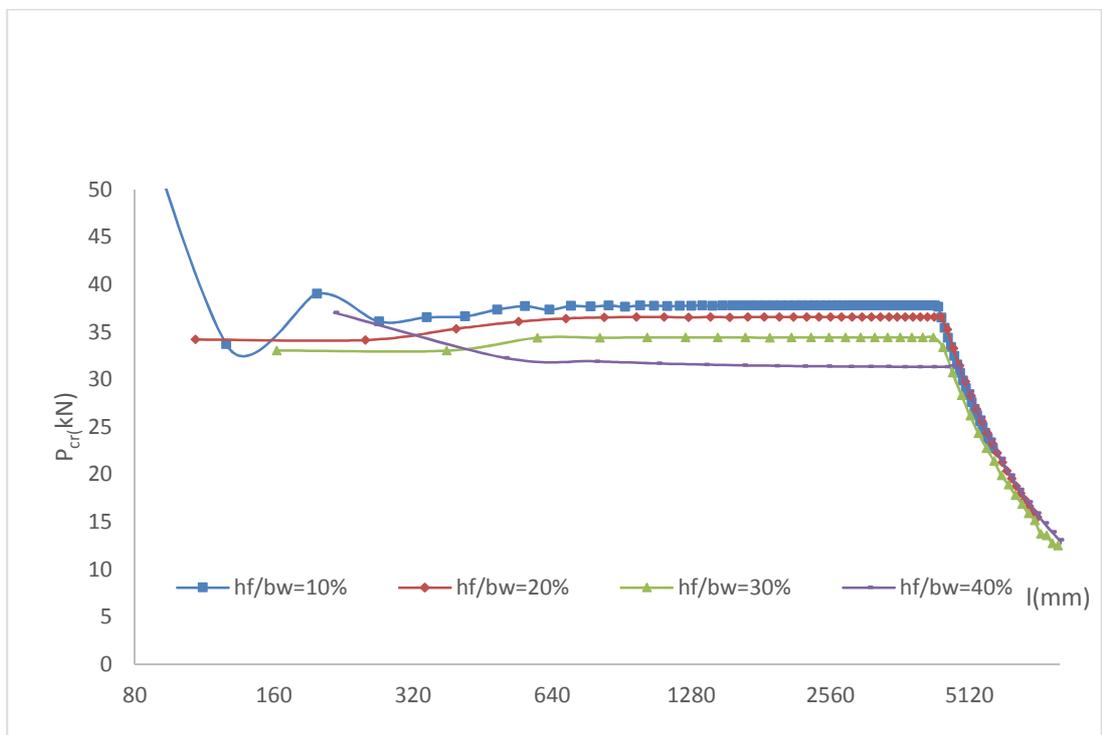
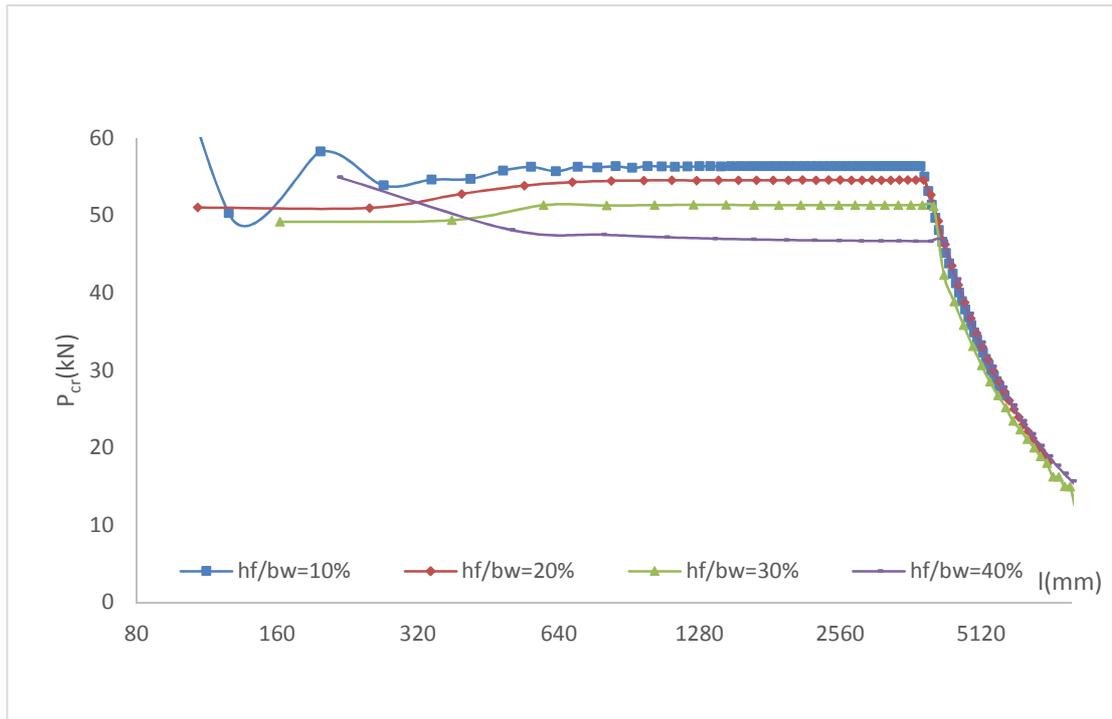
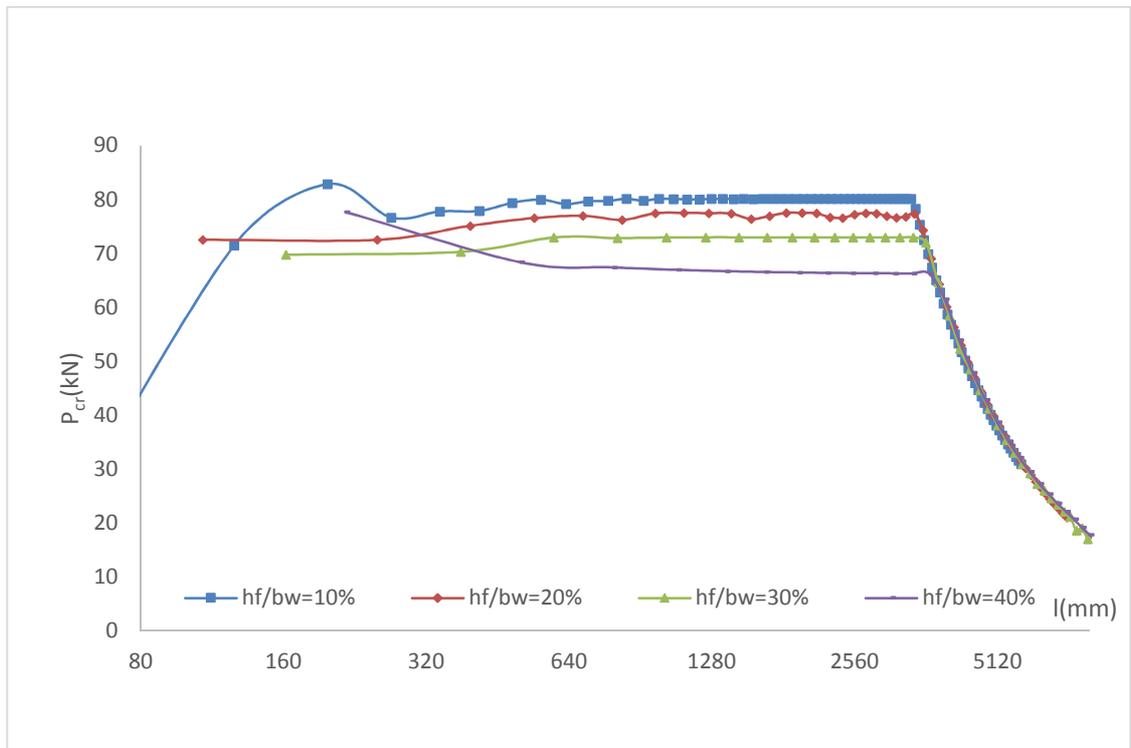


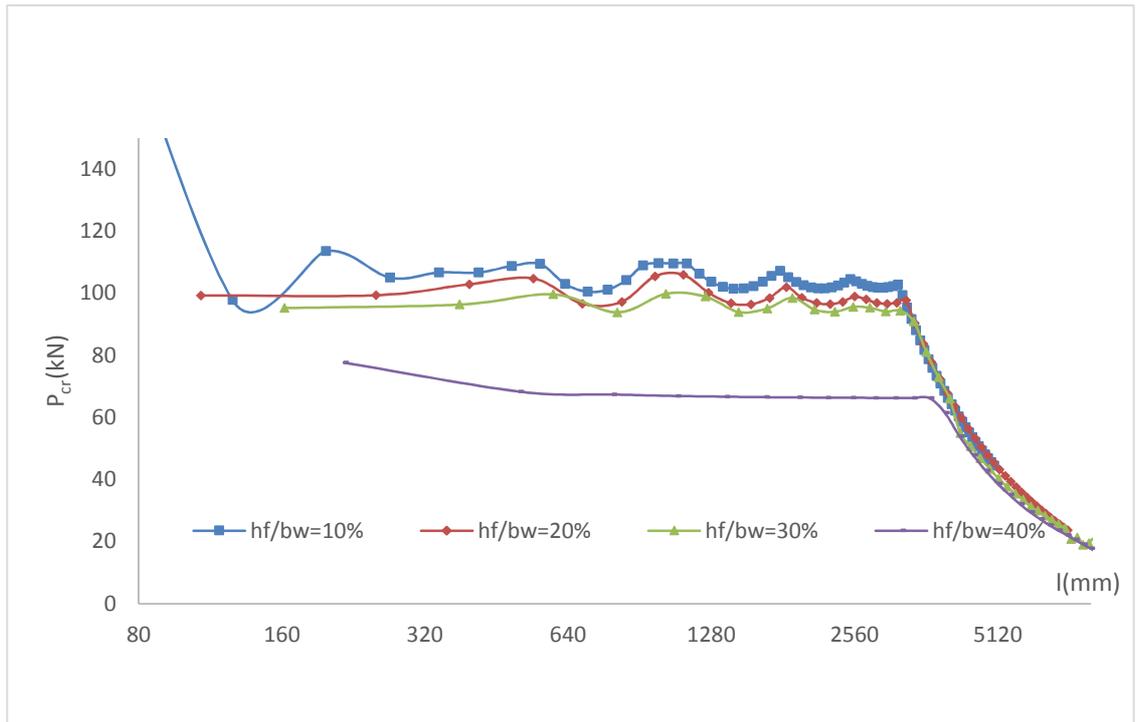
Figura A.12 .Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 180\text{mm}$  e  $t = 1,4\text{mm}$



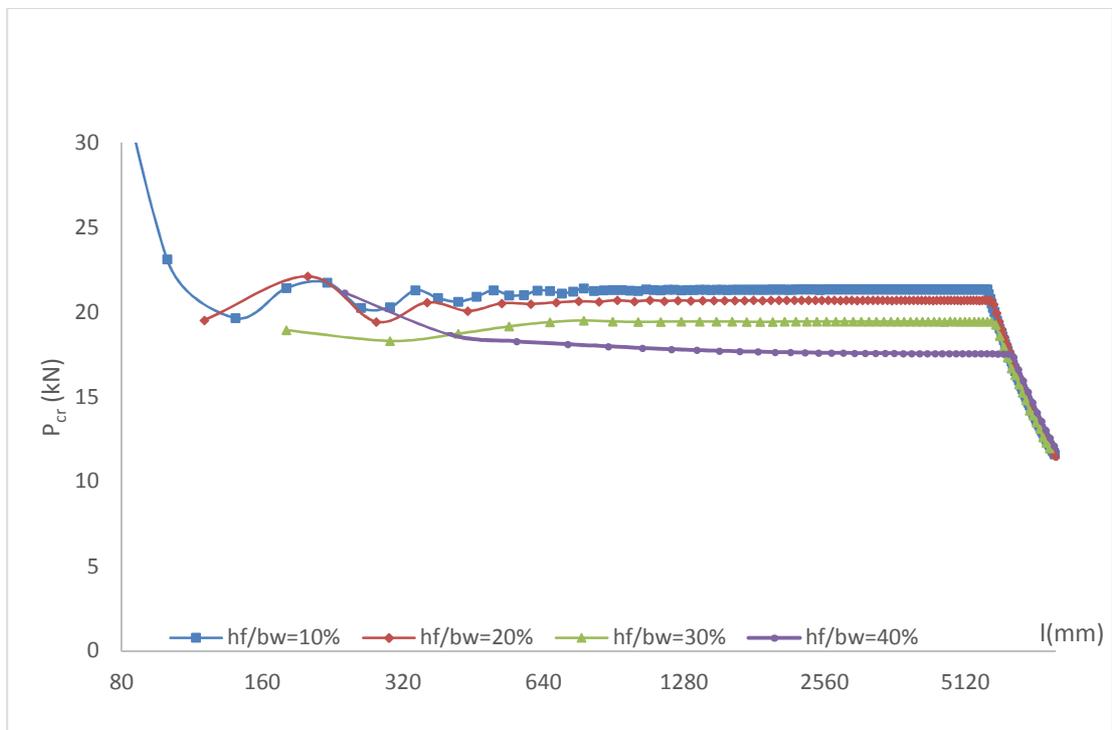
**Figura A.13 .Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 180\text{mm}$  e  $t = 1,6\text{mm}$**



**Figura A.14 .Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 180\text{mm}$  e  $t = 1,8\text{mm}$**



**Figura A.15 .Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 180\text{mm}$  e  $t = 2,0\text{mm}$**



**Figura A.16 .Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 200\text{mm}$  e  $t = 1,2\text{mm}$**

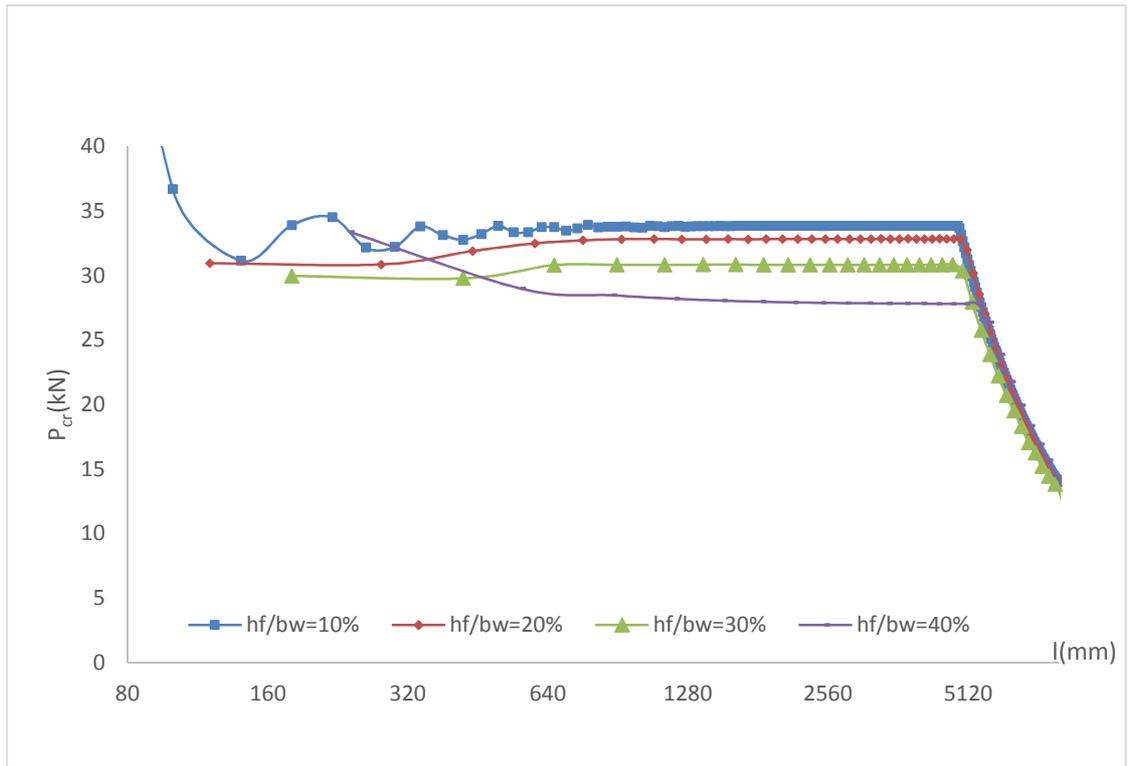


Figura A.17 .Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 200\text{mm}$  e  $t = 1,4\text{mm}$

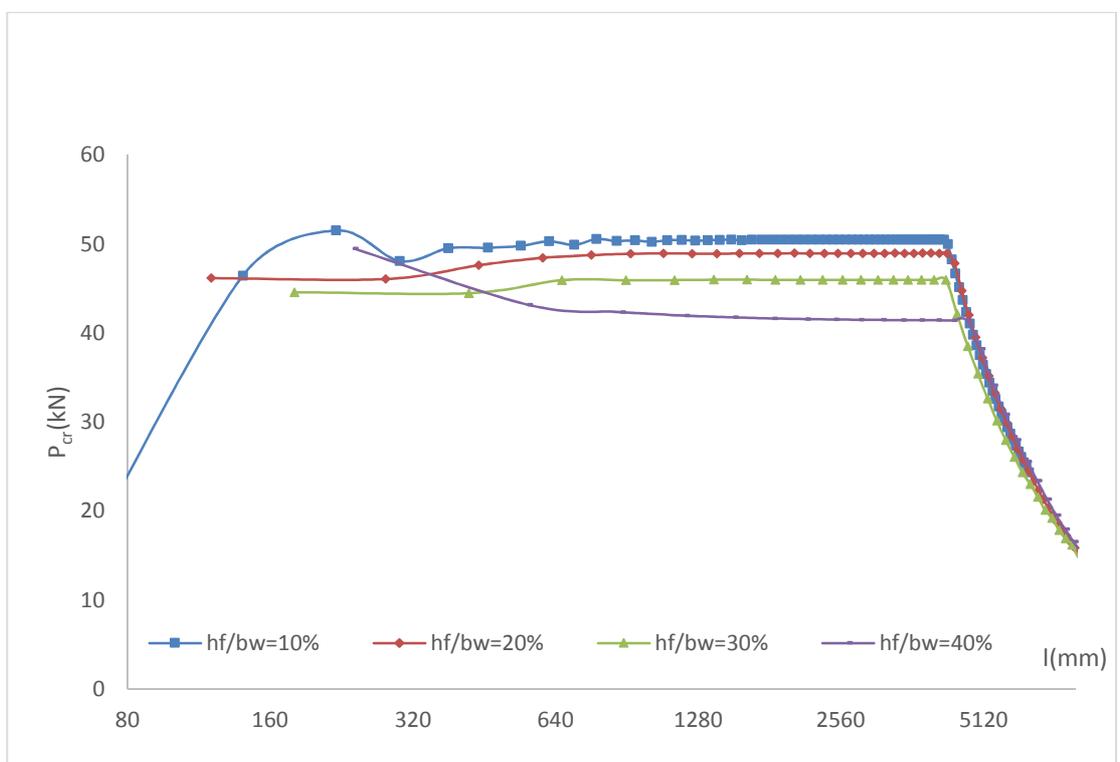
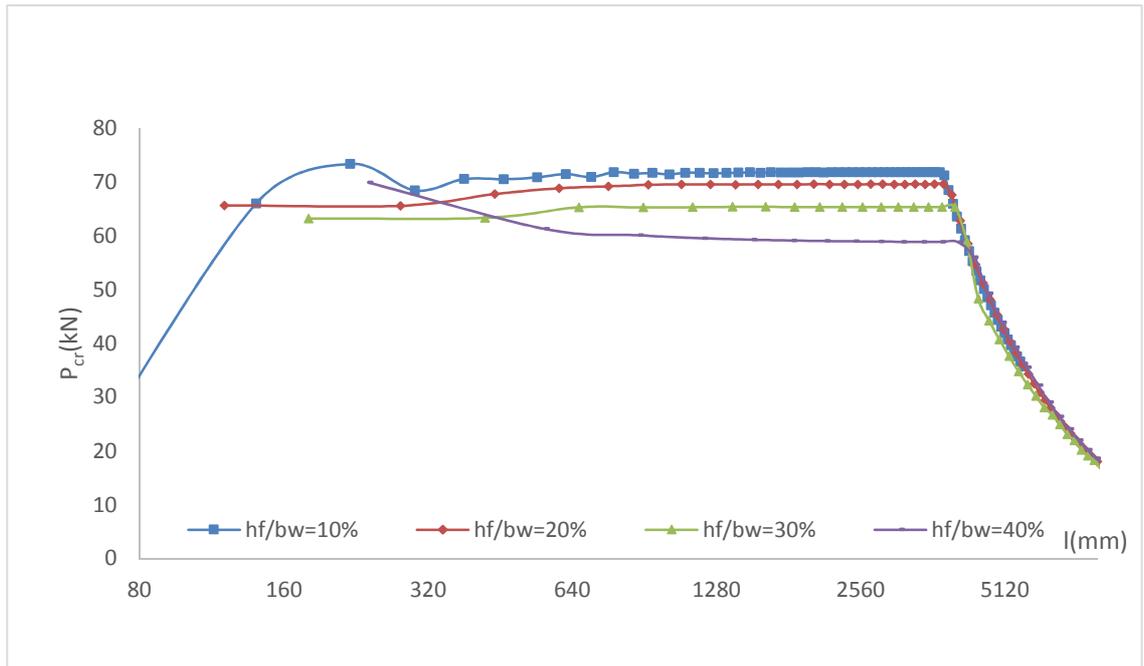
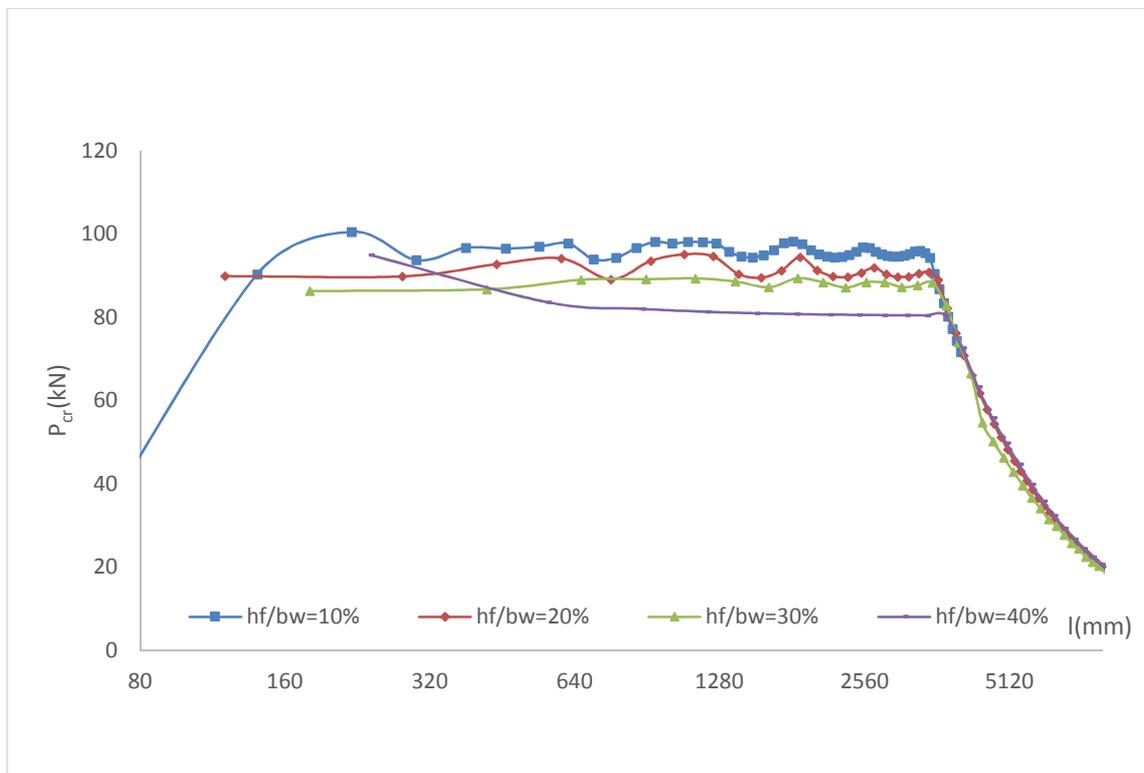


Figura A.18 .Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 200\text{mm}$  e  $t = 1,6\text{mm}$



**Figura A.19 .Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 200\text{mm}$  e  $t = 1,8\text{mm}$**

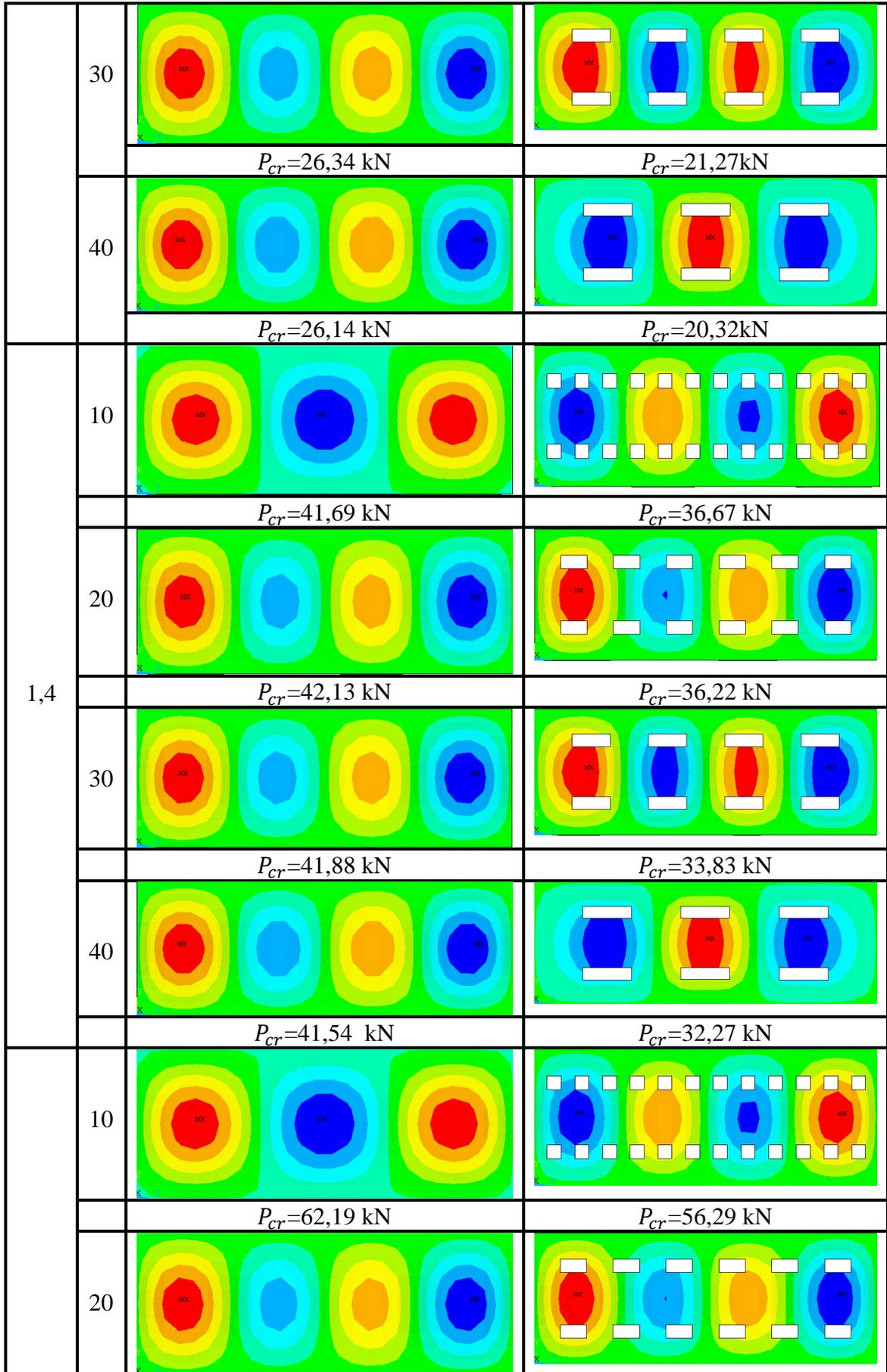


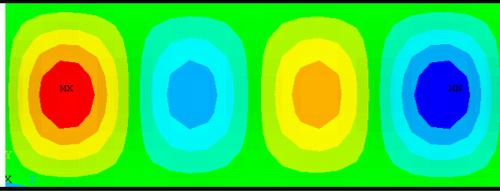
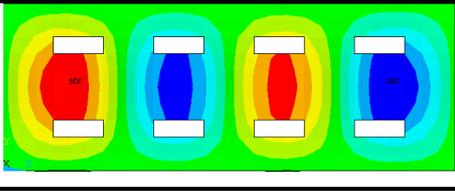
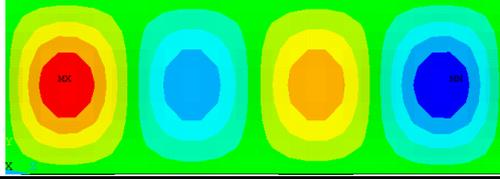
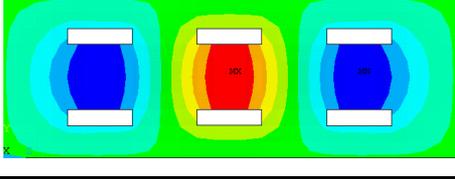
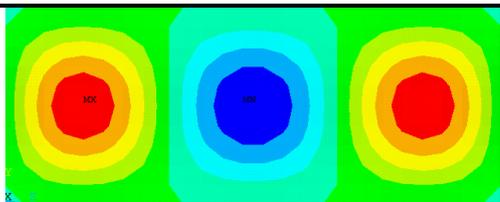
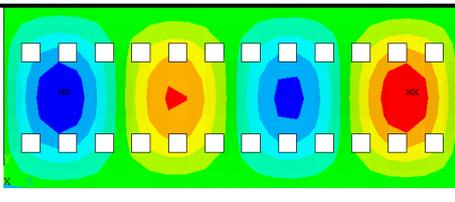
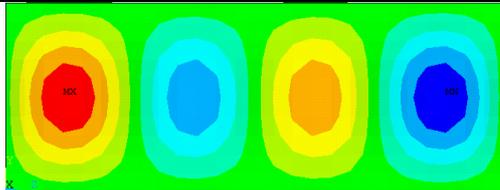
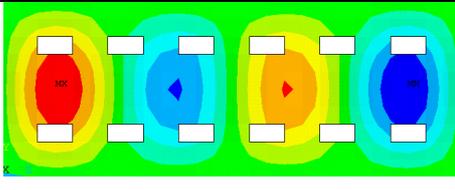
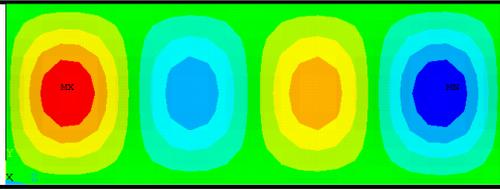
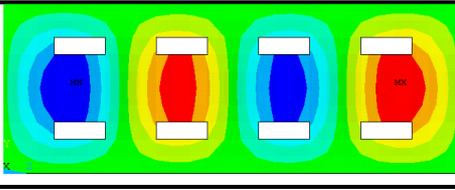
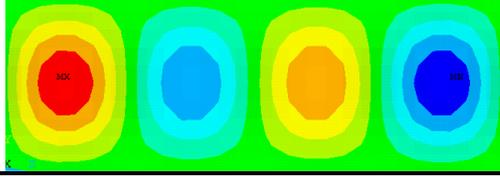
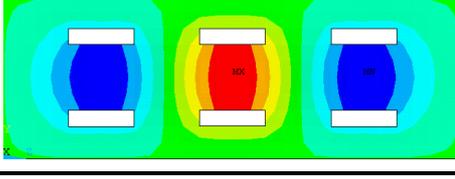
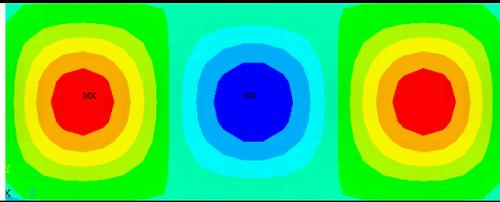
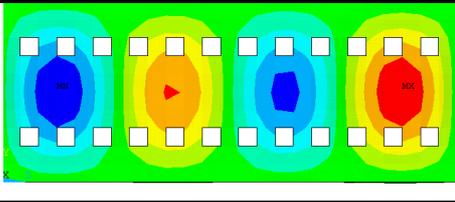
**Figura A.20 .Relação entre as cargas críticas e comprimentos,  $b_w = 200\text{mm}$  e  $t = 2,0\text{mm}$**

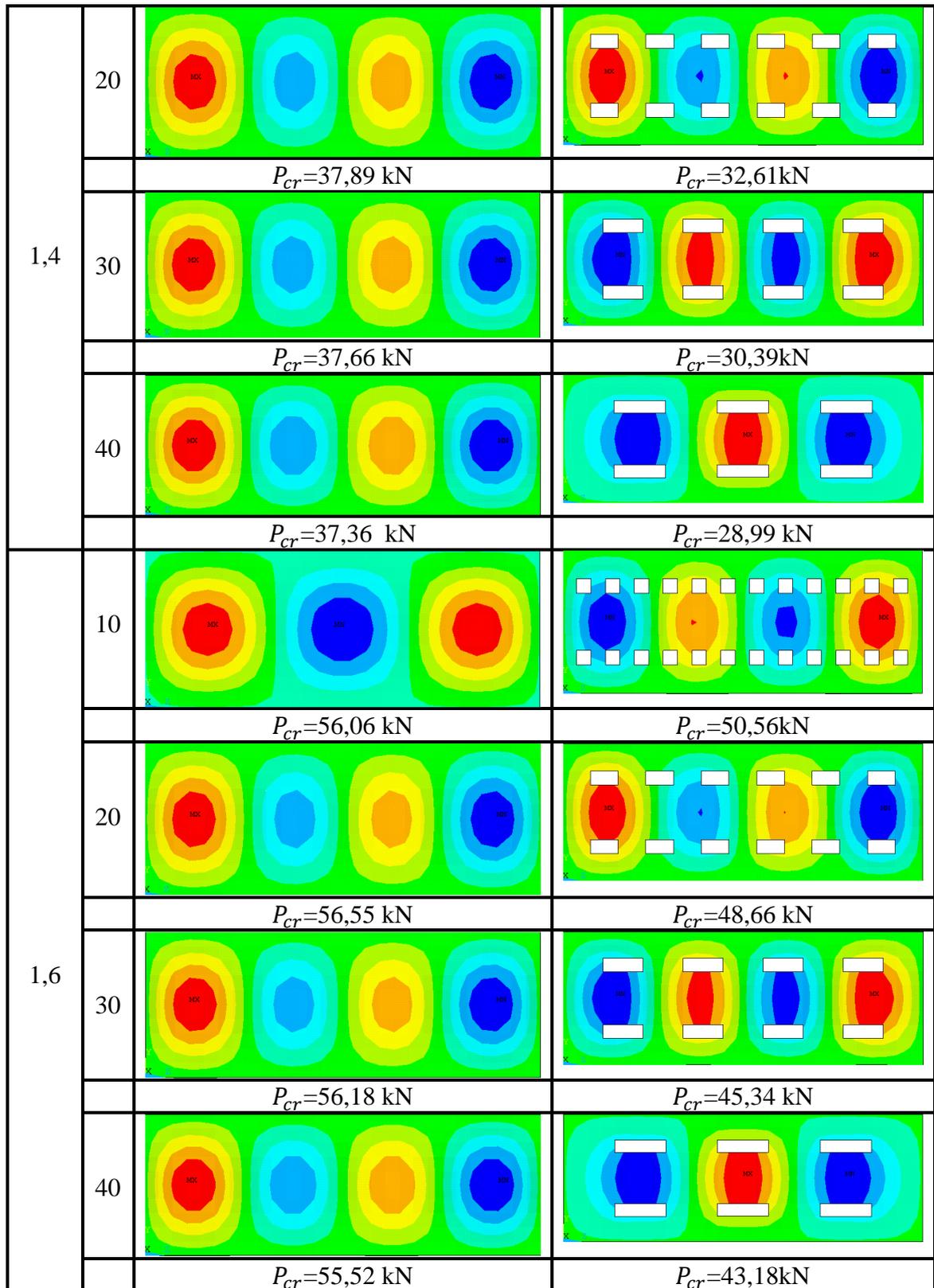
## B. Representação gráfica do Modo Localizado de Placas

		150-50-30-25mm			
e mm	$\frac{h_f}{b_w}$ %	SF		CF	
1,2	10				
		$P_{cr}=32,07$ kN		$P_{cr}=29,29$ kN	
	20				
		$P_{cr}=32,56$ kN		$P_{cr}=28,28$ kN	
1,4	30				
		$P_{cr}=32,51$ kN		$P_{cr}=26,27$ kN	
	40				
		$P_{cr}=32,19$ kN		$P_{cr}=24,83$ kN	
1,4	10				
		$P_{cr}=50,96$ kN		$P_{cr}=46,56$ kN	
	20				
		$P_{cr}=51,72$ kN		$P_{cr}=44,97$ kN	
1,4	30				
		$P_{cr}=51,68$ kN		$P_{cr}=41,78$ kN	

	40		
		$P_{cr}=51,16 \text{ kN}$	$P_{cr}=39,44 \text{ kN}$
1,6	10		
		$P_{cr}=75,06 \text{ kN}$	$P_{cr}=69,48 \text{ kN}$
	20		
		$P_{cr}=77,15 \text{ kN}$	$P_{cr}=67,16 \text{ kN}$
	30		
		$P_{cr}=75,18 \text{ kN}$	$P_{cr}=62,40 \text{ kN}$
	40		
		$P_{cr}=76,38 \text{ kN}$	$P_{cr}=58,84 \text{ kN}$
180-50-30-25			
e mm	$\frac{h_f}{b_w}$ %	SF	CF
1,2	10		
		$P_{cr}=26,24 \text{ kN}$	$P_{cr}=23,67 \text{ kN}$
	20		
		$P_{cr}=26,50 \text{ kN}$	$P_{cr}=22,78 \text{ kN}$



		$P_{cr}=62,93 \text{ kN}$		$P_{cr}=54,10 \text{ kN}$	
1,6	30				
		$P_{cr}=62,52 \text{ kN}$		$P_{cr}=50,51 \text{ kN}$	
	40				
		$P_{cr}=62,03 \text{ kN}$		$P_{cr}=48,12 \text{ kN}$	
2000-50-30-25					
e mm	$\frac{h_f}{b_w}$ %	SF		CF	
1,2	10				
		$P_{cr}=23,71 \text{ kN}$		$P_{cr}=21,30 \text{ kN}$	
	20				
		$P_{cr}=23,85 \text{ kN}$		$P_{cr}=20,52 \text{ kN}$	
	30				
	$P_{cr}=23,72 \text{ kN}$		$P_{cr}=19,13 \text{ kN}$		
40					
	$P_{cr}=23,53 \text{ kN}$		$P_{cr}=18,28 \text{ kN}$		
	10				
		$P_{cr}=37,63 \text{ kN}$		$P_{cr}=33,86 \text{ kN}$	



### C. Representação gráfica da variação de $k_l$ .

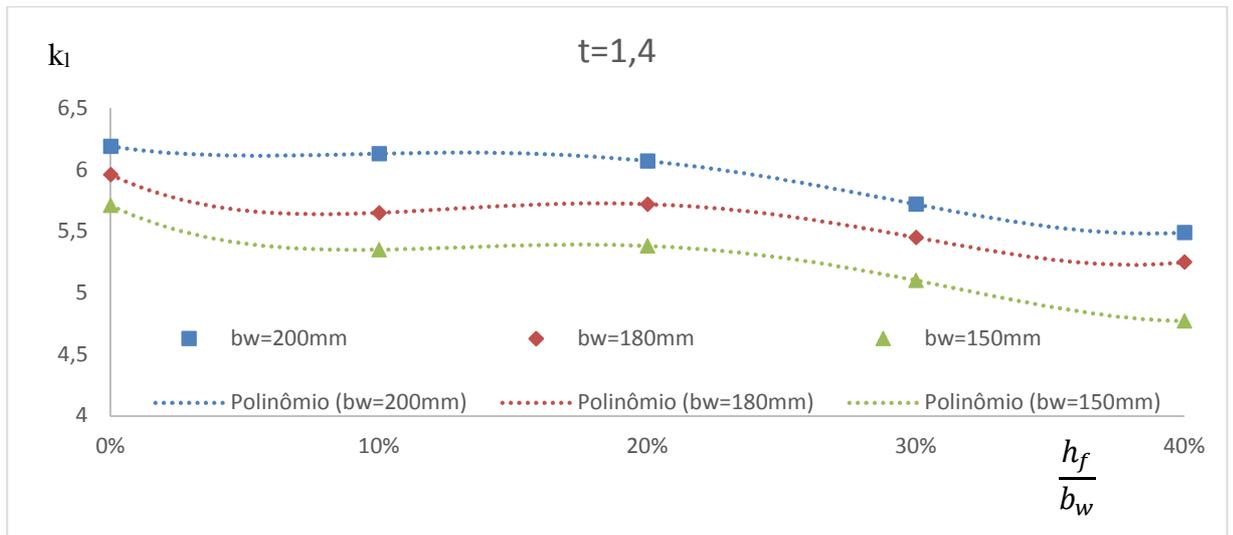


Figura C.1. Variação do valor de  $k_l$  e  $t=1,4$  mm.

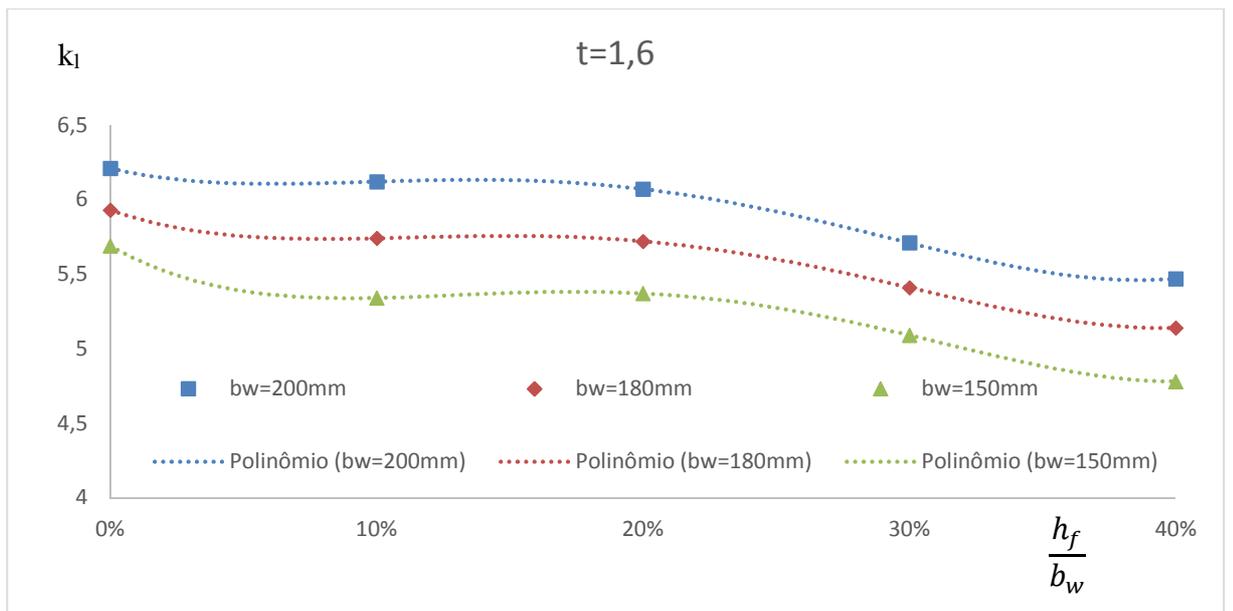


Figura C.2. Variação do valor de  $k_l$  e  $t=1,6$  mm.