UNIVERSIDADE POSITIVO

MAURÍCIO PELIZZARI DAL COL

COMPARATIVO DO DIMENSIONAMENTO DE PERFIS U ENRIJECIDOS FORMADOS A FRIO, SUBMETIDOS A COMPRESSÃO, CONFORME OS DIFERENTES MÉTODOS PREVISTOS NA NORMA NBR14762:2010

CURITIBA

2018

MAURÍCIO PELIZZARI DAL COL

COMPARATIVO DO DIMENSIONAMENTO DE PERFIS U ENRIJECIDOS FORMADOS A FRIO, SUBMETIDOS A COMPRESSÃO, CONFORME OS DIFERENTES MÉTODOS PREVISTOS NA NORMA NBR14762:2010

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Positivo como parte dos requisitos para Graduação.

Orientador: Prof. Juliano J. Scremin.

CURITIBA

2018

RESUMO

Os perfis de chapa dobrada, mais conhecidos como perfis de aço formados a frio, são cada vez mais usados na construção civil devido a vantagem em sua fabricação, montagem e desempenho. Quando submetidos à compressão, os perfis de aço formados a frio podem apresentar comportamento de instabilidade estrutural (conhecido como flambagem). A flambagem é um fenômeno que ocorre em perfis esbeltos, onde a área da seção transversal é pequena quando comparada ao comprimento longitudinal da peça. O fenômeno da flambagem pode ocorrer em três maneiras: global, local e distorcional, sendo que estas podem acontecer de maneira isolada ou em conjunto. Neste trabalho é utilizada a norma NBR 14672:2010 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que é a norma brasileira que contempla as diretrizes para o dimensionamento dos perfis formados a frio. A primeira edição dessa norma foi elaborada em 2001, com base nas prescrições da norma norte americana (AISI). A norma brasileira, na sua atual versão, conta com três métodos de dimensionamento: o método da largura efetiva (MLE), o método da seção efetiva (MSE) e o método da resistência direta (MRD) (adicionado na sua última revisão). Foram realizadas pesquisa bibliográfica e documental, criação de modelos de estudo, estudo dos métodos de dimensionamento conforme ABNT NBR14672: 2010 e aplicação dos procedimentos de norma na determinação da carga resistente de compressão nos modelos de estudo. Conforme os resultados encontrados, o Método da Largura Efetiva (MLE) obteve, em geral, maiores cargas críticas de flambagem que os outros dois métodos (à medida que o tamanho da seção transversal é aumentado). O Método da Seção Efetiva (MSE) e o Método da Resistência Direta (MRD) apresentaram resultados iguais ou muito próximos, dado que ambos métodos possuem o valores da força axial de flambagem local elástica (N_l) iguais ou aproximados e os valores da força axial de flambagem distorcional elástica (N_{dist}) exatamente iguais.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	*American Iron and Steel Institute*
ANSYS	*Swanson Analysis Systems*
CAD	*Computer Aided Design*
CUFSM	*Constrained and Unconstrained and Finite Strip Method*
GBT	*Generalized Beam Theory*
MEF	Método dos Elementos Finitos
MFF	Método das Faixas Finitas
MLE	Método da Largura Efetiva
MPa	Mega Pascal
MRD	Método da Resistência Direta
MSE	Método da Seção Efetiva
NBR	Norma Brasileira
PFF	Perfil Formado a Frio
Ue	Perfil “U” enrijecido

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Seções transversais de aço formado a frio 11
Figura 02 – Enrijecedor de borda 13
Figura 03 - Flambagem de Euler 14
Figura 04 - Coeficiente "K" 16
Figura 05 – Modos de flambagem Global: (a) por flexão, (b) por torção, (c) por flexo-torção 18
Figura 06 - Seção transversal em elementos planos 19
Figura 07 – Flambagem Local 20
Figura 08 - Diferença de flambagem local e distorcional 21
Figura 09 - Curva única de flambagem 22
Figura 10 - Discretização do perfil utilizando MFF: 25
Figura 11 - Ilustração dos tipos de elementos componentes de perfis formados a frio 28
Figura 12 - Larguras efetivas dos elementos AL e AA 29
Figura 13 - Elemento uniformemente comprimido com enrijecedor de borda simples 34
Figura 14 - Fator de comprimento efetivo de flambagem 39
Figura 15 - Perfil Ue para demonstração de dimensionamento 49
Figura 16 - Flambagem local para o perfil Ue (250x100x25) #2,65 55
Figura 17 - Flambagem distorcional para o perfil Ue (250x100x25) #2,65 56
Figura 18 - Gráficos de dois perfis com 1,2 mm de espessura 60
Figura 19 – Gráficos dos perfis Ue (125x50x17) e (150x60x20) #2,00 mm 63
Figura 20 – Gráficos dos perfis Ue (150x60x20) e (200x75x20) #2,65mm 66
Figura 23 - Gráficos dos perfis Ue (250x85x25) e (250x85x25) #2,00 mm 69
Figura 22 - Gráficos dos perfis Ue (200x180x10) e (150x150x15) #2,00 mm 70
Figura 23 - Gráfico do perfil Ue (150x150x15) #3,75mm 71
Figura 24 - Gráfico do perfil Ue (200x75x20) #2,00mm 71

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Limites para verificação da instabilidade por distorção 40
Quadro 02 – Perfis utilizados no trabalho 47
Quadro 03 – Perfis com espessura 1,2mm e comprimento de barra 500mm 57
Quadro 04 – Perfis com espessura 1,2mm e comprimento de barra 1000mm 58
Quadro 05 – Perfis com espessura 1,2mm e comprimento de barra 2000mm 58
Quadro 06 – Perfis com espessura 1,2mm e comprimento de barra 3000mm 59
Quadro 07 – Perfis com espessura 2,00mm e comprimento de barra 500mm 60
Quadro 08 – Perfis com espessura 2,00mm e comprimento de barra 1000mm 61
Quadro 09 – Perfis com espessura 2,00mm e comprimento de barra 2000mm 61
Quadro 10 – Perfis com espessura 2,00mm e comprimento de barra 3000mm 62
Quadro 11 – Perfis com espessura 2,65mm e comprimento de barra 500mm 63
Quadro 12 – Perfis com espessura 2,65mm e comprimento de barra 1000mm 64
Quadro 13 – Perfis com espessura 2,65mm e comprimento de barra 2000mm 64
Quadro 14 – Perfis com espessura 2,65mm e comprimento de barra 3000mm 65
Quadro 15 – Perfis com espessura 3,75 e comprimento de barra 500mm 67
Quadro 16 – Perfis com espessura 3,75mm e comprimento de barra 1000mm 67
Quadro 17 – Perfis com espessura 3,75mm e comprimento de barra 2000mm 68
Quadro 18 – Perfis com espessura 2,00mm e comprimento de barra 1000mm 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AA .30
Tabela 02 - Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AL..31
Tabela 03 - Coeficiente de flambagem kl para a seção completa em barras sob compressão.....36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 9
1.1 OBJETIVO GERAL 10
1.2 JUSTIFICATIVA 10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 11
2.1 PERFIS FORMADOS A FRIO 11
2.1.1 Enrijecedores de borda 13
2.2 BARRAS COMPRIMIDAS 13
2.3 FLAMBAGEM 17
2.3.1 Flambagem Global 17
2.3.2 Flambagem Local 19
2.3.3 Flambagem distorcional 20
2.3.4 Curva de resistência à flambagem 21
2.4 MÉTODOS UTILIZADOS PARA CALCULAR FLAMBAGEM ELÁSTICA 23
2.4.1 Método dos Elementos Finitos (MEF) 23
2.4.2 Teoria generalizada de viga (GBT) 24
2.4.3 Método das Faixas Finitas (MFF) 24
2.4.4 Expressões de dimensionamento para perfis formados a frio comprimidos conforme a ABNT NBR14762:2010 27
2.4.5 Método da Largura Efetiva 28
2.4.6 Método da Seção Efetiva 35
2.4.7 Barras submetidas à força axial de compressão 37
2.4.8 Barras submetidas à força axial de compressão pelo Método da Resistência Direta..... 41
2.5 PROGRAMA COMPUTACIONAL CUFSM 43
2.6 TRABALHOS CORRELATOS 45
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 46
3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E EXPERIMENTAL 46
3.2 MODELOS DE ESTUDO 46
3.3 DIMENSIONAMENTO PELA ABNT NBR14672:2010 47
4 RESULTADOS 49
4.1 MEMORIAL DE CÁLCULO ABNT NBR14672:2010 PARA BARRAS SOB COMPRESSÃO 49
4.1.1 Flambagem Global por flexão, torção ou flexo-torção 50

4.1.2 Cálculo da área efetiva pelo MLE 50
4.1.3 Cálculo da área efetiva pelo MSE 53
4.1.4 Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo 53
4.1.5 Método da Resistência Direta 54
4.2 CARGAS RESISTENTES ÚLTIMAS DE COMPRESSÃO NOS PERFIS 57
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 72
REFERÊNCIAS 74
APÊNDICE A – PERFIS Ue 77
ANEXO A – Propriedades geométricas 92

1 INTRODUÇÃO

Os perfis de chapa dobrada, mais conhecidos como perfis de aço formados a frio, são cada vez mais usados na construção civil devido a vantagem em sua fabricação, montagem e desempenho (SILVA, 2012).

Os perfis de aço formados a frio são criados pelo dobramento de chapas em temperatura ambiente. Estes perfis, diferentemente dos perfis laminados e soldados, apresentam uma relação largura/espessura muito maior. O ato de serem levados ao dobramento proporciona características diferentes dos demais perfis, como, por exemplo, o aumento do limite de escoamento, da resistência à tração e a diminuição da ductilidade do aço comparado com o mesmo em estado virgem (CHODRAUI, 2006).

Os perfis formados a frio aplicam-se a vários tipos de estruturas como, por exemplo, edifícios de pequenas alturas, residências, galpões, coberturas e sistemas de armazenagens. O uso desse tipo de perfil possui vantagens como a rapidez de execução da obra e economia de transporte. Por tratar-se de perfis leves, torna-se fácil a montagem, com poucos equipamentos de elevação (SILVA; SILVA; PIERIN, 2014).

Quando submetidos à compressão, os perfis de aço formados a frio podem apresentar comportamento de instabilidade estrutural (conhecido como flambagem). A flambagem é um fenômeno que ocorre em perfis esbeltos, onde a área da seção transversal é pequena quando comparada ao comprimento longitudinal da peça. O fenômeno da flambagem pode ocorrer em três maneiras: global, local e distorcional, sendo quês estas podem acontecer de maneira isolada ou em conjunto (VIEIRA, 2010).

A norma NBR 14672:2010 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é a norma brasileira que contempla as diretrizes para o dimensionamento dos perfis formados a frio. A primeira edição dessa norma foi elaborada em 2001, com base nas prescrições da norma norte americana (AISI). A norma brasileira, na sua atual versão, conta com três métodos de dimensionamento: o método da largura efetiva (MLE), o método da seção efetiva (MSE) e o método da resistência direta (MRD) (adicionado na sua última revisão) (COSTA, 2012).

1.1 OBJETIVO GERAL

Comparar os resultados de carga resistente de compressão de perfis “U” enrijecidos (Ue) obtidos por meio dos três diferentes métodos de dimensionamento previstos na norma NBR14762:2010 (MLE, MSE e MRD) de modo a verificar convergência de resultados e/ou caracterizar possíveis situações onde algum(s) dos métodos venha(m) a apresentar resultados muito discrepantes.

1.2 JUSTIFICATIVA

As referências sobre estruturas de aço versam, em sua maioria, sobre o dimensionamento de perfis laminados e soldados. Ainda são poucas as referências que abordam os procedimentos da NBR14762/2010.

A norma brasileira para dimensionamento de perfis de aço formados a frio possui três métodos de dimensionamento, conforme sua revisão no ano de 2010. Os dois primeiros métodos (MLE e MSE) são bem mais conhecidos e figuram no corpo principal do texto da norma, enquanto o último método (MRD), inserido na última revisão, figura apenas nos anexos e quase não é apresentado na literatura correlata ao assunto em língua portuguesa. No entanto, ao se fazer uma consulta a materiais produzidos nos últimos anos em língua inglesa, é possível constatar uma preferência por parte dos autores estrangeiros quanto ao uso do MRD no dimensionamento de perfis formados a frio (JAVARONI, 2015).

Assim sendo, o presente trabalho justifica-se pela necessidade de detectar alguma possível discrepância entre os resultados dos métodos mais consolidados (MLE e MSE) e o método incorporado por último na norma (MRD), de modo a sondar os motivos da aparente preferência pelo MRD representada pelo volume de publicações nos últimos anos.

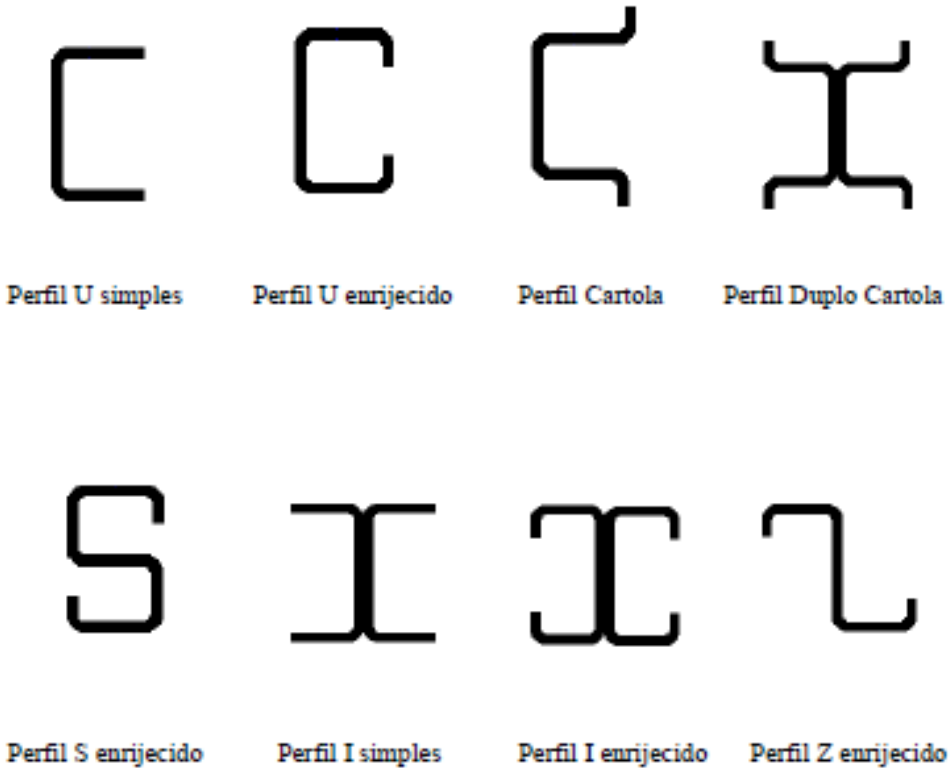
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão quanto aos assuntos: perfis formado a frio, flambagem e os procedimentos de dimensionamento da ABNT NBR14672:2010 quanto à perfis formados à frio solicitados por compressão simples.

2.1 PERFIS FORMADOS A FRIO

Os perfis de aço formados a frio, obtidos pelo dobramento de chapas planas de aço, em função da grande variedade de formas de seções transversais (Figura 01), alcançaram lugar de destaque entre as estruturas metálicas, principalmente em obras de menor porte que possuem, em geral, pequenos vãos e carregamentos de baixa intensidade. Em obras com estas características, a utilização de outros tipos de perfis (laminados ou soldados) resulta, na maioria das vezes, em um alto custo da estrutura em relação ao total necessário para a obra (JAVARONI, 2015).

Figura 01 - Seções transversais de aço formado a frio



Fonte: Javaroni (2015)

São dois os processos de fabricação dos perfis formados a frio: contínuo e descontínuo. O processo contínuo, adequado à fabricação em série, é realizado a partir do deslocamento longitudinal de uma chapa de aço sobre os roletes de uma linha de perfilação. Os roletes conferem gradativamente à chapa a forma definitiva do perfil. Quando o perfil deixa a linha de perfilação, ele é cortado no comprimento solicitado para o projeto (SILVA; SILVA; PIERIN 2014).

O processo descontínuo, adequado à pequena quantidade de perfis, é realizado mediante o emprego de uma prensa dobradeira. A matriz da dobradeira é prensada contra a chapa de aço, obrigando a formação de uma dobra. A operação é repetida quantas vezes forem necessárias para que se obtenha a seção do perfil exigida no projeto. O comprimento do perfil está limitado à largura da prensa (SENA, 2017).

O dobramento de uma chapa promovido pelo método contínuo ou pelo método descontínuo provoca o efeito conhecido como envelhecimento. Esse efeito causa um aumento da resistência ao escoamento (f_y) e da resistência à ruptura (f_u) com, consequentemente, redução da ductilidade. A redução da ductilidade significa menor capacidade do material se deformar mediante uma mesma solicitação. De modo a impedir o surgimento de fissuras é necessário que a chapa seja dobrada com um raio de dobramento adequado ao material e a espessura da chapa em questão. (SILVA; SILVA; PIERIN 2014).

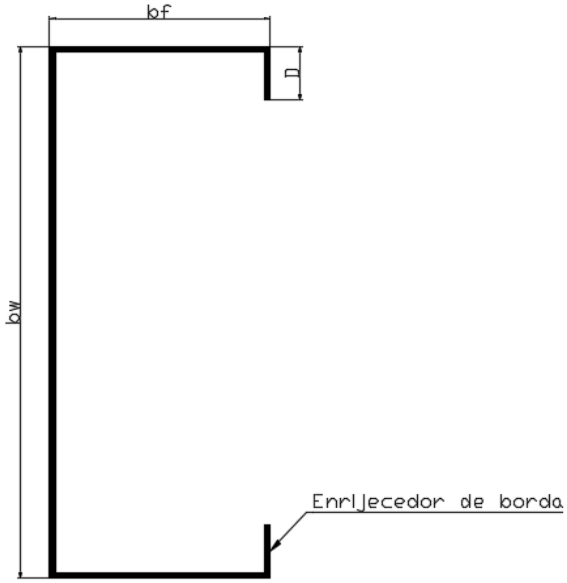
Uma desvantagem decorrente do uso de perfis formados a frio é a perda das características mecânicas quando o material é submetido a altas temperaturas, a partir de 500° C, e a ambientes de elevada agressividade ligada a corrosão. Nessas situações são exigidas medidas como proteção contra o fogo e acabamento com tintas ou galvanização, respectivamente (SILVA, 2012).

De acordo com Castelani (2012), os perfis formados a frio, com seção aberta, possuem como característica uma grande deformabilidade à torção em perfis monossimétricos, isso devido baixa rigidez de torção das seções de parede fina aberta, em que esse processo necessita de análise dos modos globais por flexo-torção. Outra característica envolve os enrijecedores de borda, os quais são responsáveis por melhorar o comportamento estrutural de paredes finas comprimidas dos perfis e colapso da alma devido à aplicação de forças concentradas.

2.1.1 Enrijecedores de borda

As seções transversais dos perfis de aço formados a frio são compostas de elementos enrijecidos e não enrijecidos. Devido à presença de uma borda livre, um acréscimo na resistência final pode ser adquirido por meio da adição de um enrijecedor a borda. Os enrijecedores são na verdade pequenas extensões dobradas na ponta de uma chapa (como na dimensão D da Figura 02) de modo a garantir uma geometria que resulte em acréscimo de rigidez à seção transversal. Esses enrijecedores devem oferecer um “apoio” longitudinal ao elemento que se comportaria como uma borda livre, conforme pode ser analisado na Figura 02 (JAVARONI, 2015).

Figura 02 – Enrijecedor de borda



Fonte: O autor (2018)

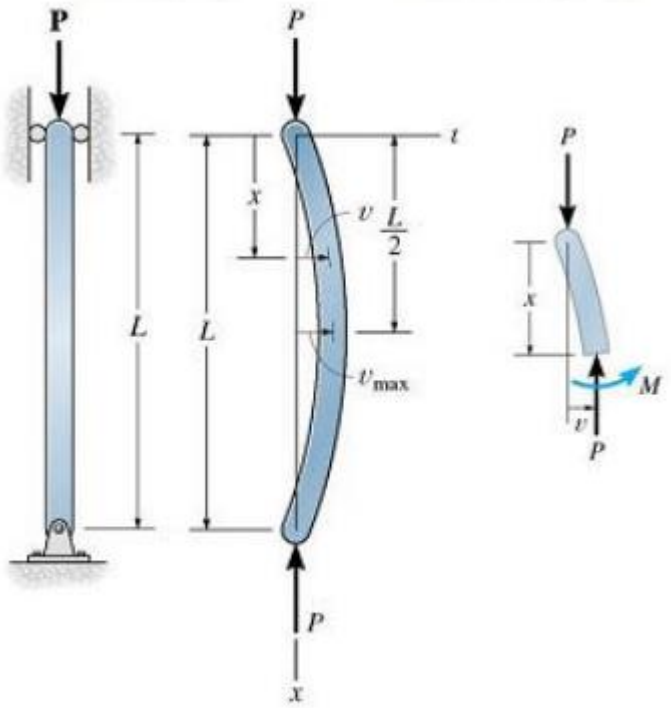
Para relações D/b_f, onde D é o comprimento do enrijecedor e b_f o comprimento do elemento vinculado ao enrijecedor, menores que 0,12, a rigidez do enrijecedor não é suficiente para definir um apoio ao elemento plano (JAVARONI, 2015).

2.2 BARRAS COMPRIMIDAS

Tradicionalmente, a coluna de Euler (Figura 03), foi o ponto de partida da investigação teórica quanto à resistência de barras comprimidas. Os primeiros

estudos teóricos, apresentados pelo matemático Leonard Euler no ano de 1744, propõem a equação diferencial do problema de uma coluna idealmente reta solicitada por compressão axial conforme exposto na equação 01 (ALMEIDA, 2007).

Figura 03 - Flambagem de Euler



Fonte: Hibbeler (2000)

De acordo com Hibbeler (2000) Para determinar a carga crítica e a forma de flambagem da coluna, é necessário aplicar a equação diferencial da linha elástica que relaciona o momento fletor interno da coluna e sua forma fletida.

$$EI\frac{d^2v}{dx^2} = M(x) = -Pv \tag{1}$$

Onde:

E – Módulo de elasticidade do material da coluna;

I – Momento de inércia da seção transversal da coluna;

M – Momento fletor da coluna;

P – Carga aplicada na coluna;

v – Deflexão lateral da coluna.

A equação (01) é uma equação diferencial homogênea de segunda ordem com coeficientes constantes. Sua solução geral é dada por:

$$v = C_1 sen\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}\, x\right) + C_2 cos\left(\sqrt{\left(\frac{P}{EI}\right)} x\right) \tag{2}$$

Sendo C1 e C2 constantes de integração determinadas pelas condições de contorno nas extremidades da coluna, que são v = 0 em x = 0, obtendo C2 = 0 e v = 0 em x = L.

$$C_1 sen\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}\, L\right) = 0 \tag{3}$$

A solução trivial para a equação (3) seria C1 = 0, porém nesse caso a deflexão seria nula para qualquer carga P aplicada. Por isso é necessário impor uma solução não trivial:

$$sen\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}\, L\right) = 0 \tag{4}$$

A equação 4 é satisfeita se:

$$\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}\, L\right) = n\pi \qquad ou \qquad P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \qquad (n = 1,2,3, \ldots) \tag{5}$$

Na equação 5, n representa o modo de flambagem da coluna e o menor valor de P é obtido para n=1, definindo a carga crítica para a coluna birrotulada (também chamada de carga de Euler), que é dada por:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{6}$$

Onde:

P_{cr} – É a carga crítica de flambagem;

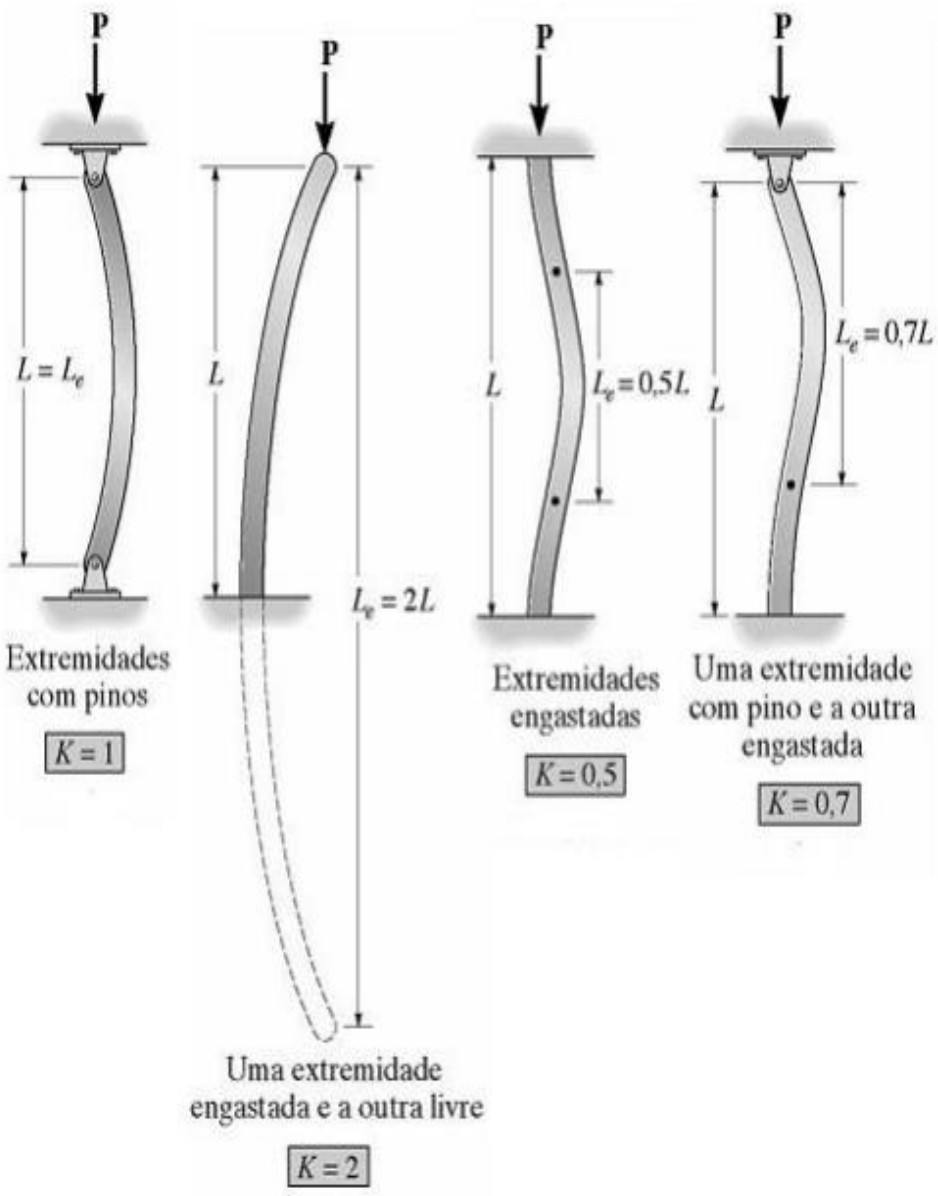
E – É o módulo de elasticidade;

L – É o comprimento de flambagem da barra;

I – É a Inércia da seção transversal.

Para condições de vinculações diferentes, transforma-se o comprimento real (L) da peça em um comprimento fictício (denominado comprimento de flambagem) pela multiplicação de um coeficiente “K” (Figura 04).

Figura 04 - Coeficiente "K"



Fonte: Hibbeler (2000)

A falha de um elemento comprimido pode ocorrer por escoamento, flambagem global, flambagem local das partes componentes do perfil ou ainda por distorção da seção transversal. Estes tipos de flambagem serão descritos no item que se segue.

2.3 FLAMBAGEM

Quando submetidos à compressão, os elementos planos que constituem os perfis formados a frio apresentam um comportamento de instabilidade estrutural conhecido como flambagem. Esse fenômeno é caracterizado pelo deslocamento transversal dos elementos constituintes da seção transversal (VIEIRA, 2010).

O termo flambagem, embora conceitualmente correto quando associado à instabilidade por bifurcação do equilíbrio ou por ponto limite, é usualmente empregado pelo meio técnico de maneira mais abrangente para designar instabilidade em geral (ALMEIDA, 2007).

A flambagem possui três modos de instabilidade estrutural principais, sendo eles: modo de instabilidade global, modo local e modo distorcional. Esses modos podem ocorrer isoladamente ou interagindo uns com os outro em interação (CASTELANI, 2012).

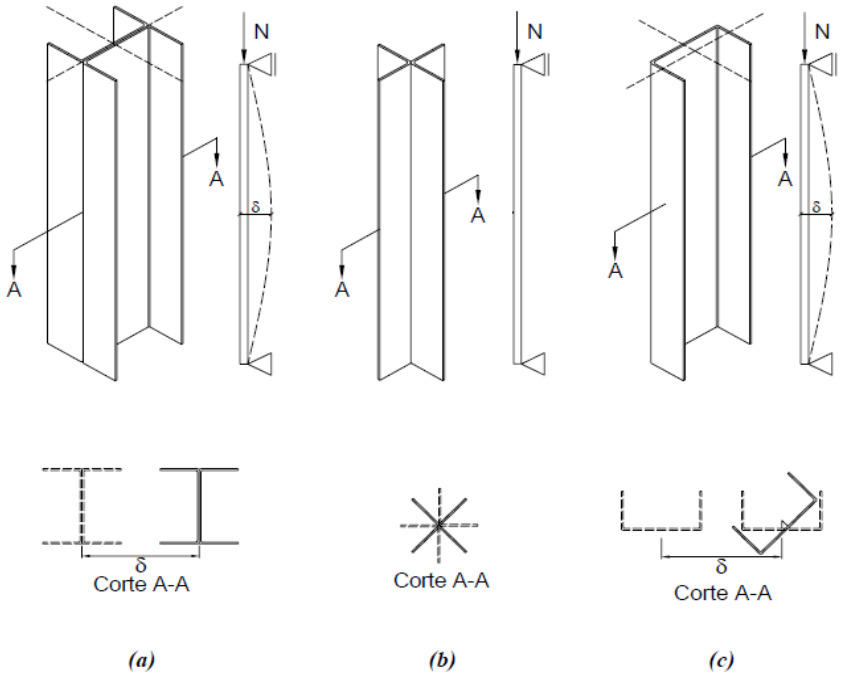
2.3.1 Flambagem Global

A flambagem global é uma ocorrência característica de colunas com alto índice de esbeltez global (L_{ef}/r), em que L_{ef} é o comprimento efetivo da barra e r o raio de giração mínimo (ALMEIDA, 2007).

De acordo com Javaroni (2015), a flambagem global é definida pela curvatura do comprimento da barra como um todo, que depende das características geométricas do perfil e dos seus vínculos.

O aumento da esbeltez da barra diminui sua capacidade para resistir aos esforços solicitantes. Isso significa que a máxima tensão que poderá atuar num elemento de chapa será a tensão crítica global e não mais a tensão de escoamento do aço. Barras comprimidas estão sujeitas à flambagem por flexão (Euler), à flambagem por torção ou à flambagem por flexo-torção. Esses tipos de flambagem podem ser observados na Figura 05 (SILVA; SILVA; PIERIN, 2014).

Figura 05 – Modos de flambagem Global: (a) por flexão, (b) por torção, (c) por flexo-torção



Fonte: Almeida (2007)

- Flambagem por flexão: encurvamento do eixo da barra. Define-se pelo movimento do corpo rígido das seções transversais em resposta ao deslocamento transversal da barra (ALMEIDA, 2007).
- Flambagem por torção: envolve a rotação da seção transversal em torno de um eixo definido pelo centro de torção ou centro de cisalhamento (MELO, 2017).
- Flambagem por flexo-torção: resulta em encurvamento e torção simultâneos (ALMEIDA, 2007).

Em relação à flambagem global, é muito comum apenas considerar o modo da flambagem por flexão, conhecida como flambagem de Euler. Quando se enquadram as seções com dupla simetria, como seções quadradas ou do tipo “I”, a flambagem de Euler é predominante, porém, nem sempre crítica (JAVARONI, 2015).

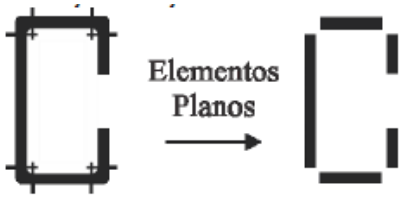
De outra forma, barras com seção transversal monossimétrica ou assimétrica mostram tendências de alcançarem o colapso por meio da flambagem global por flexo-torção, onde o giro da seção é em torno do centro de torção (ALMEIDA, 2007).

2.3.2 Flambagem Local

A flambagem local ocorre em elementos denominados planos (ou de chapa), sob esforços de compressão axial, momento fletor ou cisalhamento. Elementos planos são perfis ideais conectados pelas dobras, conforme demonstrado na Figura 06 (JAVARONI, 2015).

Diferentemente da flambagem de barra, a flambagem local não implica necessariamente no fim da capacidade portante do perfil, mas, apenas uma redução de sua rigidez global à deformação (SILVA; SILVA; PIERIN, 2014).

Figura 06 - Seção transversal em elementos planos



Fonte: Javaroni (2015)

Quando comprimidos, os elementos planos estão sujeitos à flambagem de chapa com carregamento abaixo do equivalente ao escoamento do aço. Alcançando o valor da tensão crítica mostrada pela equação (7), a flambagem de chapa ocorre na região central e a distribuição de tensões deixa de ser constante (JAVARONI, 2015).

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12\,(1-\upsilon^2)\lambda^2} \tag{7}$$

Onde:

σ_{cr} – Tensão crítica;

k – Coeficiente de flambagem de chapa (Quadro 01);

E – Módulo de Elasticidade;

υ – Coeficiente de Poisson;

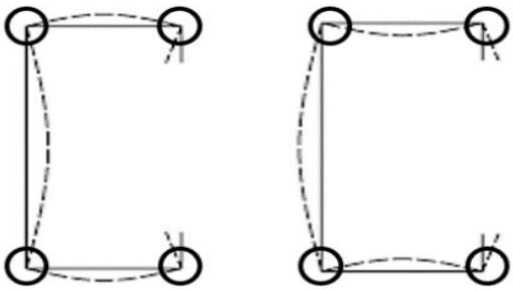
λ – Índice de esbeltez (b/t): comprimento da chapa sobre espessura.

A flambagem local, Figura 07, apresenta característica de flexão nos elementos que compõem a seção transversal sem que ocorra deslocamento ou

deformação da aresta (não há translação nos pontos de união). A flambagem local demonstra particularidades de reserva pós-flambagem. Com isso, ocorre uma redistribuição das tensões atuantes, depois de exceder a carga crítica, gerando a estabilização do perfil (CASTELANI, 2012).

A resistência pós flambagem ocorre porque as chapas, diferente de elementos unidimensionais, não atingem o colapso quando a tensão de flambagem é atingida. Os acréscimos de tensão são redistribuídos para as partes enrijecidas da chapa. Por isso, o enrijecedor de extremidade é incluído à borda livre para que a rigidez do perfil seja aumentada, fornecendo um apoio longitudinal aos elementos comprimidos (KLEINA; CASEKER, 2014).

Figura 07 – Flambagem Local



Fonte: Matsubara (2018)

Dado que os perfis formados a frio são constituídos por chapas finas, estes normalmente têm seus elementos sujeitos a flambagem local. Porém esse fenômeno estrutural não representa um colapso na estrutura e sim uma redução significativa da rigidez da seção (COSTA, 2012).

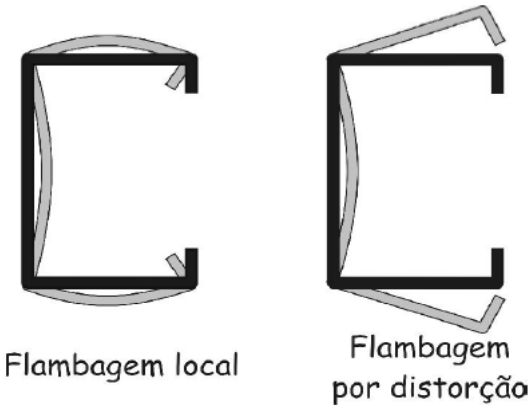
2.3.3 Flambagem distorcional

A flambagem distorcional demonstra características de flexão nos elementos constituintes à seção transversal com deslocamento ou deformação da aresta, com translação nos pontos de união. Desse modo, há possibilidade de distorção da seção transversal, podendo ocorrer em carregamentos inferiores ao do modo local (CASTELANI, 2012).

A flambagem distorcional é caracterizada pela alteração do formato inicial da seção transversal, havendo uma rotação dos elementos que sofreram compressão. Este fenômeno torna-se mais claro em seções (mesa / alma) com valores altos, elementos com menor largura do enrijecedor de borda e em elementos com valores de índice de esbeltez global baixo (SILVA; SILVA; PIERIN, 2014).

O modo distorcional é definido pela rotação e translação do conjunto formado pelo elemento comprimido e seu enrijecedor (que modifica o formato da seção transversal). Diferentemente da instabilidade local, mantém-se conservada a posição original dos cantos dobrados e os ângulos formados entre elementos adjacentes, conforme observado na Figura 08 (CHODRAUI, 2006).

Figura 08 - Diferença de flambagem local e distorcional



Fonte: Silva; Silva; Pierin (2014)

2.3.4 Curva de resistência à flambagem

Uma curva de resistência à flambagem, ou curva de dimensionamento, tem como objetivo a determinação, de forma prática, da força última que pode ser suportada por uma barra de aço axialmente comprimida, levando-se em consideração todas as suas imperfeições inevitáveis, tais como: flechas iniciais, excentricidade acidental na aplicação do carregamento, variação da tensão limite de escoamento do material e tensões residuais (JAVARONI, 2015).

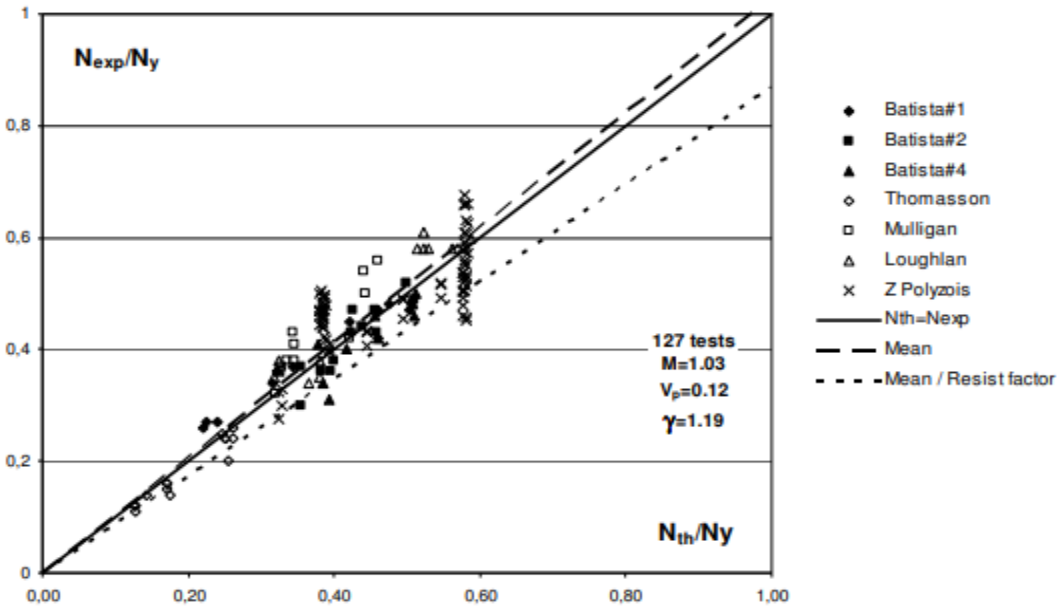
A normalização brasileira já utilizou curvas distintas, chamadas de curvas múltiplas. Enquanto na sua edição atual, emprega uma curva única baseada em ajuste de curva a partir de resultados experimentais (JAVARONI, 2015).

> A partir da edição da nova ABNT NBR8800, em 2008, reuniu-se mais uma vez o grupo técnico para atualizar a ABNT NBR14762. O trabalho referente ao capítulo das barras comprimidas foi desenvolvido com apoio de extensa re-calibração dos métodos disponíveis, tanto nas especificações do AISI quanto no Eurocode, resultando no método brasileiro das seções efetivas MSE (BATISTA, 2010), o qual incorpora procedimento para a consideração do efeito da flambagem local na resistência das barras (BATISTA et al., 2010, p. 09).

Conforme apresentado por Batista et al. (2010), os resultados dos estudos da confiabilidade e do coeficiente de ponderação da resistência γ a ser considerado nas múltiplas curvas de flambagem do Eurocode, em comparação com os resultados obtidos utilizando a curva única do AISC, acabam sendo praticamente iguais.

> Esses resultados levaram à decisão, confortável no caso dos PFF, de se adequar a nova edição da norma à curva única, buscando assim compatibilizar as prescrições das normas dirigidas a estruturas de aço vigentes no país. A Figura 09 (BATISTA, 2010) apresenta a comparação entre os resultados experimentais e teóricos de um conjunto de 127 ensaios experimentais de colunas de PFF com seção U enrijecido, Z enrijecido e Z não enrijecido, com base na curva única do AISC apresentada na Equação 1 e adotada na ABNT NBR14762:2010, sendo possível constatar a comparação adequada entre valores experimentais N_{exp} e valores teóricos N_{th} da resistência (valor médio M=1,03, variação Vp=12% e coeficiente de ponderação da resistência γ=1,19 obtido de cálculo de confiabilidade) (BATISTA et al., 2010, p. 09).

Figura 09 - Curva única de flambagem



Fonte: Batista et al. (2010, p. 09)

2.4 MÉTODOS UTILIZADOS PARA CALCULAR FLAMBAGEM ELÁSTICA

A instabilidade elástica é aquela que se processa com o material trabalhando em seu regime elástico, é um dos tipos mais comuns de perda de estabilidade e objeto de estudo desde o século XVIII. Um dos primeiros estudos de problemas de instabilidade elástica foi apresentado para barras isoladas comprimidas em 1744, pelo matemático suíço Leonard Euller. Em um determinado estágio de carregamento, a configuração de equilíbrio da barra tem a tendência a se aproximar de um ponto de divergência, ou ponto de bifurcação, a partir do qual duas trajetórias de equilíbrio passam a ser possíveis. O ponto de bifurcação está localizado na intersecção dessas duas trajetórias e denota uma possível alteração no comportamento do sistema uma vez que a partir de tal ponto pode seguir dois estados de equilibro (BRAGA; CAMPELLO, 2014).

Os métodos numéricos de análise linear de estabilidade elástica são aqueles que fornecem os carregamentos críticos elásticos, que formalmente, consistem em um problema de autovalores e autovetores associado às matrizes de rigidez elástica e geométrica da estrutura discretizada. Os três principais métodos para discretização mais utilizados em estruturas de aço formado a frio são apresentados a seguir (BRAGA; CAMPELLO, 2014).

2.4.1 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta para resolver equações diferenciais parciais. Vários fenômenos físicos e de engenharia em meios contínuos são descritos por equações diferencias parciais, impondo a esses sistemas condições de contorno e condições iniciais. A ideia básica do método dos elementos finitos é realizar uma divisão do domínio de integração de uma estrutura ou sistema de interesse em um conjunto de pequenas regiões. Essas regiões são chamadas de elementos finitos e transformam o domínio de contínuo para discreto. A grande vantagem do uso do método dos elementos finitos é não buscar uma função admissível que satisfaça as condições de contorno para todo o domínio, o que pode ser praticamente impossível em um problema complexo, mas buscar estas soluções em cada elemento separadamente (CASTELANI, 2012).

A discretização pelo MEF que é o método numérico mais geral, versátil e popular, no caso dos perfis formados a frio, consiste em discretizar a geometria utilizando elementos de casca. Com esses elementos, os deslocamentos e as rotações em um ponto qualquer do perfil são aproximados por funções de forma polinomiais cujos coeficientes são os deslocamentos generalizados ou, em outras palavras, os graus de liberdade nodais. A necessidade de capturar adequadamente as deformações da seção transversal nos vários modos de instabilidade, cujas formas são inicialmente desconhecidas, faz com que a discretização se dê com o uso de malhas refinadas. (BRAGA; CAMPELLO, 2014).

2.4.2 Teoria generalizada de viga (GBT)

Teoria Generalizada de Vigas, denominada GBT (*Generalized Beam Theory*), foi desenvolvida por Richard Schardt em 1966, na Alemanha. A GBT apresenta uma formulação baseada numa teoria de vigas, isto é, ela idealiza o perfil como sendo um objeto unidimensional representado por sua linha de eixo, dotado de uma seção transversal. O eixo pode experimentar deslocamentos e rotações de magnitude moderada e a descrição cinemática é enriquecida com a inclusão de graus de liberdade adicionais pertencentes às seções transversais (e não apenas ao eixo). Em outras palavras, introduzem-se nós nas seções transversais, o que permite a consideração dos efeitos locais, e das deformações da seção (BRAGA; CAMPELLO, 2014).

A GBT é um método de análise aplicável a perfis de parede fina, desenvolvido para levar em conta a distorção da seção. A teoria busca, ao mesmo tempo, unificar e estender teorias clássicas de análise de perfis formado a frio. Todos os usuais modos de deformação de corpo rígido e os modos de deformação de alta ordem são tratados de forma idêntica. É uma teoria que permite que se trabalhe com modos de deformação característicos de maneira independente, sendo possível escolher quais os modos serão utilizados na análise (MEZZONO, 2012).

2.4.3 Método das Faixas Finitas (MFF)

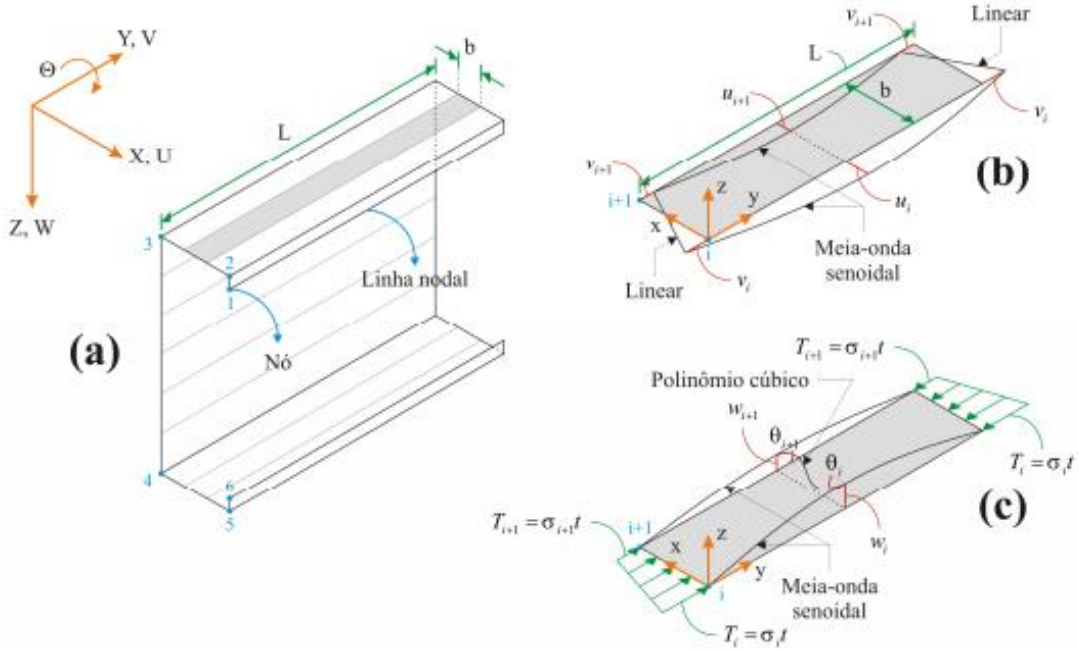
O método das faixas finitas é uma modificação do método dos elementos finitos. A diferença principal entre os dois métodos é que enquanto o método dos

elementos finitos divide uma porção de material analisada em elementos, o MFF discretiza a seção analisada em faixas que se estendem ao longo de todo o comprimento analisado, gerando, assim, faixas ou tiras de larguras constantes. Para o uso do método das faixas finitas, é necessário que a estrutura tenha uma configuração geométrica regular. No caso, uma das características dos perfis formados a frio é que a seção transversal se mantém constante ao longo do seu comprimento, sendo discretizado com faixas de largura constantes e tendo o comprimento da faixa ao longo de todo o comprimento da barra (CASTELANI, 2012).

O Método das Faixas Finitas (MFF) foi desenvolvido originalmente por Y. K Cheung em 1976 visando a análise de perfis laminados. Hancock estendeu este método para os perfis formados a frio elaborando algumas modificações na matriz de rigidez desenvolvida por Cheung. O MFF fornece soluções apropriadas para o uso do método da resistência direta no dimensionamento de perfis formados a frio (JAVARONI, 2015).

O MFF aproveita-se do fato das formas dos perfis metálicos serem prismáticas e discretiza a seção transversal destes em finitos segmentos, sendo que cada segmento dá origem a uma faixa com uma dimensão longitudinal igual à do comprimento total do perfil conforme Figura 10 (BRAGA; CAMPELO, 2014).

Figura 10 - Discretização do perfil utilizando MFF:



Fonte: Mezzono (2012)

Na Figura 10 os items (a), (b) e (c) referem-se a:

(a) Discretização de um perfil U enrijecido.

(b) Deslocamento no plano da faixa (membranais).

(c) Deslocamento fora do plano da faixa (flexão de placa) e distribuição de trações longitudinais em uma faixa.

A seleção das funções de deslocamento utilizadas no método das faixas finitas é a chave do método. Segundo o programa CUFSM (*Constrained and Unconstrained and Finite Strip Method)*, são utilizadas, na direção longitudinal, funções harmônicas (formato de uma meia onda seno). Tal fato é consistente com a condição de contorno de extremidades simplesmente apoiadas, portanto leva a uma simplificação da solução (CHODRAUI, 2003).

Cada faixa finita é representada por quatro nós, tendo cada nó quatro graus de liberdade. O campo de deslocamentos é obtido por interpolação dos deslocamentos nodais através de funções de forma Y. No caso de um perfil biarticulado, a função é:

$$\psi(y) = sen(\frac{m\pi y}{L}) \tag{8}$$

y - É coordenada ao longo do eixo;

m - É o número de semiondas longitudinais esperadas para a configuração deformada ao longo do comprimento da faixa (adota-se normalmente n=1);

L - É o comprimento de meia onda do perfil.

De acordo com Chodraui (2003), a análise do fenômeno da flambagem elástica pode ser representado no formato matricial por um problema de autovalor, sendo λ representativo da força de flambagem, como um autovalor.

$$\left|K_e - \lambda K_g\right| U = 0 \tag{9}$$

Onde:

K_e - É a matriz de rigidez elástica do modelo em função das propriedades do material e das funções de forma escolhida;

K_g - É matriz de rigidez geométrica do modelo, sendo função das funções de forma e dos carregamentos aplicados.

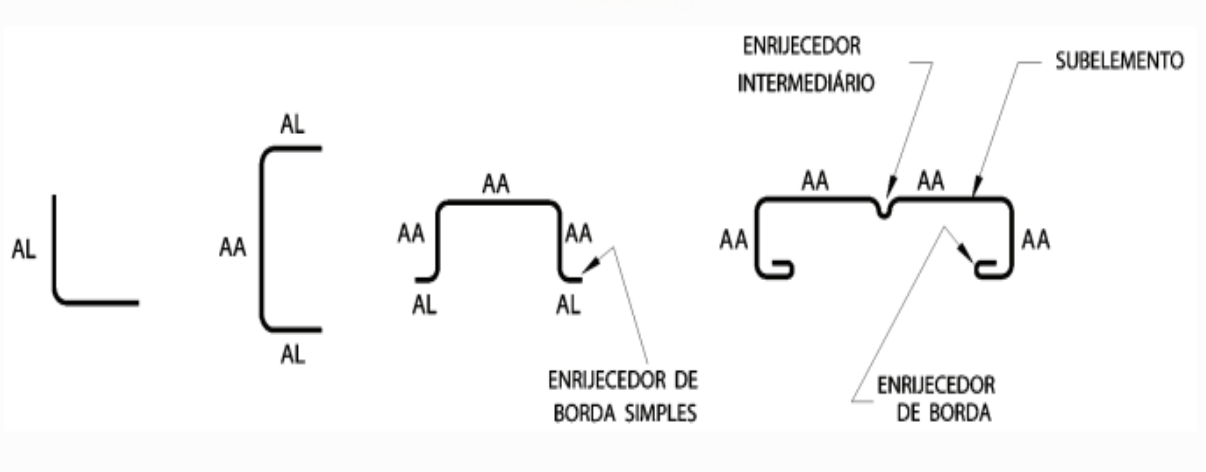
As raízes da equação 9 são denominadas de autovalores e a cada raiz de λ há um vetor U, não nulo, correspondente que satisfaz a equação 8. A menor das raízes está associada ao primeiro ponto crítico, consequentemente o carregamento crítico mínimo (BRAGA; CAMPELO, 2014).

2.4.4 Expressões de dimensionamento para perfis formados a frio comprimidos conforme a ABNT NBR14762:2010

A norma brasileira para dimensionamento de perfis estruturais de aço formados a frio, no caso de peças comprimidas, determina a máxima carga de compressão que o elemento pode resistir levando em conta as possibilidades de falha por meio do escoamento da seção efetiva, flambagem global, flambagem local e quando aplicável flambagem distorcional (ABNT, 2010). A seguir, são apresentadas as nomenclaturas utilizadas pela norma, para melhor entendimento.

- Elementos com bordas vinculadas (elemento AA): Elemento plano com as duas bordas vinculadas a outros elementos na direção longitudinal do perfil. São os elementos enrijecidos (Figura 11);
- Elemento com borda livre (elemento AL): Elemento plano vinculado a outro elemento em apenas uma borda na direção longitudinal do perfil. São os chamados elementos não enrijecidos (Figura 11);
- Enrijecedores de borda simples: Enrijecedores constituídos por um único elemento plano (Figura 11);
- Elemento com enrijecedores intermediários: Elementos enrijecidos entres as bordas longitudinais por meio de enrijecedores intermediários paralelos à direção longitudinal do perfil (Figura 11);
- Subelemento: Parte compreendida entre enrijecedores intermediários adjacentes ou entre a borda e o enrijecedor intermediário adjacente.

Figura 11 - Ilustração dos tipos de elementos componentes de perfis formados a frio



Fonte: ABNT NBR14672 (2010)

A norma brasileira para dimensionamento de perfis formados a frio apresenta três métodos de dimensionamentos: Método da Largura Efetiva (MLE), Método da Seção Efetiva (MSE) e Método da Resistência Direta (MRD) (JAVARONI, 2015).

2.4.5 Método da Largura Efetiva

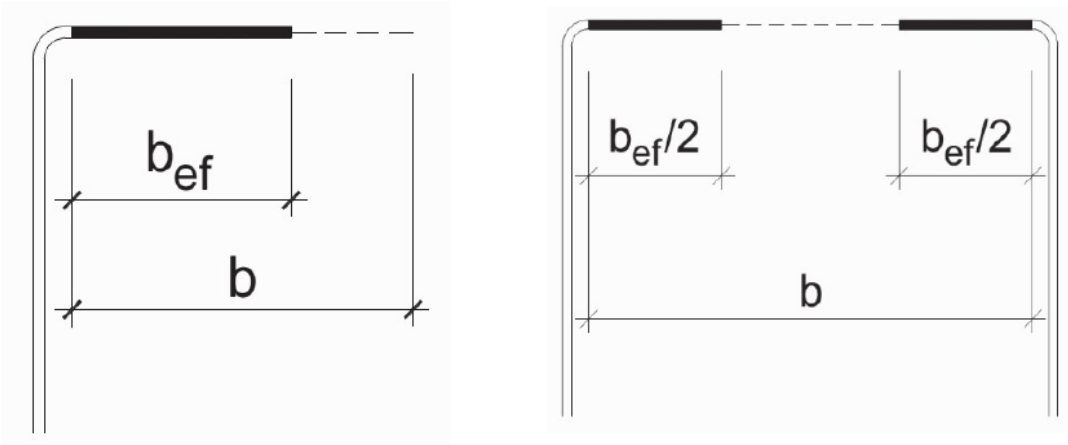
A utilização dos perfis formados a frio iniciou no Século XIX, nos Estados Unidos e na Inglaterra. Nessa época, não existia regulamentação técnica sobre a utilização destes perfis, sendo que o emprego dos perfis formados a frio seguia recomendações resultantes de empirismos e da experiência adquiridas na época, proporcionando um uso restrito de perfis estruturais. Em 1932, Von Kármán, propôs o Método da Largura Efetiva (CASTELANI, 2012).

Este é um método em que as seções são elaboradas por elementos de chapa isoladas, como pode ser observado na Figura 12. Considera-se para cada chapa analisada a vinculação devida pela chapa anexa entre elas, entretanto, sem considerar a continuidade física, bem como a intensidade e distribuição de tensões na mesma (ALMEIDA, 2007).

O MLE (Método da Largura Efetiva) é um método aproximado que analisa de maneira isolada cada elemento que forma a seção transversal, levando em conta as condições de vizinhança com as outras chapas componentes do perfil (KLEINA; CASEKER, 2014).

Como o próprio nome diz, o MLE baseia-se no cálculo de larguras efetivas de cada elemento componente da seção transversal quer sejam estes do tipo AL ou AA.

Figura 12 - Larguras efetivas dos elementos AL e AA



Fonte: ABNT NBR14672 (2010)

A largura b_{ef} deve ser calculada conforme descrito a seguir:

Todos os elementos AA indicados na Tabela 01 e os elementos AL indicados na Tabela 02.

$$b_{ef} = b \; para \; \lambda_p \leq 0{,}673 \tag{10}$$

$$b_{ef} = b\frac{\left(\frac{1-0{,}22}{\lambda_p}\right)}{\lambda_p} \; para \; \lambda_p > 0{,}67 \tag{11}$$

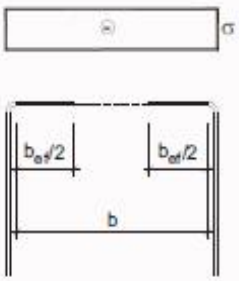
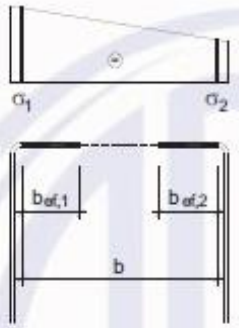
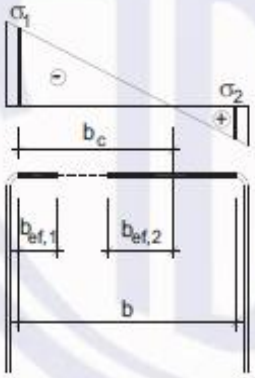
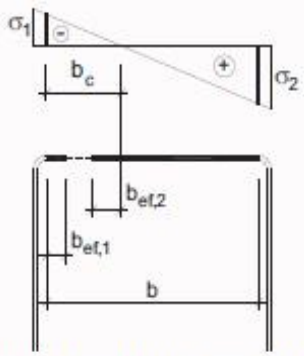
Onde:

b – É a largura do elemento;

λ_p– É o índice de esbeltez reduzido do elemento, definido como:

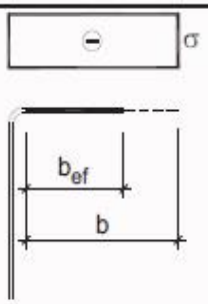
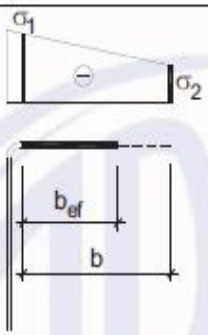
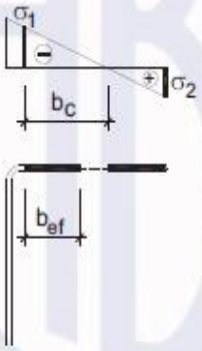
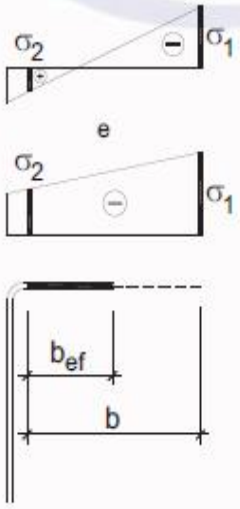
$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}} = \frac{b/t}{0.95(kE/\sigma)^{0,5}} \tag{12}$$

Tabela 01 - Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AA

Caso a		$k = 4,0$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$
Caso c	 A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.	$-0,236 < \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$
Caso d	 A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq -0,236$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\psi)$ $b_{ef,2} = 0,5 b_{ef}$ sendo $b_{ef,1} + b_{ef,2} \leq b_c$ $k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$
NOTA O sinal (-) indica compressão.		

Fonte: ABNT NBR14672 (2010)

Tabela 02 - Largura efetiva e coeficientes de flambagem local para elementos AL

Caso a		$k = 0,43$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $k = 0,578 / (\psi + 0,34)$
Caso c	 A parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva.	$-1,0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $k = 1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$
Caso d		$-1,0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq 1,0$ $k = 0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$
NOTA O sinal (-) indica compressão.		

Fonte: ABNT NBR14672 (2010)

Para $\lambda_p \leq$ 0,673 a largura efetiva é a própria largura do elemento;

σ_{cr}– É a tensão convencional de flambagem elástica, dada por:

$$\sigma_{cr} = k\frac{\pi^2/E}{12(1-\upsilon^2)(b/t)^2} \quad (13)$$

t – É a espessura do elemento;

k – É o coeficiente de flambagem local do elemento; calculado de acordo com a Tabela 01 para elementos AA ou de acordo com a Tabela 02 para elementos AL;

υ – É o coeficiente de Poisson do aço, adotado igual a 0,3;

E - É o módulo de elasticidade do aço, definido igual a 200.000 MPa, segundo a norma ABNT NBR14672:2010;

σ - É a tensão normal de compressão, definida como:

a) Estado-limite último de escoamento da seção.

Para cada elemento totalmente ou parcialmente comprimido, σ é a máxima tensão de compressão, calculada para a seção efetiva, que ocorre quando a seção atinge o início do escoamento.

b) Estado-limite último de instabilidade da barra.

Se a barra for submetida à compressão, $\sigma = \chi f_y$, sendo χ o fator de redução da força axial de compressão resistente, associado a flambagem global.

- Elementos uniformemente comprimidos com enrijecedores de borda simples.

Além de servir como apoio, o enrijecedor, também se comporta como um elemento de borda livre (AL) submetido à instabilidade local. A ocorrência da instabilidade local do enrijecedor levará a instabilidade local na mesa enrijecida. Um enrijecedor de borda apropriado é aquele que tem condições de se comportar como um apoio a mesa. Portanto, ele precisa ter uma rigidez mínima, ou seja, um

momento de inércia mínimo, denominada pela NBR14672:2010 de I_a(SILVA; SILVA; PIERIN, 2014).

Se I_s, momento de inércia da seção bruta do enrijecedor, for menor que o momento de inércia mínimo, o comportamento da chapa da mesa será mais próximo ao de uma chapa livre, portanto, o valor do coeficiente de flambagem local de mesa, k, será pequeno aproximando-se da chapa livre. Quando não respeitado os limites de adequação, é necessário reduzir a largura efetiva do enrijecedor de borda. (SILVA; SILVA; PIERIN, 2014).

$$para\ \lambda_{p0} \leq 0{,}673:$$

$$b_{ef}=b \tag{14}$$

$$d_s = d_{ef} \tag{15}$$

$$para\ \lambda_{p0} > 0{,}673:$$

$$b_{ef,1} = \frac{I_s}{I_a}\frac{b_{ef}}{2} \leq \frac{b_{ef}}{2} \tag{16}$$

$$b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1} \tag{17}$$

$$d_s = \left(\frac{I_s}{I_a}\right) d_{ef} \leq d_{ef} \tag{18}$$

Onde:

$$\lambda_{p0} = \frac{b/t}{0{,}623(E/\sigma)^{0{,}5}} \tag{19}$$

Is – é o momento de inércia da seção bruta do enrijecedor em relação ao eixo que passa pelo seu centroide e é paralelo ao elemento a ser enrijecido. A região da dobra entre o enrijecedor e o elemento a ser enrijecido não deve ser considerada parte integrante do enrijecedor. Portanto, para o enrijecedor representado na Figura 11.

$$I_s = (td^3\ sen^2\theta)/12 \tag{20}$$

I_a – é o momento de inércia de referência do enrijecedor de borda, dado por:

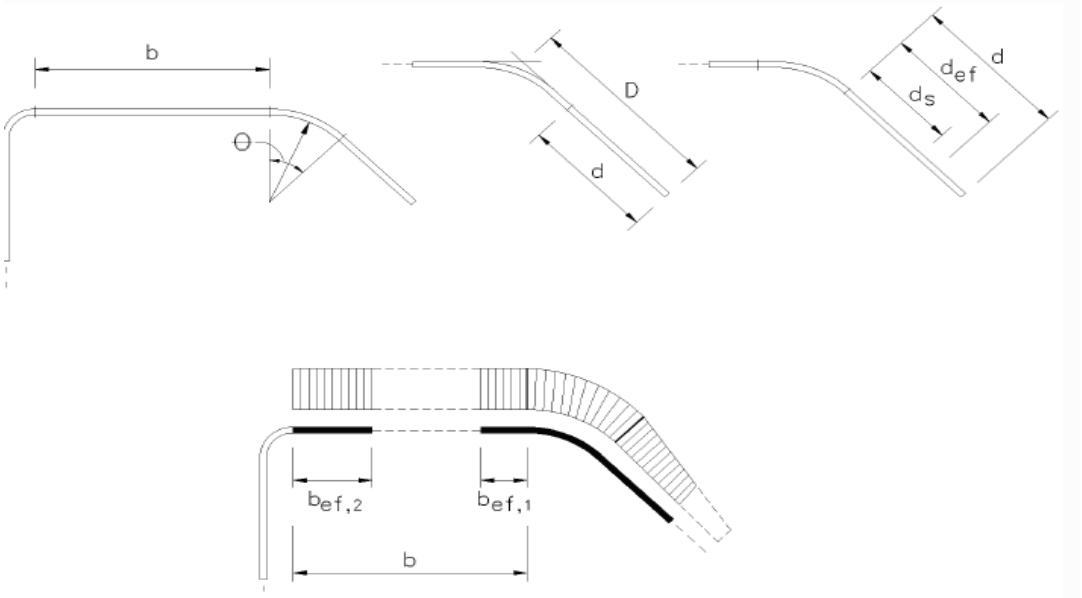
$$I_a = 399t^4(0{,}487\lambda_{p0} - 0{,}328)^3 \leq t^4(56\lambda_{p0} + 5) \quad (21)$$

σ – É a tensão normal de compressão;

b – É largura do elemento;

b_{ef} – É a largura do elemento, com o seguinte valor de k:

Figura 13 - Elemento uniformemente comprimido com enrijecedor de borda simples



Fonte: Adaptado ABNT NBR14672 (2010)

Para $D/b \leq 0{,}25$:

$$k = 3{,}57\ (I_s/I_a)^n + 0{,}43\ \leq 4 \text{ (considerar } I_s/I_a \leq 1) \quad (22)$$

Para $0{,}25 < D/b \leq 0{,}8$:

$$k = (4{,}82 - 5\,D/b)(I_s/I_a)^n + 0{,}43\ \leq 4 (\text{considerar } I_s/I_a\ \leq\ 1) \quad (23)$$

$$n = (0{,}582 - 0{,}122\lambda_{p0}) \geq 1/3 \quad (24)$$

$b_{ef,1}$ e $b_{ef,2}$ = são as parcelas da largura efetiva do elemento (Figura 13);

D – É a dimensão nominal do enrijecedor de borda (Figura 13);

d – É a largura do enrijecedor de borda (Figura 13);

d_{ef} – É a largura efetiva do enrijecedor (Figura 13);

d_s – É a largura efetiva reduzida do enrijecedor e adotada no cálculo das propriedades da seção efetiva do perfil (Figura 13);

θ - É o ângulo formado pelo elemento e o enrijecedor de borda, sendo 40° ≤ θ 140° (Figura 13).

2.4.6 Método da Seção Efetiva

Procurando simplificar o trabalho de cálculo das larguras efetivas, elemento por elemento, e considerar a interação entre os elementos planos que compõem uma mesma seção transversal, o Método da Seção Efetiva (MSE) reconhece o comportamento global da seção transversal da barra quando da flambagem local, destacando a interação entre os seus elementos planos (JAVARONI, 2015).

No MSE, a flambagem local é considerada por meio de propriedades geométricas efetivas da seção transversal das barras. O MSE é vantajoso em comparação com o MLE, devido à facilidade de se obter os valores da força axial de flambagem elástica, sem necessitar calcular elemento por elemento da seção transversal (COSTA, 2012).

A área efetiva do perfil é calculada conforme:

$$A_{ef} = A \; para \; \lambda_p \leq 0{,}776 \tag{25}$$

$$A_{ef} = A\left(1 - \frac{0{,}15}{\lambda_p^{0{,}8}}\right)\frac{1}{\lambda_p^{0{,}8}} \; para \; \lambda_p > 0{,}776 \tag{26}$$

Onde:

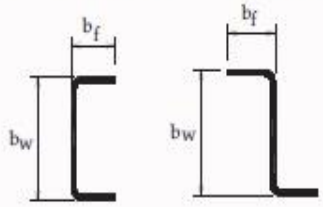
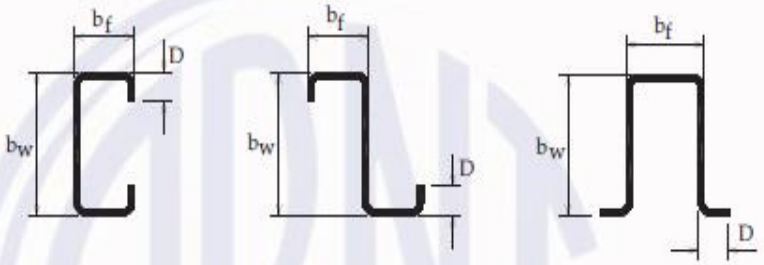
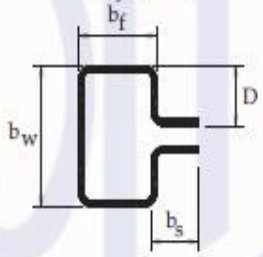
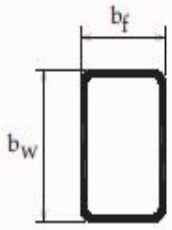
A é a área bruta da seção transversal;

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal da barra.

$$\lambda_p = \sqrt{\left(\frac{\chi A f_y}{N_l}\right)} \tag{27}$$

$$N_l = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-v^2)(b_w/t)^2} A \tag{28}$$

Tabela 03 - Coeficiente de flambagem kl para a seção completa em barras sob compressão

Caso a	Seção U simples e Seção Z simples  $k_t = 4{,}0 + 3{,}4\ \eta + 21{,}8\ \eta^2 - 174{,}3\ \eta^3 + 319{,}9\ \eta^4 - 237{,}6\ \eta^5 + 63{,}6\ \eta^6$ $(0{,}1 \leq \eta \leq 1{,}0)$
Caso b	Seção U enrijecido, Seção Z enrijecido e Seção cartola  $k_t = 6{,}8 - 5{,}8\ \eta + 9{,}2\ \eta^2 - 6{,}0\ \eta^3$ $(0{,}1 \leq \eta \leq 1{,}0$ e $0{,}1 \leq D/b_w \leq 0{,}3)$
Caso c	Seção *rack*  $k_t = 6{,}5 - 3{,}0\ \eta + 2{,}8\ \eta^2 - 1{,}6\ \eta^3$ $(0{,}1 \leq \eta \leq 1{,}0$; $0{,}1 \leq D/b_w \leq 0{,}3$ e $0{,}1 \leq b_s/b_w \leq 0{,}4)$
Caso d	Seção tubular retangular com solda de costura contínua (para seção tubular retangular formada por dois perfis U simples ou U enrijecido com solda de costura intermitente, k_t deve ser calculado para cada perfil isoladamente).  $k_t = 6{,}6 - 5{,}8\ \eta + 8{,}6\ \eta^2 - 5{,}4\ \eta^3$ $(0{,}1 \leq \eta \leq 1{,}0)$
NOTA 1 b_f, b_w, b_s e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado na Figura correspondente. NOTA 2 $\eta = b_f / b_w$.	

Fonte: ABNT NBR14672 (2010)

Os valores de flambagem local para a seção completa, k_l, podem ser calculados pelas expressões indicadas na Tabela 03**.**

2.4.7 Barras submetidas à força axial de compressão

Ainda segundo a NBR14672:2010, no dimensionamento deve ser atendida a seguinte condição:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \tag{29}$$

Onde:

$N_{c,Sd}$ - É a força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$ – É a força axial de compressão resistente de cálculo, tomado como o menor valor calculado a seguir:

- Flambagem Global por flexão, por torção ou por flexo-torção

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma \tag{30}$$

Onde:

γ - É o coeficiente de ponderação o qual tem valor de 1,20;

f_y - É a resistência ao escoamento do aço;

χ - É o fator de redução da força axial de compressão resistente associado à flambagem global, calculado conforme indicado a seguir.

$$para\ \lambda_0 \leq 1{,}5: \ \chi = 0{,}658^{\lambda_0^2} \tag{31}$$

$$para\ \lambda_0 > 1{,}5: \ \chi = \frac{0{,}877}{\lambda_0^{\,2}} \tag{32}$$

λ_0 - É o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global, dado por:

$$\lambda_0 = \left(\frac{A f_y}{N_e}\right)^{0{,}5} \tag{33}$$

A - É a área bruta da seção transversal da barra;

A_{ef} - É a área efetiva da seção transversal, calculada pelo MLE ou MSE;

N_e - É a força axial de flambagem global elástica, dado por:

- Seções Monossimétricas

A força axial de flambagem global elástica N_e de um perfil com seção monossimétrica, cujo eixo x é o eixo de simetria, é o menor valor dentre os obtidos por a) e b).

a) Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \tag{34}$$

b) Força axial de flambagem global elástica por flexo-torção:

$$Nexz = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2\left[(1-(x_0/r_0)^2\right]}\left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}\left[(1-(x_0/r_0)^2\right]}{(N_{ex}+N_{ez})^2}}\right] \tag{35}$$

Onde:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_x L_x)^2} \tag{36}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{{r_0}^2}\left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ\right] \tag{37}$$

Cw - É a constante de empenamento da seção;

E - É o módulo de elasticidade;

G - É o módulo de elasticidade transversal, adotado como 77000 MPa conforme ABNT NBR14672:2010;

J - É a constante de torção da seção;

$K_x L_x$ - É o comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo x;

$K_y L_y$ - É o comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo y;

$K_z L_z$ - É o comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo z, sendo K_z:

i. 1,0 quando ambas as extremidades da barra possuírem rotação em torno do eixo longitudinal impedida e empenamento livre, ou;

ii. 2,0 quando uma das extremidades da barra possuir rotação em torno do eixo longitudinal livre e, a outra extremidade, rotação e empenamentos impedidos.

r_0 - É o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, dado por:

$$r_0 = \sqrt{(r_x{}^2 + r_y{}^2 + x_0{}^2 + y_0{}^2)} \tag{38}$$

$r_x \; e \; r_y$ são os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inercia x e y, respectivamente;

$x_0 \; e \; y_0$ são as distâncias do centro de torção ao centroide, na direção dos eixos principais x e y, respectivamente;

Figura 14 - Fator de comprimento efetivo de flambagem

A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem	(a) 	(b) 	(c) 	(d) 	(e) 	(f) 
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio		Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres				

Fonte: ABNT NBR14672 (2010)

A carga de flambagem é influenciada pelas condições de vinculação usadas, é fundamental determinar um coeficiente adimensional K, conforme Figura 14, para cada condição de vinculação. Esse fator K é chamado, fator de comprimento efetivo de flambagem. O coeficiente K altera o comprimento da coluna avaliada (CASTELANI, 2012).

- Flambagem distorcional

Para as barras com seção transversal aberta sujeitas à flambagem distorcional, a força axial de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser calculada por:

$$N_{c,Rd} = \chi_{dist} A_{ef} f_y / \gamma \quad (39)$$

Onde:

γ - É o coeficiente de ponderação o qual tem valor de 1,20;

f_y - É a resistência ao escoamento do aço;

χ_{dist} - É o fator de redução da força axial de compressão resistente associado à flambagem distorcional, calculado conforme indicado a seguir:

$$para\ \lambda_{dist} \leq 0{,}561 :\ \chi_{dist} = 1 \quad (40)$$

$$para\ \lambda_{dist} > 0{,}561 :\ \chi_{dist} = \left(1 - \frac{0{,}25}{\lambda_{dist}^{1{,}2}}\right)\frac{1}{\lambda_{dist}^{1{,}2}} \quad (41)$$

Onde:

$\lambda_{dist} = \left(\frac{Af_y}{Ndist}\right)$ é o índice de esbeltez reduzido para a flambagem distorcional.

Quadro 01 – Limites para verificação da instabilidade por distorção

	b_w/t				
B_f/b_w	250	200	125	100	50
0,4	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08
0,6	0,03	0,04	0,06	0,06	0,15
0,8	0,05	0,06	0,08	0,10	0,22
1,0	0,06	0,07	0,12	0,15	0,27
1,2	0,06	0,07	0,12	0,15	0,27
1,4	0,06	0,08	0,12	0,15	0,27
1,6	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
1,8	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
2,0	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27

Fonte: ABNT NBR14672 (2010)

Para barras com seção U e Z enrijecido, se a relação D/bw for igual aos valores indicados no Quadro 01, a verificação da flambagem distorcional pode ser dispensada.

2.4.8 Barras submetidas à força axial de compressão pelo Método da Resistência Direta

O método da resistência (MRD) direta foi desenvolvido para facilitar o dimensionamento dos perfis formado a frio contornando as dificuldades existentes no método da largura efetiva e as limitações da seção efetiva. O MRD trata do dimensionamento de barras submetidas à compressão ou flexão simples e está localizado no anexo C da NBR14672:2010 (SALLES, 2017).

Assume-se neste método que os modos de flambagem local e distorcional podem ser previstos utilizando as tensões de flambagem local e distorcional elástica e as propriedades geométricas da seção transversal bruta da barra. Portanto, curvas de resistências devidamente ajustadas a partir de resultados experimentais devem ser utilizadas. Os resultados são coletados de vários pesquisadores e sua principal vantagem é permitir a interação entre a flambagem local e global em uma única expressão (JAVARONI, 2015).

Esse método fornece expressões para a determinação da carga crítica de flambagem, porém, necessita o conhecimento dos valores mínimos das forças axiais de flambagem elástica local e distorcional (N_l e N_{dist}). Para encontrar esses valores é necessário realizar uma análise geral de estabilidade elástica, que é apenas possível usando programas computacionais, como por exemplo, CUFSM. (SILVA; SILVA; PIERIN, 2014).

Conforme a NBR14672: 2010, para barras submetidas à compressão centrada o valor da força axial de compressão resistente, Ncrk, é o menor valor calculado para flambagem global, local e distorcional, $N_{c,Re}$, $N_{c,Rl}$, $N_{c,Rdist}$, respectivamente dividido por um coeficiente de ponderação igual 1,2. Calculado conforme:

- Flambagem Global

$$N_{c,Re} = \left(0{,}658^{\lambda_0{}^2}\right) A f_y \qquad \text{para } \lambda_0 \leq 1{,}5 \tag{42}$$

$$N_{c,Re} = \left(\frac{0{,}658}{\lambda_0{}^2}\right) A f_y \qquad \text{para } \lambda_0 > 1{,}5 \tag{43}$$

Onde:

$$\lambda_0 = \sqrt{\left(\frac{A f_y}{N_e}\right)} \tag{44}$$

N_e - É a força axial de flambagem global elástica;

λ_0 - É o índice de esbeltez reduzido associado a flambagem global;

A - É a área bruta da seção transversal;

f_y - É a resistência ao escoamento do aço;

$N_{c,Re}$ - É o valor característico da força axial de compressão resistente, associado a flambagem global.

- Flambagem Local

$$N_{c,Rl} = N_{c,Re} \qquad \text{para } \lambda_l \leq 0{,}776 \tag{45}$$

$$N_{c,Rl} = \left(1 - \frac{0{,}15}{\lambda_l{}^{0{,}8}}\right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_l{}^{0{,}8}} \quad para\ \lambda_l > 0{,}776 \tag{46}$$

Onde:

$$\lambda_l = \sqrt{\left(\frac{N_{c,Re}}{N_l}\right)}$$

N_l - É a força axial de flambagem elástica local;

λ_l - É o índice de esbeltez reduzido associado a flambagem local;

$N_{c,Rl}$ é o valor característico da força axial de compressão resistente, associado a flambagem local.

- Flambagem Distorcional

$$N_{c,Rl} = A f_y \quad para\ \lambda_{dist} \leq 0{,}561 \tag{47}$$

$$N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right)\frac{Af_y}{\lambda_{dist}^{1,2}} \quad para\ \lambda_{dist} > 0,561 \tag{48}$$

- Onde:

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\left(\frac{Af_y}{N_{dist}}\right)} \tag{49}$$

N_{dist} - É a força axial de flambagem elástica distorcional;

λ_{dist} - É o índice de esbeltez reduzido associado a flambagem distorcional;

A - É a área bruta da seção transversal;

f_y - É a resistência ao escoamento do aço;

$N_{c,Rl}$ - É o valor característico da força axial de compressão resistente, associado a flambagem distorcional.

2.5 PROGRAMA COMPUTACIONAL CUFSM

O CUFSM é um programa via Método das Faixas Finitas, criado com a função de analisar a estabilidade elástica de perfis formados a frio. O programa examina uma variedade de comprimentos para a barra, em que a tensão crítica e a equivalente configuração deformada da barra indicam o modo de flambagem para cada comprimento. Como resultado é obtido a curva de flambagem com os modos de flambagem apresentados, os quais podem ser usados para um melhor entendimento do comportamento do perfil (CHODRAUI, 2003).

Para efeito de projeto utilizando as seções analisadas pelo programa (em que fornece-se como resultado apenas tensões críticas de flambagem elástica), os valores devem ser corrigidos por curvas de resistência para a obtenção dos esforços resistentes da barra analisada (CHODRAUI, 2003).

Para o uso do programa CUFSM, como uma fácil ferramenta para realizar a análise elástica de uma seção e viabilizar a aplicação do método da resistência direta (MRD), os valores que devem ser obtidos do programa são N_l e N_{dist}, correspondentes à força axial de flambagem elástica, relativos ao modo local e distorcional (CHODRAUI, 2006).

Para encontrar os valores de N_l e N_{dist} é necessário multiplicar a área bruta da seção e obter a tensão crítica de flambagem elástica referente ao modo analisado

conforme equação 49. Essa tensão é obtida no gráfico fornecido como resposta do programa.

$$N_{l \text{ ou } dist} = A\sigma_{l \text{ ou } dist} \quad (50)$$

Onde:

N_l - É a força axial de flambagem elástica local;

N_{dist} - É a força axial de flambagem elástica distorcional;

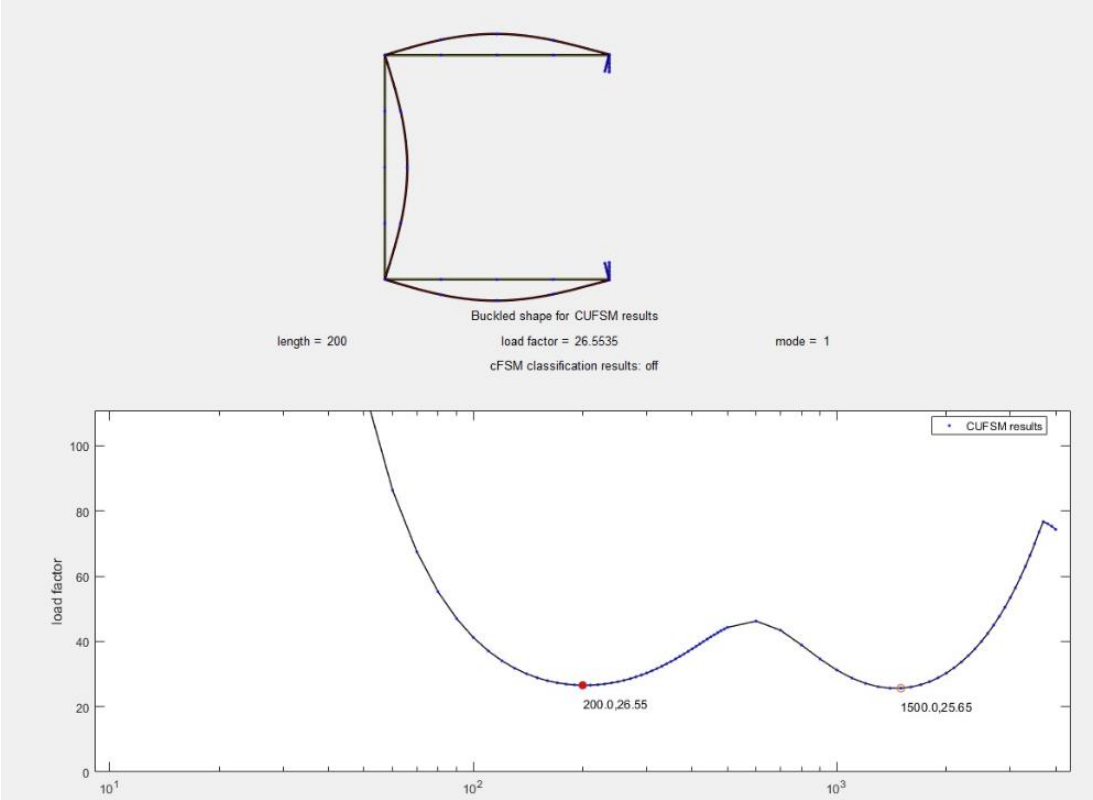
σ_l - É a tensão crítica de flambagem elástica local;

σ_{dist} - É a tensão crítica de flambagem elástica distorcional;

A - É a área bruta da seção transversal.

A Figura 15 ilustra um exemplo de saída de resultados para um perfil Ue (200x200x30) #1.2mm submetido a compressão no qual se apresenta o gráfico de tensão e o comprimento de meia onda. Observa-se no gráfico a tensão crítica para o modo local é de 26,55.

Figura 15 - Exemplo da análise de flambagem elástica no CUFSM



Fonte: O autor (2018)

2.6 TRABALHOS CORRELATOS

O trabalho de Doutorado de Chodraui (2006) analisa os perfis formados a frio com seção transversal tipo U simples, enrijecido e cantoneiras submetidos à compressão. Ele analisa os modos de fenômenos globais em três métodos: experimental, numérico não linear e Método da Resistência Direta. Para análise numérica foi utilizado o programa ANSYS para verificação por método dos elementos finitos. Foram realizados testes em laboratório para análise experimental e utilizado o programa CUFSM para retiras as cargas de flambagem elásticas para então aplicar o método da resistência direta conforme norma NBR14672: 2010.

O trabalho de mestrado de Chodraui (2003) analisa apenas a flambagem por distorção de variados tipos de perfis formados a frio com diferentes tipos de enrijecedores de borda. Ele compara os resultados encontrados por modelagem pelo programa ANSYS usando o método dos elementos (MEF) finitos com o método da resistência direta utilizando o programa CUFSM para encontrar a flambagem elástica por distorção via método das faixas finitas (MFF). Chodraui utiliza uma variedade grande de perfis U enrijecidos, aumentando sua relação mesa/alma para verificação da flambagem distorcional.

O trabalho de Castelani (2012) apresenta uma metodologia de otimização de perfis formados a frio. O dimensionamento utilizado foi o Método da Resistência Direta (MRD). São utilizadas as seções transversais U simples e enrijecidos para dimensionamento no trabalho. Castelani também usa o programa CUFSM para obter as cargas críticas de flambagem elástica via faixas finitas. Ao contrário dos trabalhos de Chodraui (2003), Castelani (2012) analisa os perfis submetidos a compressão e também a flexão.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente capítulo descreve as etapas e decisões relativas ao desenvolvimento do dimensionamento de barras comprimidas pela ABNT NBR14672: 2010.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram realizados procedimentos que estão descritos a seguir:

- Pesquisa bibliográfica e documental;
- Criação de modelos de estudo;
- Estudo dos métodos de dimensionamento conforme ABNT NBR14672: 2010;
- Aplicação dos procedimentos de norma na determinação da carga resistente de compressão nos modelos de estudo.

3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E EXPERIMENTAL

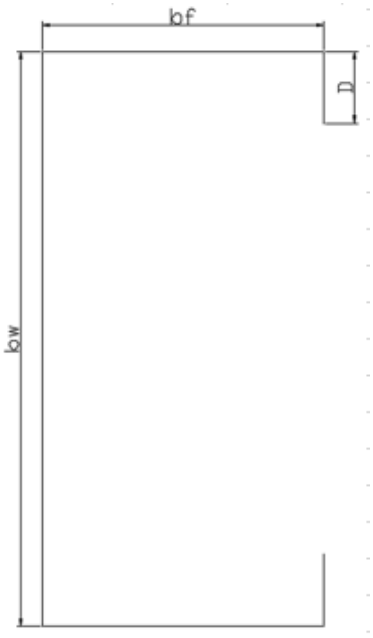
Esta etapa do procedimento teve como objetivo adquirir o embasamento teórico para a execução do trabalho. As pesquisas bibliográfica e documental foram realizadas por meio de livros, publicações científicas (teses e artigos), além da norma brasileira de dimensionamento de perfis formados a frio ABNT NBR14672: 2010.

3.2 MODELOS DE ESTUDO

Doze dos quinzes perfis utilizados para estudo foram retirados da NBR6355:2003 e três deles foram criados, com o software CUFSM, para uma melhor representação do modo distorcional. A escolha por esses três perfis é pelo fato deles possuírem relação mesa/alma grande em comparação com os perfis comerciais e esses três perfis também são utilizados por Chodraui (2003). No quadro 02 são apresentados todos os perfis que foram utilizados no estudo do trabalho.

Quadro 02 – Perfis utilizados no trabalho

Perfil Ue
(bw x bf x D)
(50 x 25 x 10)
(75 x 40 x 15)
(100 x 40 x 17)
(100 x 50 x 17)
(125 x 50 x 17)
(150 x 60 x 20)
(200 x 75 x 20)
(200 x 100 x25)
(250 x 85 x 25)
(250 x 100 x 25)
(300 x 85 x 25)
(300 x 100 x 25)
(200 x 180 x 10)
(150 x 150 x 15)
(200 x 200 x 30)



Fonte: O autor (2018)

Os três perfis criados para uma análise de flambagem distorcional são os perfis (200x180x10), (150x150x15) e (200x200x30). Todos os perfis utilizados nesse trabalho tiveram suas espessuras variadas em 1,2 mm, 2,00 mm, 2,65 mm e 3,75 mm.

Os comprimentos de barras também foram variados em quatro comprimentos que são: 500 mm, 1000 mm, 2000 m e 3000 mm, de modo a se enquadrar dentro de valores próximos aos padrões comerciais.

A condição de vinculação utilizada no trabalho foi de barras bi rotuladas, portando o coeficiente K =1 o que comumente acontece em estruturas montadas em perfis formados a frio.

O módulo de elasticidade (E) e a resistência característica ao escoamento do aço (fy) são respectivamente 200.000 MPa e 300 MPa, que são os valores padrão encontrados na literatura correlata. Essas características são utilizadas para todos os exemplos estudados.

3.3 DIMENSIONAMENTO PELA ABNT NBR14672:2010

Para encontrar a carga crítica de flambagem dos perfis estudados, foi criada uma planilha no *software Excel* para dimensionamento pelo Método da Largura

Efetiva (MLE), Método da Seção Efetiva (MSE) e Método da Resistência Direta (MRD).

As propriedades geométricas dos perfis utilizados no trabalho e as tensões de flambagem crítica local (σ_l) e distorcional (σ_{dist}), os quais foram retirados utilizando o *software* CUFSM estão no Anexo A – Propriedades Geométricas.

Embora, no trabalho, tenha sido utilizado o CUFSM, nada impede que sejam usados outros meios para obtenção das cargas elásticas de flambagem, como elementos finitos ou outro software de faixas finitas.

A quantidade de faixas finitas utilizadas para analise de flambagem elástica é padrão do programa CUFSM, portanto não é necessário fazer uma análise de convergência.

Foram desenvolvidos gráficos em linha para demonstração dos resultados no capítulo a seguir.

4 RESULTADOS

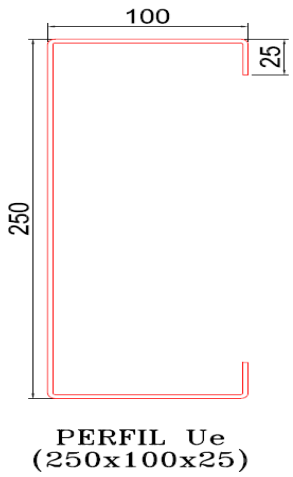
Nesse capítulo será representado um exemplo de cálculo para um dos perfis estudados e em seguida serão mostrados os resultados em quadros e gráficos com comentários.

4.1 MEMORIAL DE CÁLCULO ABNT NBR14672:2010 PARA BARRAS SOB COMPRESSÃO

Com os dados das propriedades geométricas dos perfis Ue retirados da NBR6355, foram dimensionadas barras submetidas à compressão via norma ABNT NBR14672:2010 seguindo os três métodos contemplados nesta norma, a saber: Método da Largura Efetiva (MLE), Método da Seção Efetiva (MSE) e Método da Resistência Direta (MRD).

Foi desenvolvida uma planilha no *software Excel* para o processo de dimensionamento via norma para todos os perfis referentes a esse estudo. Porém, para demonstração de como ocorre o dimensionamento pelos três métodos da NBR14672:2010, esse memorial de cálculo apresenta o dimensionamento do perfil da Figura 16 com espessura de 2,65mm. O comprimento da barra “L” será 2000 mm e os demais dados para os cálculos foram retirados do Anexo A – Propriedades Geométricas.

Figura 16 - Perfil Ue para demonstração de dimensionamento



Fonte: O autor (2018)

4.1.1 Flambagem Global por flexão, torção ou flexo-torção

- Cálculo da força axial de flambagem global N_e

Como a seção transversal possui um único eixo de simetria, o valor da força axial de flambagem global elástica N_e será obtido entre o menor resultado de N_{ey} e N_{exz}.

Utilizando as equações 34, 35, 36 e 37 e os valores do fator de comprimento efetivo de flambagem (K) para pilares bi rotulados obtêm-se:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 x\ 200.000x12531320}{(1x2000)^2} = 6195{,}10\ kN$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 x\ 200.000x1694400}{(1x2000)^2} = 835{,}02kN$$

$$N_{ez} = \frac{1}{128{,}14^2}\left[\frac{\pi^2 x\ 200.000x\ 2{,}0873x10^{10}}{(1x2000)^2} + 7700x2994\right] = 660{,}77\ kN$$

$$N_{exz} = \frac{6183{,}96 + 641{,}35}{2\left[(1-(72{,}77/128{,}14)^2\right]}\left[1 - \sqrt{1 - \frac{4x6183{,}96x641{,}35\left[(1-(72{,}77/128{,}14)^2\right]}{(6183{,}96+641{,}35)^2}}\right]$$

$$N_{exz} = 637{,}19\ kN$$

Portanto, N_e = menor (836,15; 619,14) → N_e = 619,14 kN

- Cálculo do fator de redução associado a flambagem global
  - $\lambda_0 = \sqrt{\frac{1278{,}8\ x\ 0{,}3}{619{,}14}} = 0{,}776$
  - $\chi = 0{,}658^{0{,}787^2} = 0{,}777$

$$\sigma = 0{,}777\ x\ 300 = 233{,}16\ MPa$$

4.1.2 Cálculo da área efetiva pelo MLE

- Enrijecedor

O enrijecedor nesse caso é um elemento com uma borda apoiada e outra livre, portanto, um elemento AL. Verificando a Tabela 02, concluímos que o coeficiente k, possui o valor de 0,43.

Analisando a esbeltez do elemento, conforme Equação:

$$\lambda_p = \frac{(25 - 2x2{,}65)/2{,}65}{0{,}95x\sqrt{(0{,}43x20000/23{,}15)}} = 0{,}405$$

Como λ_p < 0,673, o enrijecedor não está sujeito a flambagem local e sua largura efetiva é a própria largura plana do elemento.

- Alma

A alma da seção da barra é um elemento plano com as duas bordas apoiadas, portanto, um elemento AA. Verificando a Tabela 01, concluímos que o coeficiente k=4,0.

$$\lambda_p = \frac{(250 - 4x2{,}65)/2{,}65}{0{,}95x\sqrt{(4{,}0x20000/23{,}15)}} = 1{,}623$$

Como λ_p > 0,673 deve se calcular a largura efetiva do elemento.

$$\lambda_{p0} = \frac{(100 - 4x2{,}65)/2{,}65}{0{,}623x\sqrt{(4{,}0x20000/23{,}15)}} = 1{,}739$$

- Mesa

A mesa da seção transversal da barra é um elemento plano fortalecido por um enrijecedor de borda, em que o seu coeficiente de flambagem de chapa deve ser calculado em função das características do enrijecedor.

$$\lambda_{p0} = \frac{(100 - 4x2{,}65)/2{,}65}{0{,}623x\sqrt{(4{,}0x20000/23{,}15)}} = 1{,}739$$

Como λ_{p0} > 0,673 o enrijecedor é necessário.

Necessita calcular o momento de inércia I_s e o momento adequado I_a do enrijecedor, usando as equações 20 e 21 respectivamente.

$$I_s = (2{,}65(25 - 2\ x\ 2{,}65)^3\ sen^2 90)/12 = 1688\ mm^4$$

$$I_{a1} = 3992{,}65^4(0{,}487x1{,}739 - 0{,}328)^3 = 3690{,}75\ mm^4$$

$$I_{a2} = 2{,}65^4(56\ x\ 1{,}739 + 5) = 5352{,}69\ \ mm^4$$

Portanto, I_a = menor (3319; 5049) → $I_a = 3690{,}74\ mm^4$

$$25/(100 - 4\ x\ 2{,}65) = 0{,}279$$

Como 0,280 é maior que 0,25, o cálculo do coeficiente de flambagem de chapa para a mesa é obtido por meio da equação 20.

$$n = (0{,}582 - 0{,}122\ x\ 1{,}739) = 0{,}35$$

$$k = (4{,}82 - 5\ x\ 0{,}28)\ x\ \left(\frac{1688}{2507}\right)^{0{,}37} + 0{,}43 = 3{,}019$$

Como k < 4, calcula-se o parâmetro de esbeltez para a mesa pela equação 9.

$$\lambda_p = \frac{(100 - 4x2{,}65)/2{,}65}{0{,}95x\sqrt{(3{,}38x20000/23{,}15)}} = 0{,}6977$$

Como λ_p > 0,673, a largura efetiva é :

$$bef = \ (100 - 4x2{,}65)\ x\frac{1 - \frac{0{,}22}{0{,}6842}}{0{,}6842} = 87, mm$$

Portanto a área efetiva do perfil é:

$$Aef = 1278{,}8 - \ [(239{,}4 - 127{,}48) - (89{,}4 - 88{,}64)x2]\ x\ 2{,}65 = 973{,}54\ mm^{\ 2}$$

4.1.3 Cálculo da área efetiva pelo MSE

Para o cálculo da seção efetiva é necessário a Tabela 03 para obter o coeficiente local para a seção completa.

$$\eta = 100/250 = 0{,}4$$

$$kl = 6{,}8 - 5{,}8\ x\ 0{,}4 + 9{,}2\ x\ 0{,}4^2 - 6{,}0\ x 0{,}4^3 = 5{,}568$$

Para o cálculo da força de flambagem local é necessário a equação 28

$$N_l = 5{,}568 * \frac{\pi^2 x\ 20000}{12\ x\ (1 - 0{,}3^2) x\ \left(\frac{250}{2{,}65}\right)^2} = 144{,}61\ kN$$

$$\lambda_p = \sqrt{\left(\frac{1278{,}8\ x\ 23{,}15}{144{,}2}\right)} = 1{,}43$$

Como λ_p > 0,776, a área efetiva é calculada pela equação 26

$$Aef = 1278{,}8\left(1 - \frac{0{,}15}{1{,}43^{0{,}8}}\right) x\ \frac{1}{1{,}43^{0{,}8}} = 852{,}1\ mm^2$$

4.1.4 Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo

- Distorcional

Analisando o Quadro 01, pode-se determinar que não é preciso analisar a flambagem distorcional para esse perfil.

$$\frac{D}{bw} = \frac{25}{250} = 0{,}1$$

$$\frac{100}{250} = 0{,}4\ e\ \frac{250}{2{,}65} = 94 \rightarrow 0{,}045$$

$$0{,}1 > 0{,}045$$

Não é necessário o cálculo da flambagem distorcional.

- Global

Método da Largura Efetiva (MLE)

$$N_{c,Rd} = \frac{0,772\ x\ 9,7529\ x\ 30}{1,2} = \ 188,12\ kN$$

Método da Seção Efetiva (MSE)

$$N_{c,Rd} = \frac{0,772\ x\ 8,521\ x\ 30}{1,2} = 164,36\ kN$$

4.1.5 Método da Resistência Direta

- Flambagem global

Como a seção transversal possui um único eixo de simetria, o valor da força axial de flambagem global elástica N_e será obtido entre o menor resultado de N_{ey} e N_{exz}.

Utilizando as equações 34, 35, 36 e 37 e os valores do fator de comprimento efetivo de flambagem (K) para pilares biapoiados obtêm-se:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 x\ 200.000x12531320}{(1x2000)^2} = 6195,10\ kN$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 x\ 200.000x1694400}{(1x2000)^2} = 835,02kN$$

$$N_{ez} = \frac{1}{128,14^2}\left[\frac{\pi^2 x\ 200.000x\ 2,0873x10^{10}}{(1x2000)^2} + 7700x2994\right] = 660,77\ kN$$

$$N_{exz} = \frac{6183,96 + 641,35}{2\left[(1-(72,77/128,14)^2\right]}\left[1 - \sqrt{1 - \frac{4x6183,96x641,35\left[(1-(72,77/128,14)^2\right]}{(6183,96+641,35)^2}}\right]$$

$$N_{exz} = 637,19\ kN$$

Portanto, N_e = menor (836,15; 619,14) → N_e = 619,14 kN

Analisando o índice de esbeltez reduzido a flambagem global

$$\lambda_0 = \sqrt{\left(\frac{12{,}79x30}{619{,}14}\right)} = 0{,}776$$

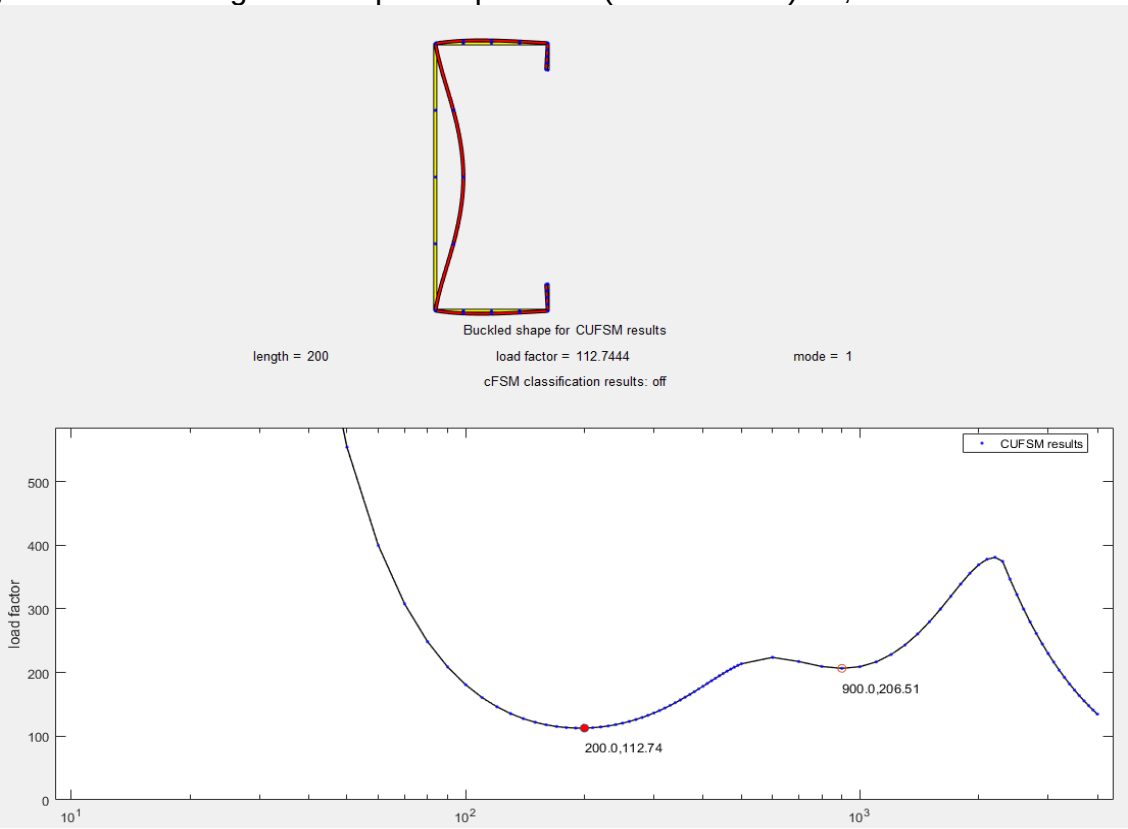
Como o λ_0 ≤ 1,5 o valor característico da força axial de compressão associado a flambagem global é calculado conforme:

$$N_{c,Re} = \left(0{,}658^{0{,}776^2}\right) 12{,}79\ x\ 30 = 298{,}21\ kN$$

- Flambagem Local

É necessário retirar o valor da tensão crítica de flambagem local (Figura 17), a qual, multiplicada pela área da seção transversal da barra, fornece o valor da força desejada.

Figura 17 - Flambagem local para o perfil Ue (250x100x25) #2,65



Fonte: O autor (2018)

A tensão crítica de flambagem local conforme o CUFSM é de 112,74 MPa. Conforme equação 50, N_l é igual:

$$N_l = 12{,}79\ x\ 11{,}274 = 144{,}19\ kN$$

Calculando o índice de esbeltez reduzido associado a flambagem local:

$$\lambda_l = \sqrt{\left(\frac{298{,}21}{144{,}19}\right)} = 1{,}438$$

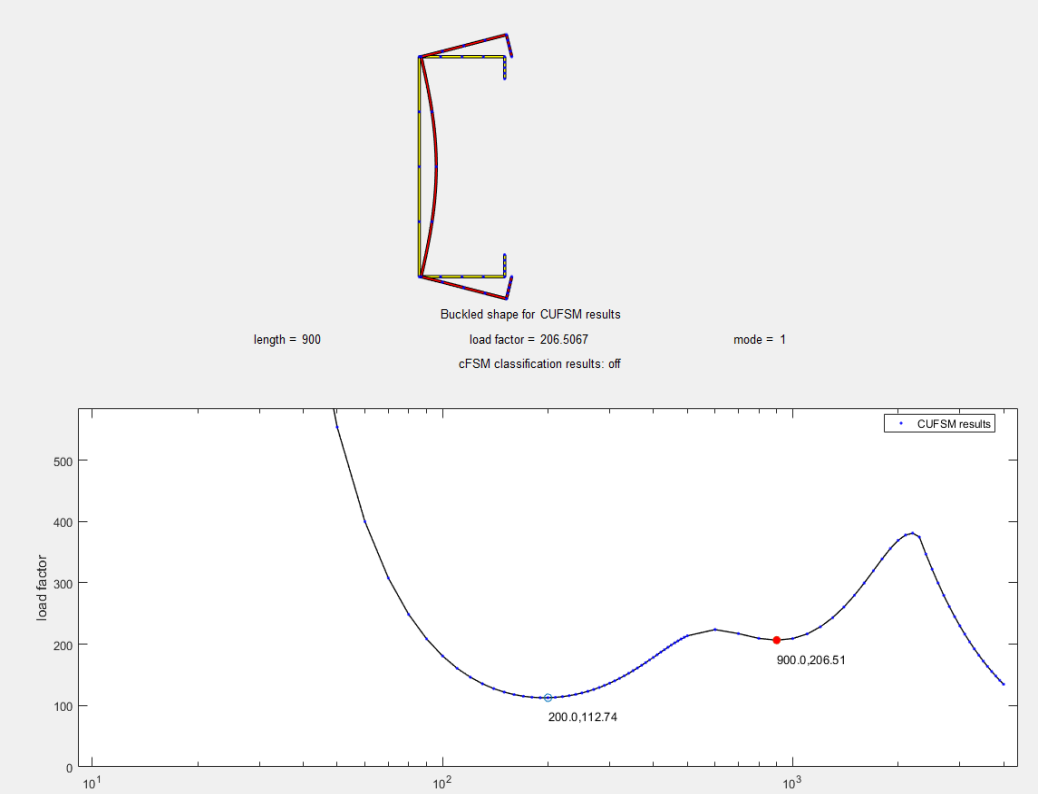
Como o λ_l > 0,776, o valor de $N_{c,Rl}$ será obtido por:

$$N_{c,Rl} = \left(1 - \frac{0{,}15}{1{,}438^{0{,}8}}\right)\frac{298{,}21}{1{,}438^{0{,}8}} = 197{,}98\ kN$$

- Flambagem distorcional

É necessário retirar o valor da tensão crítica de flambagem distorcional (Figura 18), a qual, multiplicada pela área da seção transversal da barra, fornece o valor da força desejada.

Figura 18 - Flambagem distorcional para o perfil Ue (250x100x25) #2,65



Fonte: O autor (2018)

A tensão crítica de flambagem distorcional conforme o CUFSM é de 206,51 MPa. Conforme equação 50, N_{dist} é igual:

$$N_{dist} = 12{,}79\ x\ 20{,}651 = 264{,}13\ kN$$

Calculando o índice de esbeltez reduzido associado a flambagem distorcional:

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\left(\frac{12{,}79\ x\ 30}{264{,}13}\right)} = 1{,}21$$

Como o λ_{dist} > 0,561 o valor de $N_{c,Rdist}$ será obtido por:

$$N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0{,}25}{1{,}21^{1{,}2}}\right)\frac{12{,}79\ x\ 30}{1{,}21^{1{,}2}} = 245{,}39\ kN$$

- Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo

Portanto, $N_{c,Rk}$ = menor (298,21; 197,98; 245,39) -> $N_{c,Rk}$ = 197,98 kN

Dessa forma, a força axial de compressão resistente de cálculo é obtida por:

$$N_{c,Rk} = \frac{197{,}98}{1{,}2} = 164{,}99\ kN$$

4.2 CARGAS RESISTENTES ÚLTIMAS DE COMPRESSÃO NOS PERFIS

Nos quadros a seguir são representadas todas as forças críticas de flambagem (Ncrk) para os perfis estudados variando o comprimento da barra (L) e suas espessuras (t). Os modos de flambagem críticos também estão representados nas tabeles como: global (G), local (L) e distorcional (D).

Quadro 03 – Perfis com espessura 1,2mm e comprimento de barra 500mm

t = 1,2 mm	L = 500 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	26,51	G+L	26,58	G	26,58	G
(75 x 40 x 15)	42,1	G+L	39,48	G+L	39,42	G+L
(100 x 40 x 17)	43,56	G+L	38,87	G+L	38,87	G+L
(100 x 50 x 17)	45,9	G+L	42,6	G+L	42,56	G+L
(125 x 50 x 17)	46,8	G+L	41,07	G+L	41,07	G+L
(150 x 60 x 20)	50,75	G+L	43,8	G+L	44,23	G+L
(200 x 75 x 20)	53,69	G+L	45,34	G+L	46,64	G+L

(200 x 100 x25)	56,49	G+L	52,23	G+L	53,37	G+L
(250 x 85 x 25)	55,73	G+L	46,8	G+L	46,85	G+L
(250 x 100 x 25)	56,86	G+L	49,71	G+L	49,73	G+L
(300 x 85 x 25)	55,94	G+L	45,54	G+L	45,84	G+L
(300 x 100 x 25)	57,09	G+L	48,07	G+L	48,47	G+L
(200 x 180 x 10)	32,24	D	32,24	D	32,24	D
(150 x 150 x 15)	30,56	D	30,56	D	30,56	D
(200 x 200 x 30)	55,07	G+L	62,75	D	62,74	D

Fonte: O autor (2018)

Quadro 04 – Perfis com espessura 1,2mm e comprimento de barra 1000mm

t = 1,2 mm	L = 1000 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	16,61	G	16,61	G	16,61	G
(75 x 40 x 15)	31,5	G+L	31,6	G+L	31,55	G+L
(100 x 40 x 17)	36,78	G+L	33,26	G+L	33,26	G+L
(100 x 50 x 17)	41,12	G+L	37,11	G+L	37,07	G+L
(125 x 50 x 17)	41,85	G+L	36,74	G+L	36,74	G+L
(150 x 60 x 20)	47,14	G+L	40,54	G+L	40,93	G+L
(200 x 75 x 20)	51,22	G+L	43,12	G+L	44,36	G+L
(200 x 100 x25)	54,64	G+L	50,27	G+L	51,36	G+L
(250 x 85 x 25)	54,07	G+L	45,21	G+L	45,25	G+L
(250 x 100 x 25)	55,39	G+L	48,24	G+L	48,26	G+L
(300 x 85 x 25)	54,44	G+L	44,15	G+L	44,44	G+L
(300 x 100 x 25)	55,81	G+L	46,85	G+L	47,24	G+L
(200 x 180 x 10)	32,24	D	32,24	D	32,24	D
(150 x 150 x 15)	30,56	D	30,56	D	30,56	D
(200 x 200 x 30)	53,62	G+L	62,74	D	62,74	D

Fonte: O autor (2018)

Quadro 05 – Perfis com espessura 1,2mm e comprimento de barra 2000mm

t = 1,2 mm	L = 2000 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	4,44	G	4,44	G	4,44	G
(75 x 40 x 15)	12,39	G	12,39	G	12,39	G
(100 x 40 x 17)	17,64	G+L	18,7	G+L	18,7	G+L
(100 x 50 x 17)	21,37	G+L	21,91	G+L	21,89	G+L
(125 x 50 x 17)	25,54	G+L	23,91	G+L	23,92	G+L
(150 x 60 x 20)	36,15	G+L	29,92	G+L	30,2	G+L
(200 x 75 x 20)	42,45	G+L	35,36	G+L	36,36	G+L
(200 x 100 x25)	47,83	G+L	43,16	G+L	44,09	G+L
(250 x 85 x 25)	47,89	G+L	39,39	G+L	39,43	G+L
(250 x 100 x 25)	49,89	G+L	42,8	G+L	42,82	G+L

(300 x 85 x 25)	48,8	G+L	38,99	G+L	39,24	G+L
(300 x 100 x 25)	51	G+L	42,27	G+L	42,62	G+L
(200 x 180 x 10)	32,24	D	32,24	D	32,24	D
(150 x 150 x 15)	30,56	D	30,56	D	30,56	D
(200 x 200 x 30)	48,25	G+L	60,03	G+L	59,86	G+L

Fonte: O autor (2018)

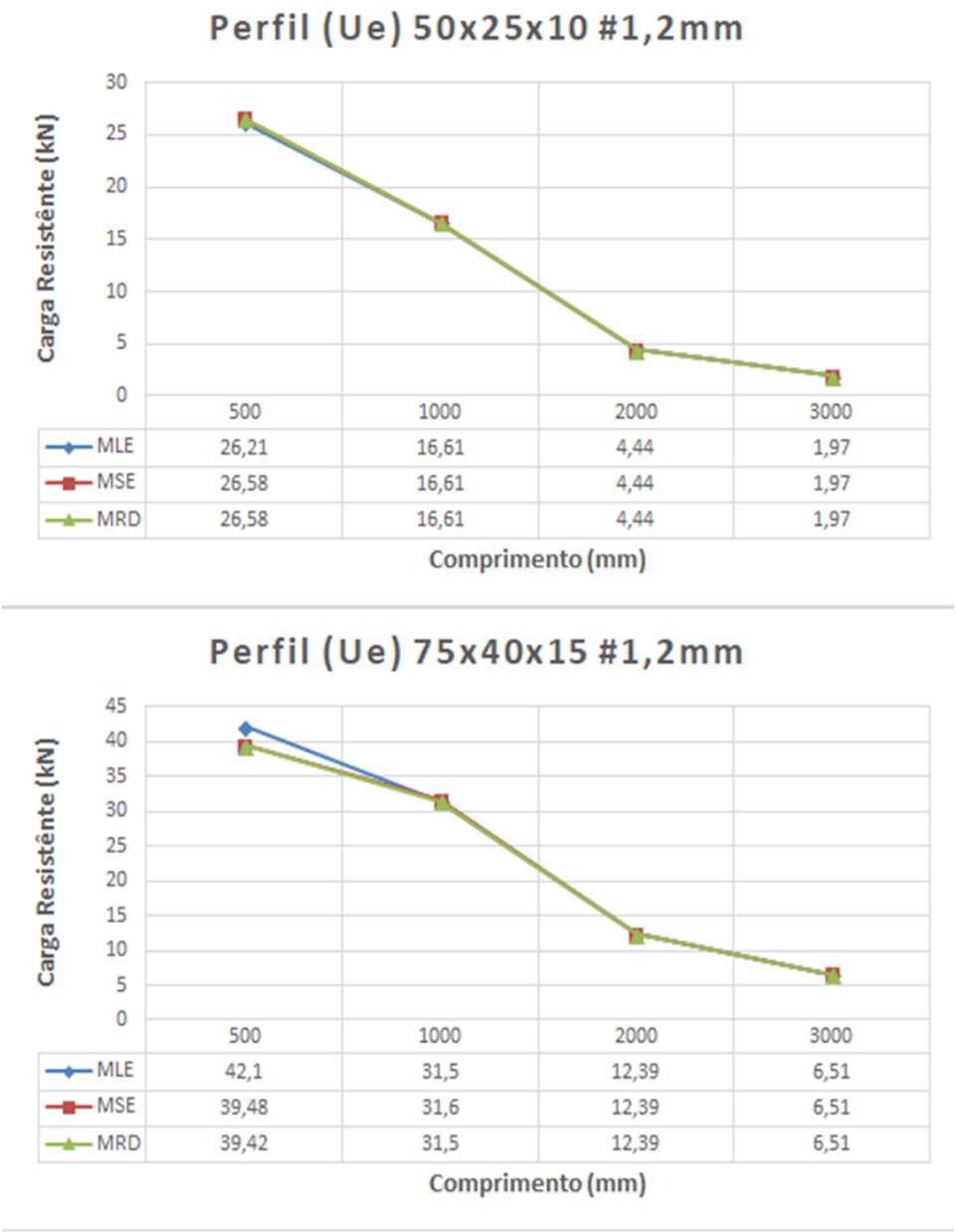
Quadro 06 – Perfis com espessura 1,2mm e comprimento de barra 3000mm

t = 1,2 mm	L = 3000 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	1,97	G	1,97	G	1,97	G
(75 x 40 x 15)	6,51	G	6,51	G	6,51	G
(100 x 40 x 17)	9,4	G	9,4	G	9,4	G
(100 x 50 x 17)	11,22	G	11,22	G	11,22	G
(125 x 50 x 17)	13,6	G+L	14,52	G+L	14,52	G+L
(150 x 60 x 20)	19,98	G+L	19,03	G+L	19,2	G+L
(200 x 75 x 20)	31,04	G+L	25,51	G+L	26,21	G+L
(200 x 100 x25)	38,24	G+L	33,51	G+L	34,22	G+L
(250 x 85 x 25)	38,98	G+L	31,32	G+L	31,38	G+L
(250 x 100 x 25)	41,87	G+L	35,08	G+L	35,1	G+L
(300 x 85 x 25)	40,07	G+L	31,67	G+L	31,88	G+L
(300 x 100 x 25)	43,87	G+L	35,63	G+L	35,92	G+L
(200 x 180 x 10)	32,24	D	32,24	D	32,24	D
(150 x 150 x 15)	28,15	G+L	30,56	D	24,83	G+L
(200 x 200 x 30)	40,65	G+L	48,93	G+L	48,79	G+L

Fonte: O autor (2018)

Nos perfis da NBR:6355:2003 que possuem espessuras de 1,2mm é interessante perceber que o Método da Largura Efetiva (MLE) tem maiores forças críticas de flambagem conforme a seção transversal vai aumentando, na figura 19 são representados dois gráficos representando essa variação. Os demais gráficos estão no Apêndice A – Perfis Ue.

Figura 19 - Gráficos de dois perfis com 1,2 mm de espessura



Fonte: O autor (2018)

Quadro 07 – Perfis com espessura 2,00mm e comprimento de barra 500mm

t = 2,00 mm	L = 500 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	42,51	G	42,51	G	42,51	G
(75 x 40 x 15)	76,69	G	76,69	G	76,69	G
(100 x 40 x 17)	85,81	G+L	88,88	G+L	88,69	G+L
(100 x 50 x 17)	95,82	G+L	97,69	G+L	97,48	G+L
(125 x 50 x 17)	99,48	G+L	95,64	G+L	95,48	G+L

(150 x 60 x 20)	114,36	D	103,26	G+L	104,14	G+L
(200 x 75 x 20)	118,76	D	108,36	G+L	111,58	G+L
(200 x 100 x25)	136,27	D	124,85	G+L	127,29	G+L
(250 x 85 x 25)	127,24	D	112,8	G+L	112,79	G+L
(250 x 100 x 25)	133,88	D	119,64	G+L	119,61	G+L
(300 x 85 x 25)	136,88	G+L	110,14	G+L	110,74	G+L
(300 x 100 x 25)	142,09	G+L	116,35	G+L	117,22	G+L
(200 x 180 x 10)	76,32	D	76,32	D	76,32	D
(150 x 150 x 15)	69,69	D	69,68	D	69,68	D
(200 x 200 x 30)	138,44	D	138,44	D	138,44	D

Fonte: O autor (2018)

Quadro 08 – Perfis com espessura 2,00mm e comprimento de barra 1000mm

t = 2,00 mm	L = 1000 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	24,9	G	24,9	G	24,9	G
(75 x 40 x 15)	56,68	G	56,68	G	56,68	G
(100 x 40 x 17)	70,58	G+L	73,84	G	73,84	G
(100 x 50 x 17)	80,09	G+L	83,76	G	83,76	G
(125 x 50 x 17)	86,36	G+L	85,56	G+L	85,42	G+L
(150 x 60 x 20)	103,91	G+L	95,48	G+L	96,29	G+L
(200 x 75 x 20)	117,17	G+L	103,01	G+L	106,05	G+L
(200 x 100 x25)	133,85	G+L	119,99	G+L	122,33	G+L
(250 x 85 x 25)	127,24	D	108,9	G+L	108,9	G+L
(250 x 100 x 25)	133,88	D	115,96	G+L	115,96	G+L
(300 x 85 x 25)	130,31	G+L	105,23	G+L	105,81	G+L
(300 x 100 x 25)	139,12	G+L	113,29	G+L	114,14	G+L
(200 x 180 x 10)	76,32	D	76,32	D	76,32	D
(150 x 150 x 15)	69,69	D	69,68	D	69,68	D
(200 x 200 x 30)	138,44	D	138,44	D	138,44	D

Fonte: O autor (2018)

Quadro 09 – Perfis com espessura 2,00mm e comprimento de barra 2000mm

t = 2,00 mm	L = 2000 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	6,42	G	6,42	G	6,42	G
(75 x 40 x 15)	25,39	G	25,39	G	25,39	G
(100 x 40 x 17)	33,36	G	33,36	G	33,36	G
(100 x 50 x 17)	42,35	G	42,35	G	42,35	G
(125 x 50 x 17)	52,95	G+L	55,43	G	55,43	G
(150 x 60 x 20)	71,24	G+L	71,05	G+L	71,63	G+L
(200 x 75 x 20)	95,8	G+L	84,51	G+L	89,96	G+L

(200 x 100 x25)	113,39	G+L	102,56	G+L	104,54	G+L
(250 x 85 x 25)	112,86	G+L	94,78	G+L	94,77	G+L
(250 x 100 x 25)	119,79	G+L	102,55	G+L	102,53	G+L
(300 x 85 x 25)	107,79	G+L	87,74	G+L	88,22	G+L
(300 x 100 x 25)	123,41	G+L	101,9	G+L	102,66	G+L
(200 x 180 x 10)	76,32	D	76,32	D	76,32	D
(150 x 150 x 15)	69,68	D	69,68	D	69,68	D
(200 x 200 x 30)	113,59	G+L	138,44	D	138,44	D

Fonte: O autor (2018)

Quadro 10 – Perfis com espessura 2,00mm e comprimento de barra 3000mm

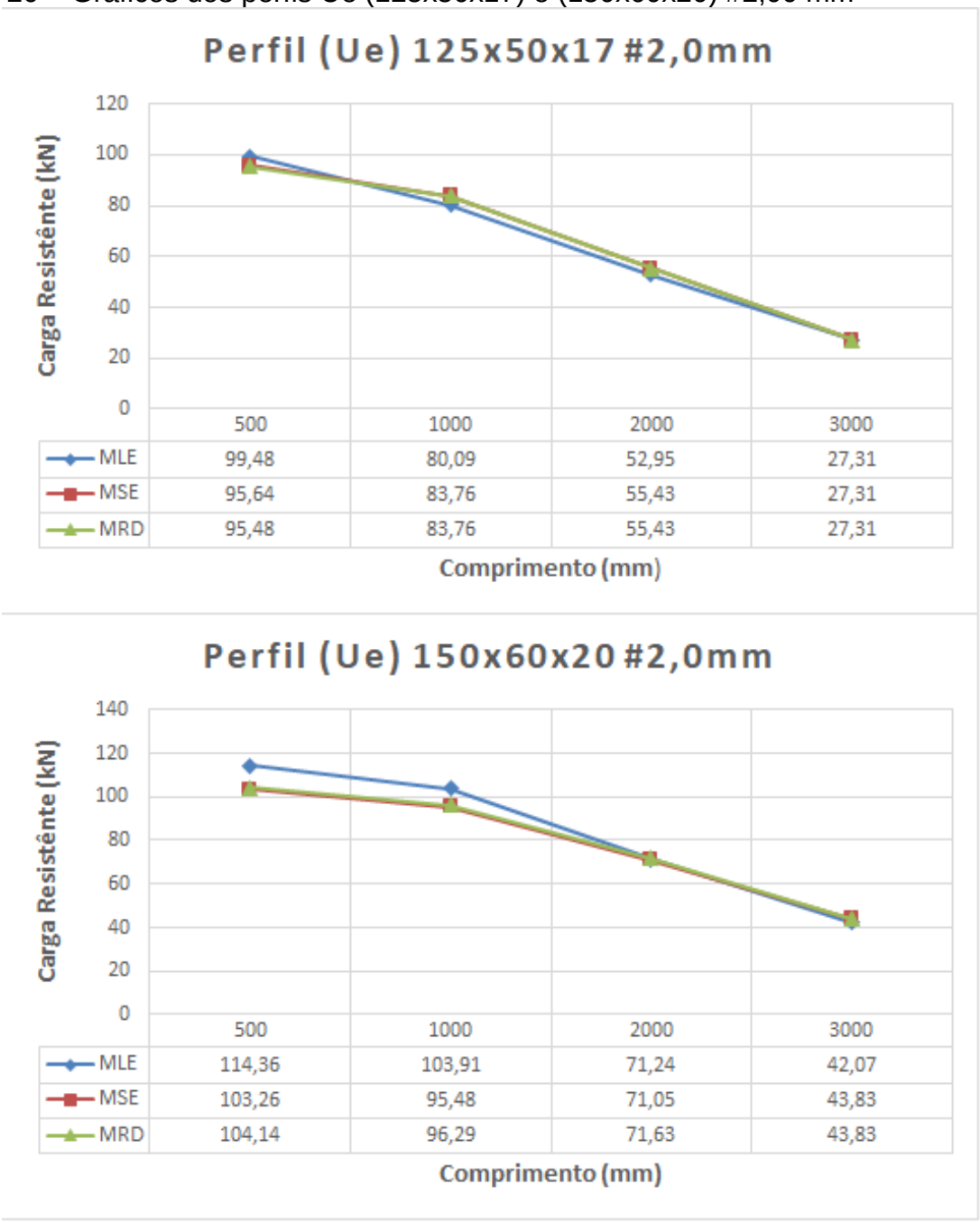
t = 2,00 mm	L = 3000 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	2,85	G	2,85	G	2,85	G
(75 x 40 x 15)	12,63	G	12,63	G	12,63	G
(100 x 40 x 17)	14,83	G	14,83	G	14,83	G
(100 x 50 x 17)	22,92	G	22,92	G	22,92	G
(125 x 50 x 17)	27,31	G	27,31	G	27,31	G
(150 x 60 x 20)	42,07	G+L	43,83	G	43,83	G
(200 x 75 x 20)	64	G+L	61,71	G+L	63,43	G+L
(200 x 100 x25)	88,61	G+L	79,41	G+L	80,89	G+L
(250 x 85 x 25)	87,73	G+L	75,59	G+L	75,58	G+L
(250 x 100 x 25)	96,63	G+L	83,81	G+L	83,78	G+L
(300 x 85 x 25)	74,37	G+L	64,84	G+L	65,18	G+L
(300 x 100 x 25)	102,5	G+L	85,6	G+L	86,23	G+L
(200 x 180 x 10)	76,32	D	76,32	D	76,32	D
(150 x 150 x 15)	59,57	G+L	69,68	D	58,28	G+L
(200 x 200 x 30)	110,14	G+L	116,63	G+L	116,22	G+L

Fonte: O autor (2018)

Nos perfis retirados da NBR:6355:2003, os perfis Ue (100x40x17) e (100x50x17) que possuem espessuras de 2,00mm o Método da Largura Efetiva (MLE) tem forças críticas menores que os Métodos da Seção Efetiva (MSE) e o método da Resistência Direta (MRD). No perfil Ue (125x50x17) os valores já começam a subir para o MLE em relação aos outros dois métodos conforme a Figura 20. Os demais gráficos estão no Apêndice A – Perfis Ue.

Cinco perfis retirados da NBR6355:2003 apresentaram modo crítico como o distorcional. Porém, conforme a norma NBR14672: 2010, esses perfis dispensam a verificação do modo distorcional, como exposto no Quadro 01.

Figura 20 – Gráficos dos perfis Ue (125x50x17) e (150x60x20) #2,00 mm



Fonte: O autor (2018)

Quadro 11 – Perfis com espessura 2,65mm e comprimento de barra 500mm

t = 2,65 mm	L = 500 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	55,29	G	55,29	G	55,29	G
(75 x 40 x 15)	99,15	G	99,15	G	99,15	G
(100 x 40 x 17)	120,1	G	120,1	G	120,1	G
(100 x 50 x 17)	133,5	G	133,5	G	133,5	G+L

(125 x 50 x 17)	141,6	G+L	148,14	D	148,14	D
(150 x 60 x 20)	164,08	G+L	162,69	G+L	163,89	G+L
(200 x 75 x 20)	178,75	D	172,76	G+L	176,18	G+L
(200 x 100 x25)	205,27	D	199,53	G+L	203,01	G+L
(250 x 85 x 25)	194,44	D	181,12	G+L	180,91	G+L
(250 x 100 x 25)	204,5	D	192,46	G+L	192,24	G+L
(300 x 85 x 25)	215,89	G+L	177,9	G+L	178,72	G+L
(300 x 100 x 25)	215,49	G+L	187,78	G+L	189,06	G+L
(200 x 180 x 10)	123,5	D	123,5	D	123,5	D
(150 x 150 x 15)	112,63	D	112,63	D	112,63	D
(200 x 200 x 30)	212,76	D	212,76	D	212,76	D

Fonte: O autor (2018)

Quadro 12 – Perfis com espessura 2,65mm e comprimento de barra 1000mm

t = 2,65 mm	L = 1000 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	29,71	G	29,71	G	29,71	G
(75 x 40 x 15)	75,67	G	75,67	G	75,67	G
(100 x 40 x 17)	97,28	G	97,28	G	97,28	G
(100 x 50 x 17)	109,59	G	109,59	G	109,59	G+L
(125 x 50 x 17)	123,22	G+L	128,43	G	128,43	G
(150 x 60 x 20)	148,44	G+L	150,24	G+L	151,33	G+L
(200 x 75 x 20)	177,85	G+L	164,05	G+L	167,28	G+L
(200 x 100 x25)	202,35	G+L	191,78	G+L	195,11	G+L
(250 x 85 x 25)	194,44	D	174,76	G+L	174,55	G+L
(250 x 100 x 25)	204,5	D	186,59	G+L	186,38	G+L
(300 x 85 x 25)	202,99	G+L	169,75	G+L	170,53	G+L
(300 x 100 x 25)	210,07	G+L	182,86	G+L	184,1	G+L
(200 x 180 x 10)	123,5	D	123,5	D	123,5	D
(150 x 150 x 15)	112,63	D	112,63	D	112,63	D
(200 x 200 x 30)	212,76	D	212,76	D	212,76	D

Fonte: O autor (2018)

Quadro 13 – Perfis com espessura 2,65mm e comprimento de barra 2000mm

t = 2,65 mm	L = 2000 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	7,54	G	7,54	G	7,54	G
(75 x 40 x 15)	35,06	G	35,06	G	35,06	G
(100 x 40 x 17)	41,37	G	41,37	G	41,37	G
(100 x 50 x 17)	60,89	G	60,89	G	60,89	G
(125 x 50 x 17)	74,62	G	74,62	G	74,62	G
(150 x 60 x 20)	103,96	G+L	108,99	G	108,99	G
(200 x 75 x 20)	138,36	G+L	134,63	G+L	137,2	G+L

(200 x 100 x25)	177,99	G+L	164,23	G+L	167,03	G+L
(250 x 85 x 25)	169,91	G+L	151,94	G+L	151,76	G+L
(250 x 100 x 25)	184,36	G+L	165,16	G+L	164,99	G+L
(300 x 85 x 25)	159,31	G+L	140,84	G+L	141,48	G+L
(300 x 100 x 25)	189,9	G+L	164,64	G+L	165,75	G+L
(200 x 180 x 10)	123,5	D	123,5	D	123,5	D
(150 x 150 x 15)	112,63	D	112,63	D	112,63	D
(200 x 200 x 30)	212,76	D	212,76	D	212,76	D

Fonte: O autor (2018)

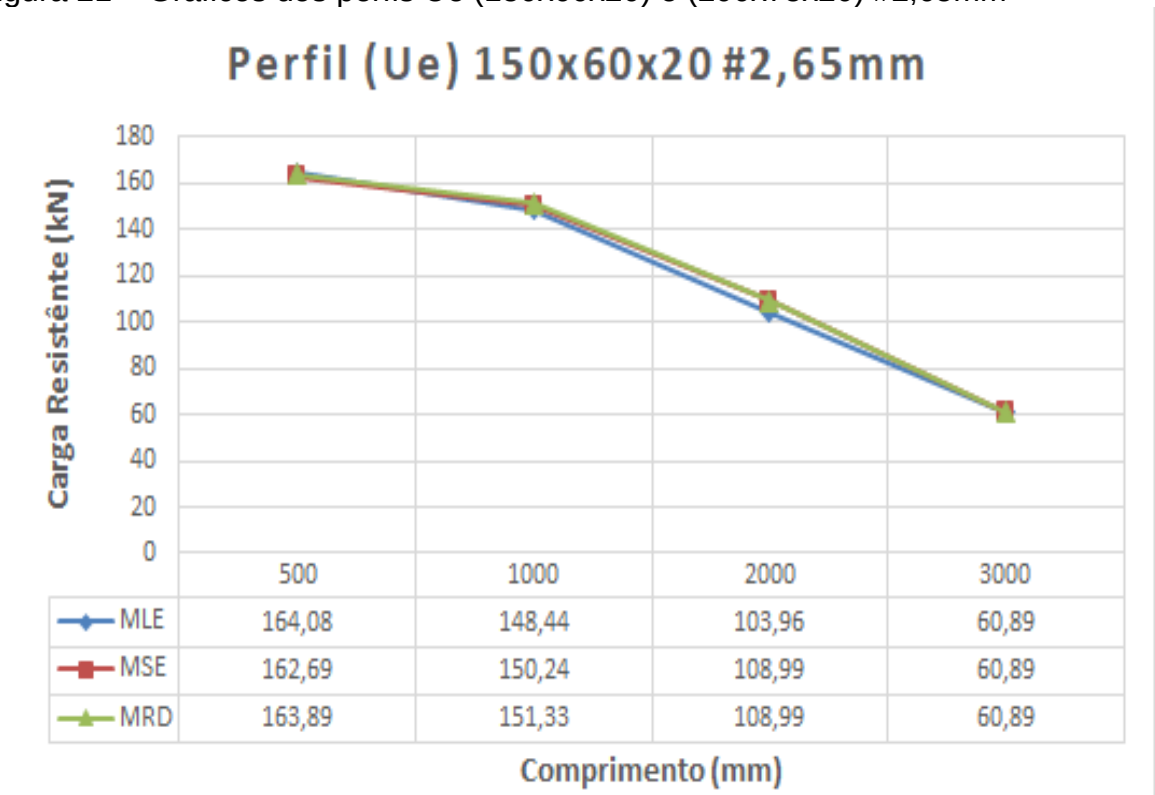
Quadro 14 – Perfis com espessura 2,65mm e comprimento de barra 3000mm

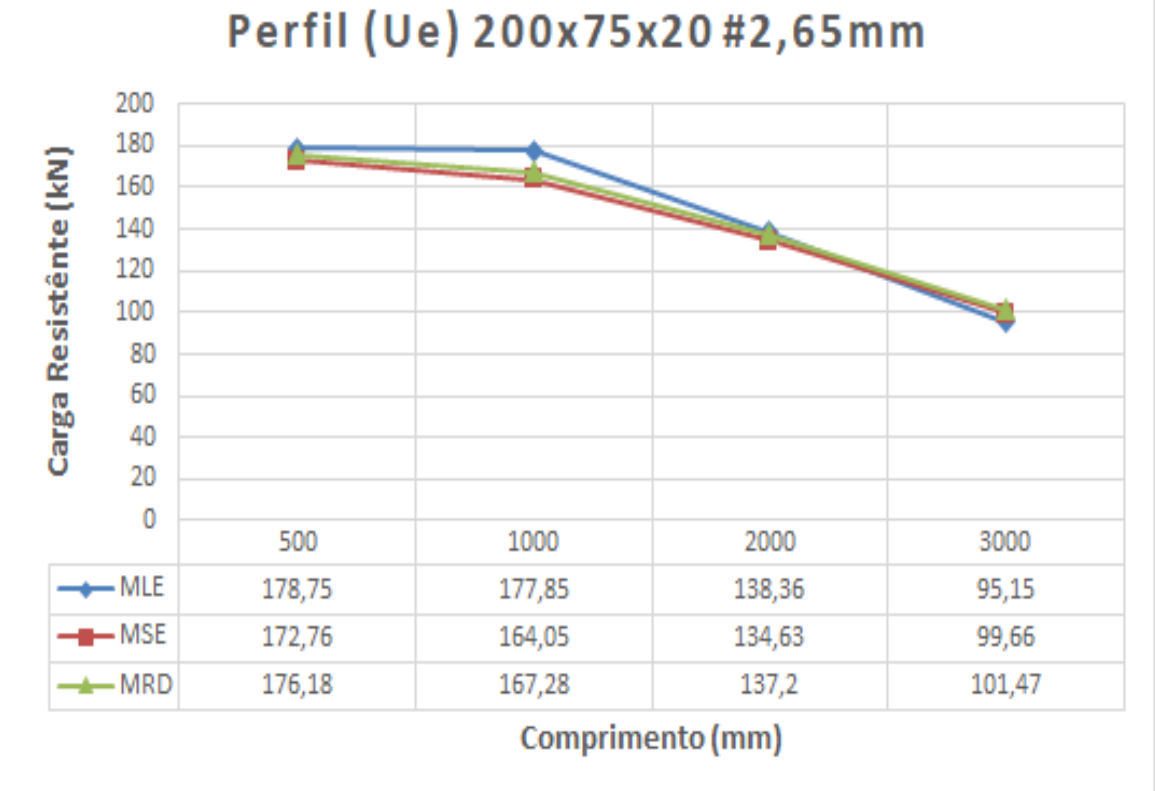
t = 2,65 mm	L = 3000 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	3,35	G	3,35	G	3,35	G
(75 x 40 x 15)	15,58	G	15,58	G	15,58	G
(100 x 40 x 17)	18,39	G	18,39	G	18,39	G
(100 x 50 x 17)	31,64	G	31,64	G	31,64	G
(125 x 50 x 17)	34,22	G	34,22	G	34,22	G
(150 x 60 x 20)	60,89	G	60,89	G	60,89	G
(200 x 75 x 20)	95,15	G+L	99,66	G+L	101,47	G+L
(200 x 100 x25)	129,23	G+L	128,2	G+L	130,31	G+L
(250 x 85 x 25)	127,83	G+L	121,58	G+L	121,44	G+L
(250 x 100 x 25)	147,72	G+L	135,64	G+L	135,5	G+L
(300 x 85 x 25)	107,76	G+L	103,41	G+L	103,86	G+L
(300 x 100 x 25)	158,37	G+L	138,79	G+L	139,71	G+L
(200 x 180 x 10)	116,01	G+L	123,5	D	123,5	D
(150 x 150 x 15)	89,41	G+L	100,49	G	92,04	G+L
(200 x 200 x 30)	170,34	G+L	186,02	G+L	185,12	G+L

Fonte: O autor (2018)

Nos perfis da NBR:6355:2003 com espessura de 2,65 mm, a crescente do MLE em relação aos outros métodos começa no perfil Ue (150x60x20), conforme a Figura 21. Os outros gráficos dos demais perfis se encontram no Apêndice A – Perfis Ue.

Figura 21 – Gráficos dos perfis Ue (150x60x20) e (200x75x20) #2,65mm





Fonte: O autor (2018)

Quadro 15 – Perfis com espessura 3,75 e comprimento de barra 500mm

t = 3,75 mm	L = 500 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	70,65	G	70,65	G	70,65	G
(75 x 40 x 15)	133,7	G	133,7	G	133,7	G
(100 x 40 x 17)	162,78	G	162,78	G	162,78	G
(100 x 50 x 17)	181,59	G	181,59	G	181,59	G
(125 x 50 x 17)	213,37	G	213,37	G	213,37	G
(150 x 60 x 20)	252,54	G+L	256,75	G	256,75	G
(200 x 75 x 20)	292,2	D	292,2	D	292,2	D
(200 x 100 x25)	334,57	D	334,57	D	334,57	D
(250 x 85 x 25)	325,51	D	320,76	G+L	321,14	G+L
(250 x 100 x 25)	340,6	D	340,6	D	340,6	D
(300 x 85 x 25)	341,15	G+L	317,71	G+L	322,56	G+L
(300 x 100 x 25)	368,94	G+L	335,27	G+L	337,05	G+L
(200 x 180 x 10)	224,64	D	224,64	D	224,64	D
(150 x 150 x 15)	193,2	D	193,2	D	193,2	D
(200 x 200 x 30)	359,72	D	359,72	D	359,72	D

Fonte: O autor (2018)

Quadro 16 – Perfis com espessura 3,75mm e comprimento de barra 1000mm

t = 3,75 mm	L = 1000 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	35,05	G	35,05	G	35,05	G
(75 x 40 x 15)	106,96	G	106,96	G	106,96	G
(100 x 40 x 17)	130,14	G	130,14	G	130,14	G
(100 x 50 x 17)	150,45	G	150,45	G	150,45	G
(125 x 50 x 17)	184,98	G	184,98	G	184,98	G
(150 x 60 x 20)	228,5	G+L	228,98	G	228,98	G
(200 x 75 x 20)	278,1	G+L	286,67	G+L	289,62	G+L
(200 x 100 x25)	334,57	D	334,57	D	334,57	D
(250 x 85 x 25)	319,53	G+L	309,15	G+L	309,51	G+L
(250 x 100 x 25)	340,6	D	330,55	G+L	329,59	G+L
(300 x 85 x 25)	320,72	G+L	302,45	G+L	307,04	G+L
(300 x 100 x 25)	356,29	G+L	326,23	G+L	327,97	G+L
(200 x 180 x 10)	224,64	D	224,64	D	224,64	D
(150 x 150 x 15)	193,2	D	193,2	D	193,2	D
(200 x 200 x 30)	359,72	D	359,72	D	359,72	D

Fonte: O autor (2018)

Quadro 17 – Perfis com espessura 3,75mm e comprimento de barra 2000mm

t = 3,75 mm	L = 2000 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	8,76	G	8,76	G	8,76	G
(75 x 40 x 15)	44,11	G	44,11	G	44,11	G
(100 x 40 x 17)	52,42	G	52,42	G	52,42	G
(100 x 50 x 17)	89,44	G	89,44	G	89,44	G
(125 x 50 x 17)	103,93	G	103,93	G	103,93	G
(150 x 60 x 20)	154,52	G	154,52	G	154,52	G
(200 x 75 x 20)	219,39	G+L	232,82	G	232,82	G+L
(200 x 100 x25)	275,33	G+L	287,67	G+L	291,29	G+L
(250 x 85 x 25)	268,21	G+L	268,64	G+L	268,94	G+L
(250 x 100 x 25)	298,29	G+L	292,23	G+L	291,4	G+L
(300 x 85 x 25)	251,94	G+L	248,97	G+L	252,66	G+L
(300 x 100 x 25)	311,28	G+L	293,25	G+L	294,8	G+L
(200 x 180 x 10)	224,64	D	224,64	D	224,64	D
(150 x 150 x 15)	193,2	D	193,2	D	193,2	D
(200 x 200 x 30)	351,45	G+L	359,72	D	359,72	D

Fonte: O autor (2018)

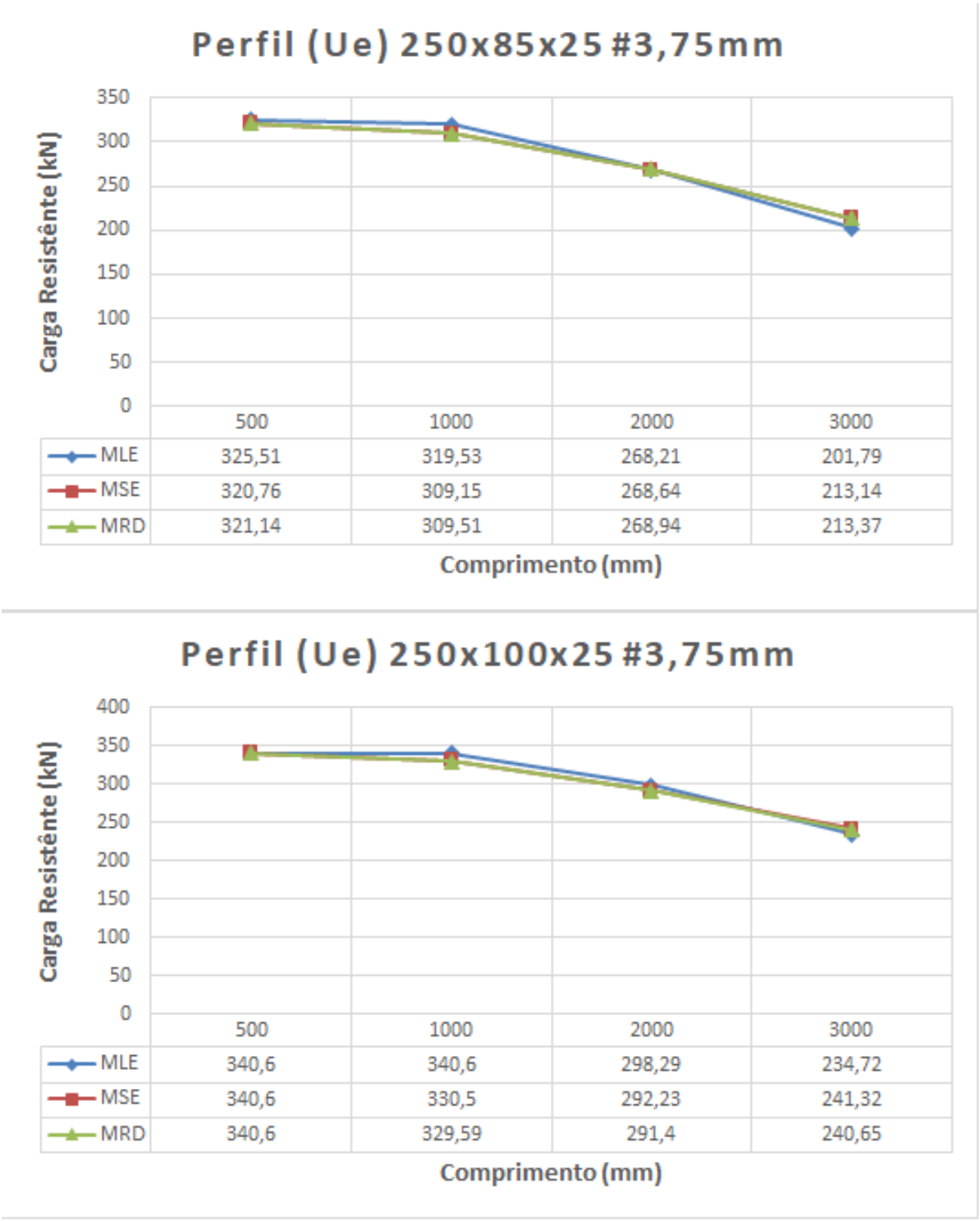
Quadro 18 – Perfis com espessura 2,00mm e comprimento de barra 1000mm

t = 3,75 mm	L = 3000 mm					
Perfil Ue	Ncrk (MLE)	Modo	Ncrk (MSE)	Modo	Ncrk (MRD)	Modo
(bw x bf x D)	kN		kN		kN	
(50 x 25 x 10)	3,9	G	3,9	G	3,9	G
(75 x 40 x 15)	19,6	G	19,6	G	19,6	G
(100 x 40 x 17)	23,2	G	23,2	G	23,2	G
(100 x 50 x 17)	40,75	G	40,75	G	40,75	G
(125 x 50 x 17)	47,51	G	47,51	G	47,51	G
(150 x 60 x 20)	79,52	G	79,52	G	79,52	G
(200 x 75 x 20)	150,04	G	150,04	G	150,04	G
(200 x 100 x25)	204,42	G+L	208,07	G	208,07	G
(250 x 85 x 25)	201,79	G+L	213,14	G+L	213,37	G+L
(250 x 100 x 25)	234,72	G+L	241,32	G+L	240,65	G+L
(300 x 85 x 25)	171,18	G+L	181,13	G+L	183,68	G+L
(300 x 100 x 25)	252,14	G+L	247,82	G+L	249,1	G+L
(200 x 180 x 10)	181,09	G+L	224,64	D	224,64	D
(150 x 150 x 15)	144,28	G+L	145,24	G	145,24	G
(200 x 200 x 30)	277,28	G+L	326,07	G+L	323,89	G+L

Fonte: O autor (2018)

Nos perfis da norma NBR:6355:2003 que possuem espessura de 3,75 mm, o MLE começa uma crescente a partir do perfil Ue (250x85x25),conforme Figura 22. Os demais gráficos referentes aos perfis com espessura 3,75 mm estão no Apêndice A – Perfis Ue.

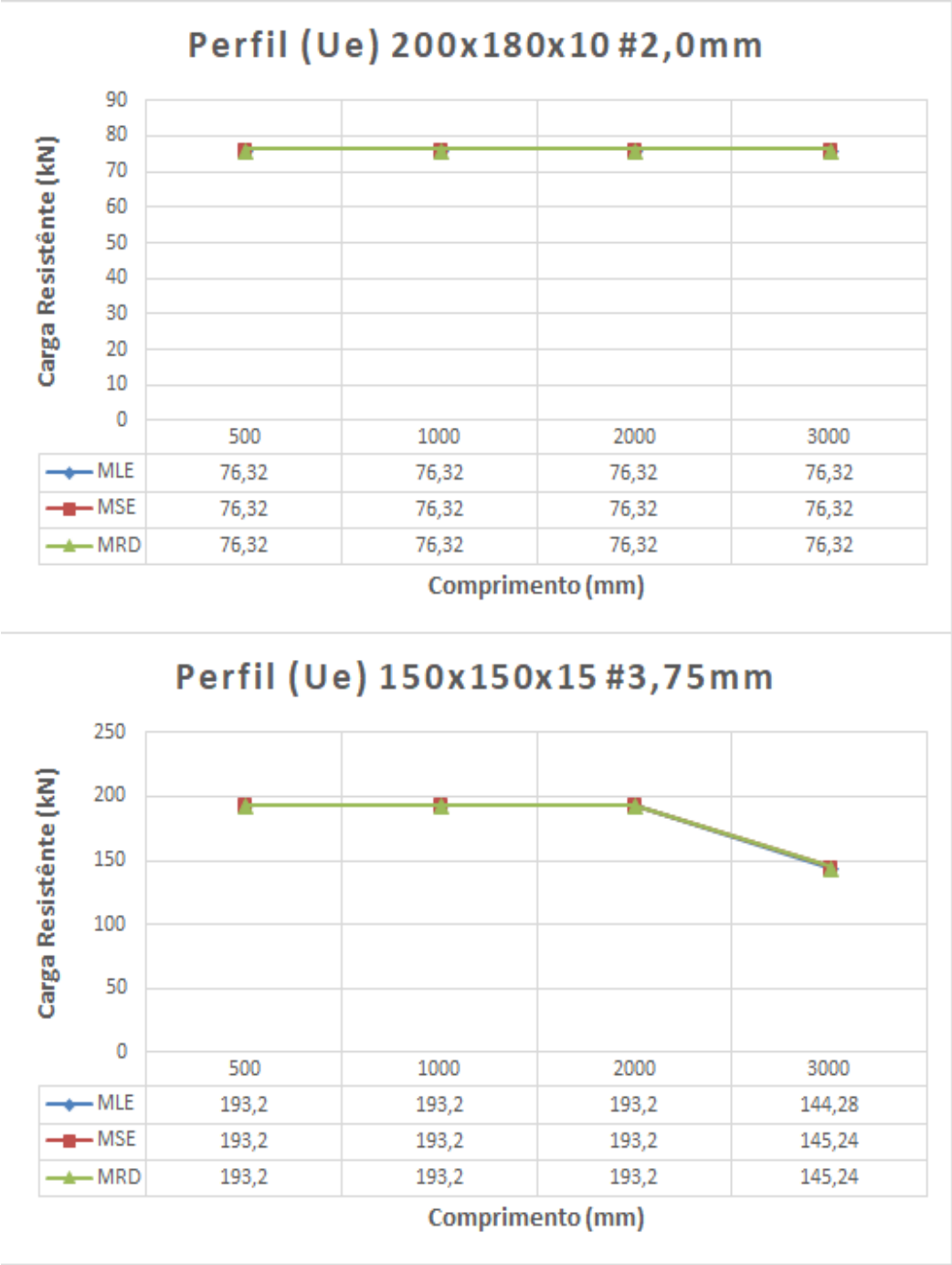
Figura 22 - Gráficos dos perfis Ue (250x85x25) e (250x85x25) #2,00 mm



Fonte: O autor (2018)

Os três perfis Ue (200x180x10), (150x150x15) e (200x200x30) possuem modo distorcional como o crítico de flambagem. Diferente dos outros perfis, esses três contêm relação (b_f / b_w) maiores. Na Figura 23 há representações de seus comportamentos por meio de dois gráficos. Os demais gráficos desses três perfis estão no Apêndice A – Perfis Ue.

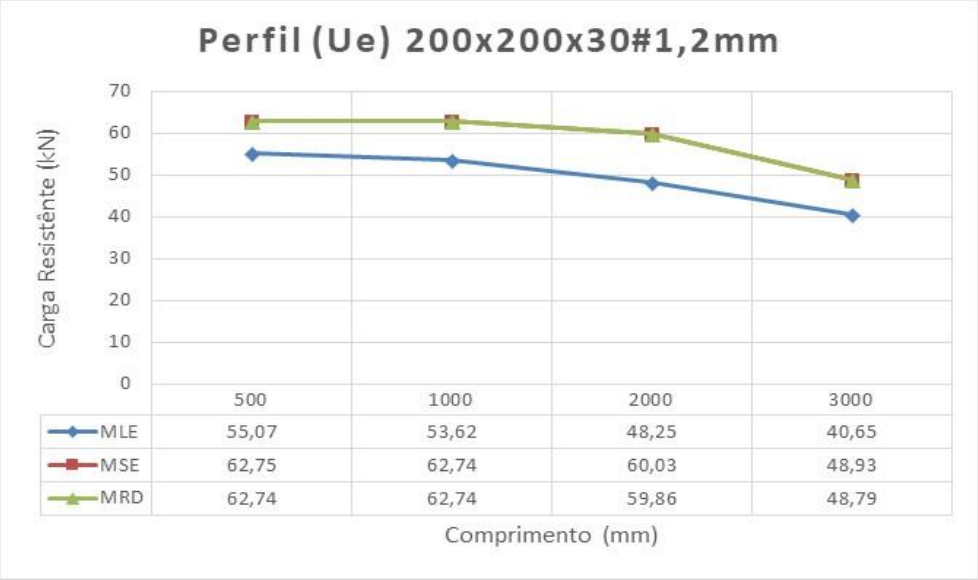
Figura 23 - Gráficos dos perfis Ue (200x180x10) e (150x150x15) #2,00 mm



Fonte: O autor (2018)

O perfil Ue (200x200x30) #1,2mm é o único perfil em que o MLE tem valores abaixo dos outros métodos para todos os pontos de comprimento, conforme Figura 24.

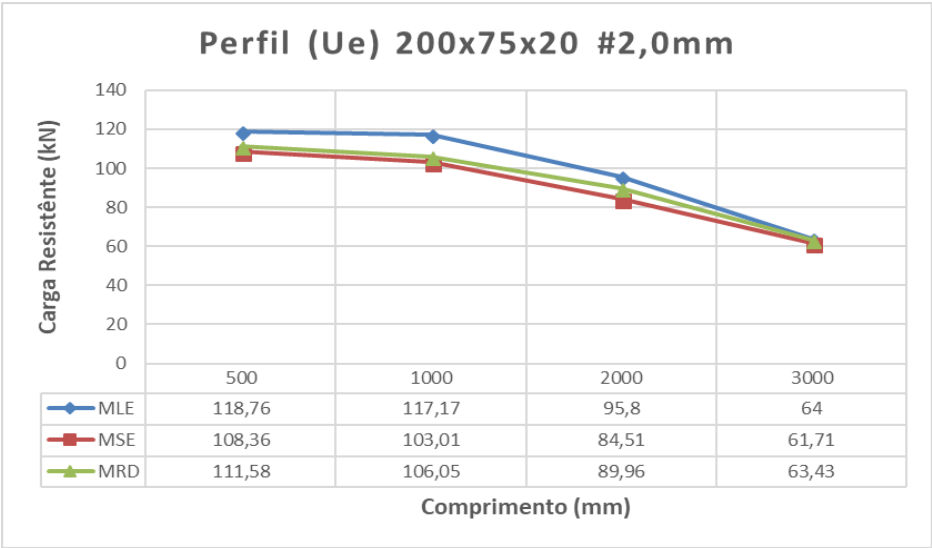
Figura 24 - Gráfico do perfil Ue (150x150x15) #3,75mm



Fonte: O autor (2018)

O perfil Ue (200x75x20) #2,00mm é o único perfil referente a NBR6355:2010 que possui uma variação maior que 2% nos valores da carga crítica de flambagem entre o MSE e o MLE. Conforme a Figura 25 é possível perceber uma diferença entre os dois métodos nos pontos de 1000 e 2000 mm de comprimento da barra.

Figura 25 - Gráfico do perfil Ue (200x75x20) #2,00mm



Fonte: O autor (2018)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme os resultados encontrados, o Método da Largura Efetiva (MLE) obteve, em geral, maiores cargas críticas de flambagem que os outros dois métodos (à medida que o tamanho da seção transversal é aumentado). O Método da Seção Efetiva (MSE) e o Método da Resistência Direta (MRD) apresentaram resultados iguais ou muito próximos, isso por que eles possuem valores da força axial de flambagem local elástica (N_l) iguais ou aproximados e os valores da força axial de flambagem distorcional elástica (N_{dist}) iguais.

Quanto à utilização de um ou de outro método, o MLE exige várias operações, devido ao cálculo de elemento por elemento do perfil. Porém, foi o método onde obteve maiores cargas críticas em determinados perfis. O MSE é mais rápido comparado com os outros métodos, pois ele analisa a seção como um todo, utilizando-se de fórmulas calibradas para os perfis localizados na Tabela 03. O MRD indica necessidade do programa computacional para o valor das forças críticas de flambagem elástica, método esse que possui resultados muito próximos aos valores encontrados no MSE, pelo fato de também analisar a seção como um todo. Desse modo, há um aspecto a considerar: o MRD pode analisar variados tipos de perfis, diferentemente do MSE.

Cinco perfis retirados da NBR6355:2003 apresentaram modo crítico como o distorcional para comprimentos de 500mm e 1000mm, conforme cálculos obtidos no trabalho. Porém, de acordo com o Quadro 01, esses perfis não necessitam uma verificação da flambagem por distorção.

Os três perfis que não são da NBR6355:2003, possuem uma relação (b_f/b_w) muito alta em relação aos demais perfis. Portanto, ele confirma a referência de SILVA; SILVA; PIERIN 2014). Esses três perfis obtiveram como modo crítico a flambagem distorcional, alterando apenas para a global em um comprimento de barra de 3000mm.

Em relação a espessura dos perfis, a tendência dos métodos é de convergir em relação ao aumento da espessura da chapa nas seções transversais. Na espessura de 1,2mm o MLE acaba tendo maiores cargas críticas para todos os perfis estudados da NBR6355:2003. Enquanto para os perfis com 3,75mm de espessura, a espessura mais espessa estudada nesse trabalho, as cargas críticas

se convergem ao longo que a seção transversal vai aumentando. O MLE começa apresentar maiores cargas críticas a partir do perfil Ue (250x100x25).

Os perfis tendem apresentar apenas o modo global de flambagem sem interagir com o modo local de flambagem em comprimentos de barra altos, porém a espessura também tem influência grande nesse fenômeno. Os perfis de 1,2mm de espessura tendem a apresentar o modo local com maior frequência do que um perfil com espessura maior. Isso porquê a espessura do perfil influência muito na flambagem local da seção transversal, isso pode ser analisado na equação 7.

Para futuros estudos, salienta-se a promoção de pesquisas em diferentes tipos de perfis, análises das cargas críticas de flambagem utilizando análise numérica e testes empíricos em laboratórios.

REFERÊNCIAS

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

_____. **NBR 6355:** Perfis de aço formados a frio - padronização. Rio de Janeiro, 2010.

ALMEIDA, S.J.C. **Análise numérica de perfis de aço formados a frio comprimidos considerando imperfeições geométricas iniciais**. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

BATISTA, E. M; FREITAS, A. M. S.; PIMENTA, R. J.; FAKURY, R. H.; REQUENA, J. A. V.; ARAUJO, A. H. M. Resistência de barras comprimidas de aço: curvas de flambagem para perfis laminados a quente e soldados, formados a frio e tubulares. In: **Construmental 2010 - Congresso Latino-Americano da Construção metálica.** São Paulo, 2010.

BRAGA, C.B; CAMPELLO, E.M.B. **Avaliação de métodos numéricos de análise linear de estabilidade para perfis de aço formados a frio.** 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas e Geotécnica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

CASTELANI, T. **Otimização e dimensionamento de perfis formado a frio pelo método da resistência direta**. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CHODRAUI, G.M.B. **Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão**. 308 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

_____. **Flambagem por distorção da seção transversal em perfis de aço formados a frio submetidos a compressão centrada e a flexão**. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

COSTA, A. A. R. **Estudo da flambagem local de perfis U enrijecidos em situação de incêndio**. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Ltda, 2000.

JAVARONI, C. E. **Estrutura de aço:** Dimensionamento de perfis formado a frio. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

KLEINA, M.S.M; CASEKER, M.P. **Instabilidade por distorção de perfis de aço formados a frio, avaliação analítica e experimental.** 100 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

MATSUBARA, G.Y. **Análise da interação entre modos de flambagem local e distorcional em perfis de aço formados a frio com seção U enrijecido sob compressão axial.** 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

MELO, J.M.S. **Análise da flambagem elástica e da resistência de telhas autoportantes de aço formadas a frio.** 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

MEZZOMO, G. P. **Análise de flambagem de perfis formados a frio utilizando modos puros de deformação.** 188f. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2012.

SALLES, G.C. **Investigação analítica, numérica e experimental do modo de flambagem distorcional em perfis formados a frio**. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

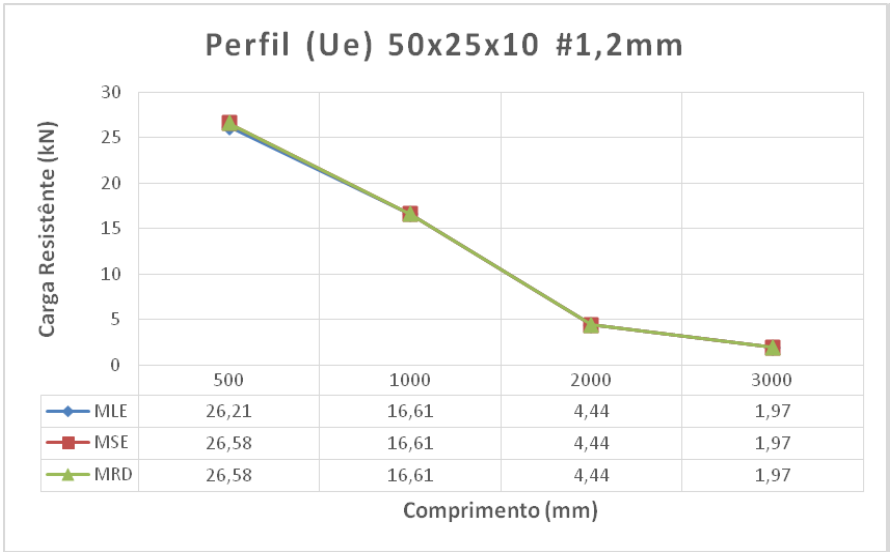
SENA, J.L. **Análise da flambagem elástica de perfis de aço formados a frio com seções assimétricas na compressão axial e na flexão oblíqua.** 211f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

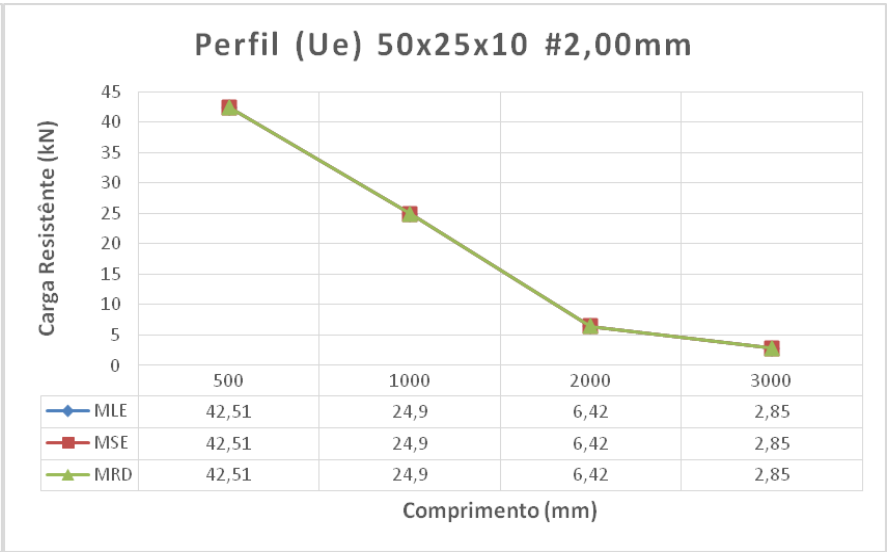
SILVA, E. L.; SILVA, V. P.; PIERIN, I. **Dimensionamento de perfis formados a frio conforme a NBR 14762 e NBR 6355.** Rio de Janeiro: Instituto brasileiro de siderurgia centro brasileiro da construção em aço, 2014.

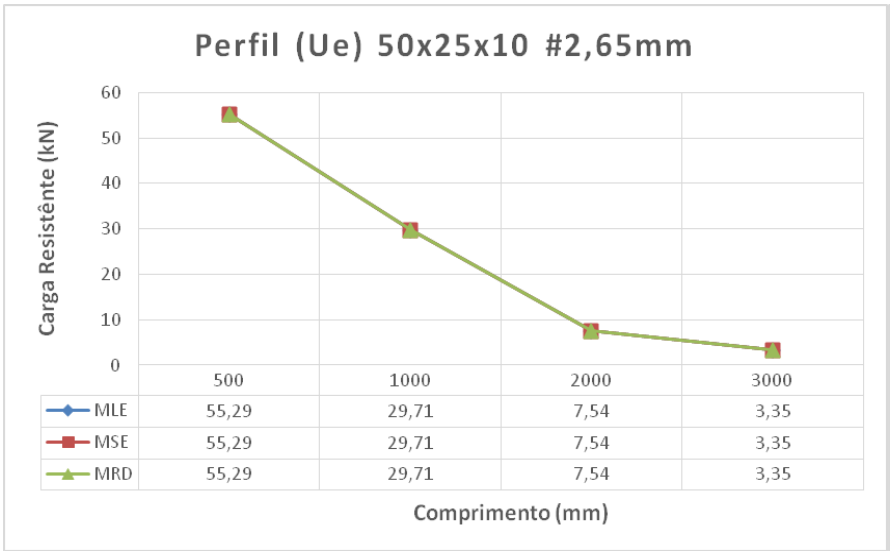
SILVA, V. P. **Dimensionamento de Estruturas de Aço.** São Paulo: Departamento de Engenharia de Estrutura e Geotécnica Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

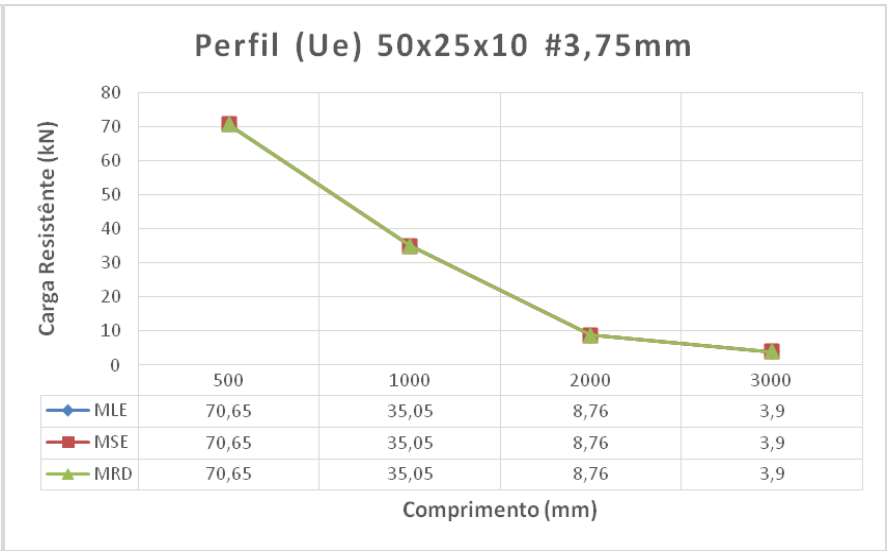
VIEIRA, G.S. **Análise experimental de vigas de seção "I" compostas de perfis formados a frio com emendas soldadas, submetidas à flexão simples**. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás. Goiás, 2010.

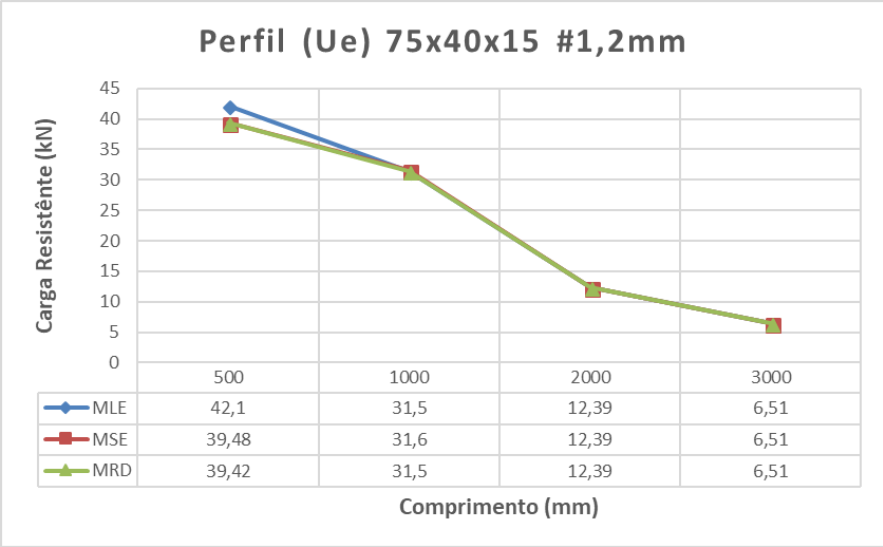
APÊNDICE A – PERFIS UE

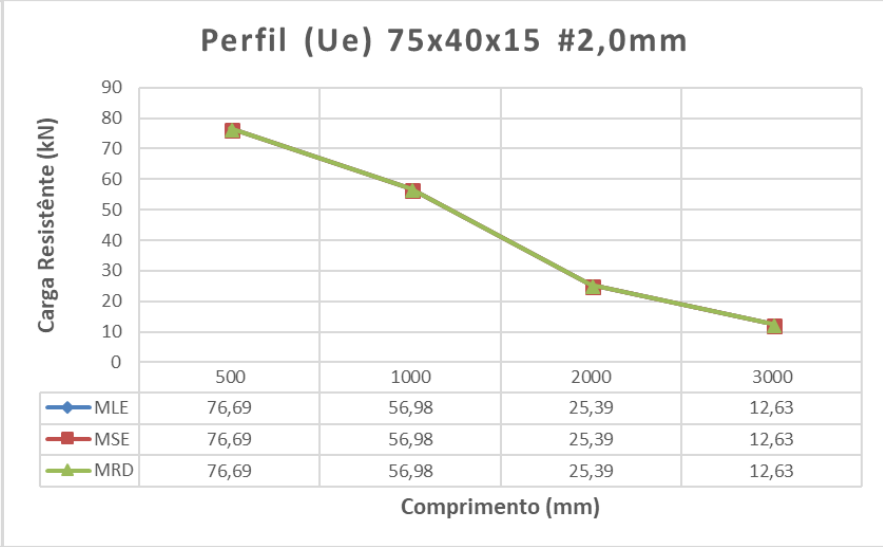


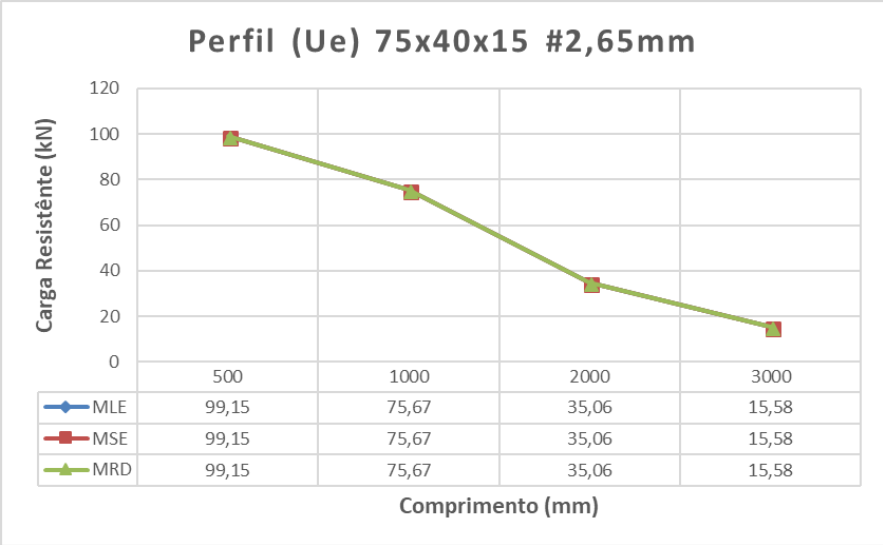


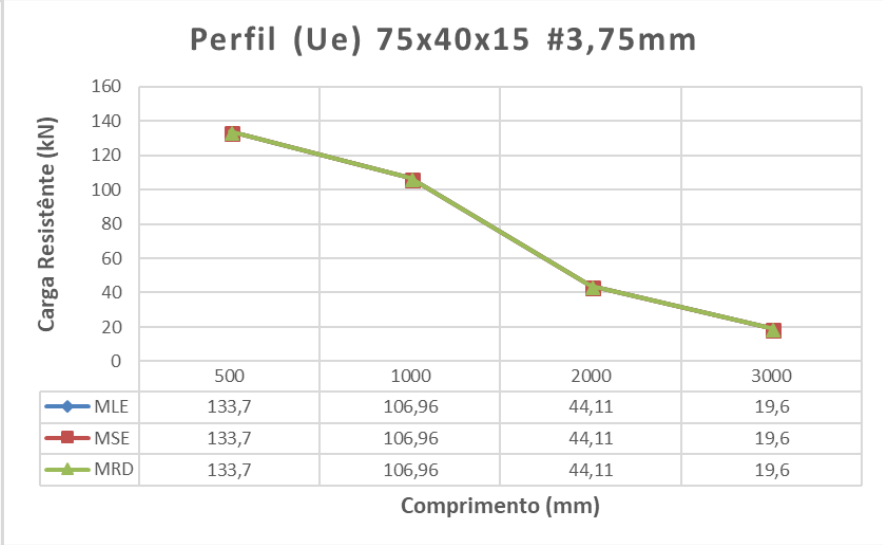


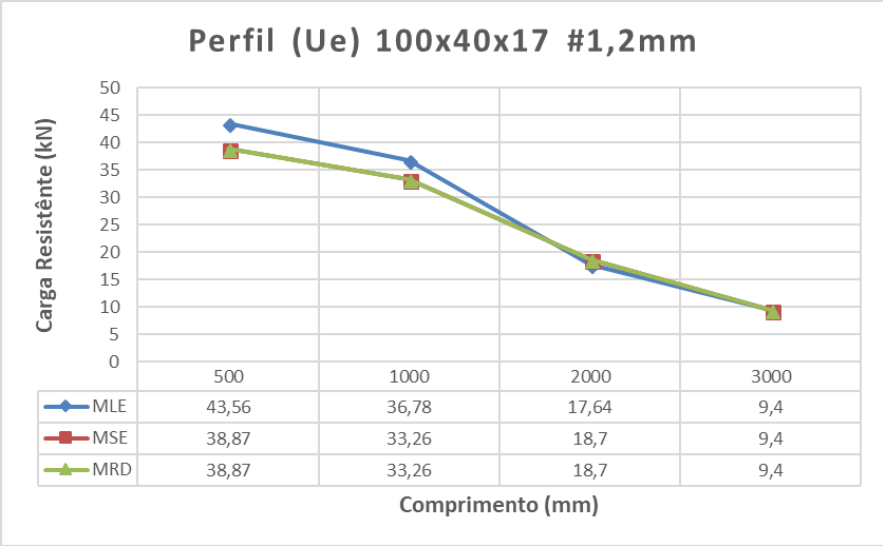


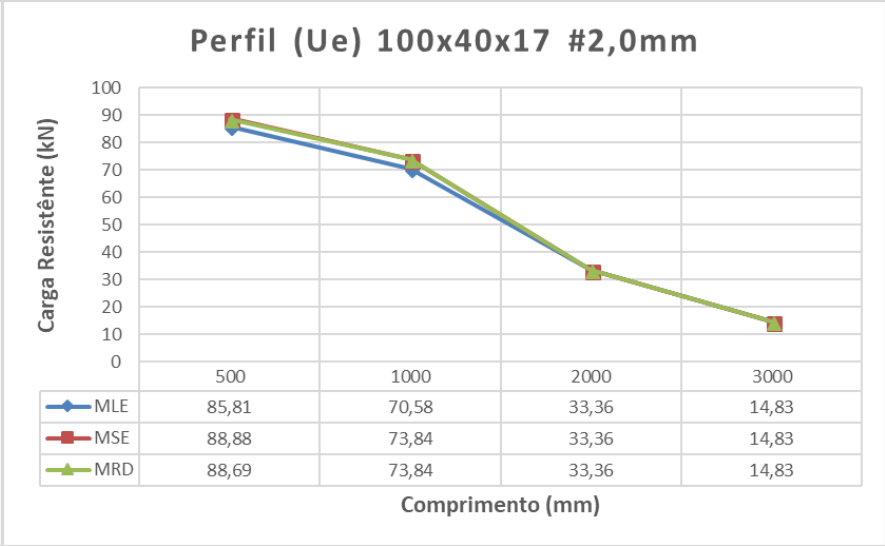

Perfil (Ue) 75x40x15 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
500
1000
2000
3000
MLE 42,1 31,5 12,39 6,51
MSE 39,48 31,6 12,39 6,51
MRD 39,42 31,5 12,39 6,51
Comprimento (mm)

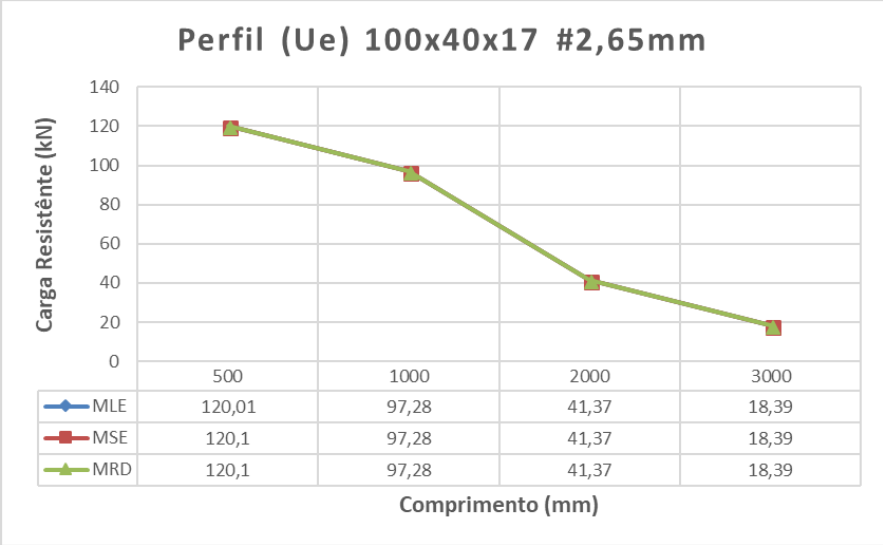

Perfil (Ue) 75x40x15 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
500
1000
2000
3000
MLE 76,69 56,98 25,39 12,63
MSE 76,69 56,98 25,39 12,63
MRD 76,69 56,98 25,39 12,63
Comprimento (mm)

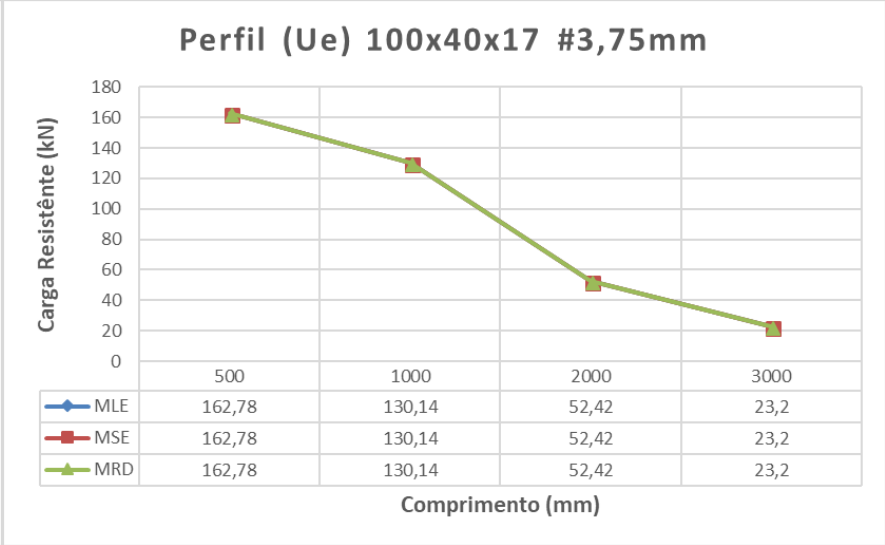

Perfil (Ue) 75x40x15 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
120
100
80
60
40
20
0
500
1000
2000
3000
MLE 99,15 75,67 35,06 15,58
MSE 99,15 75,67 35,06 15,58
MRD 99,15 75,67 35,06 15,58
Comprimento (mm)

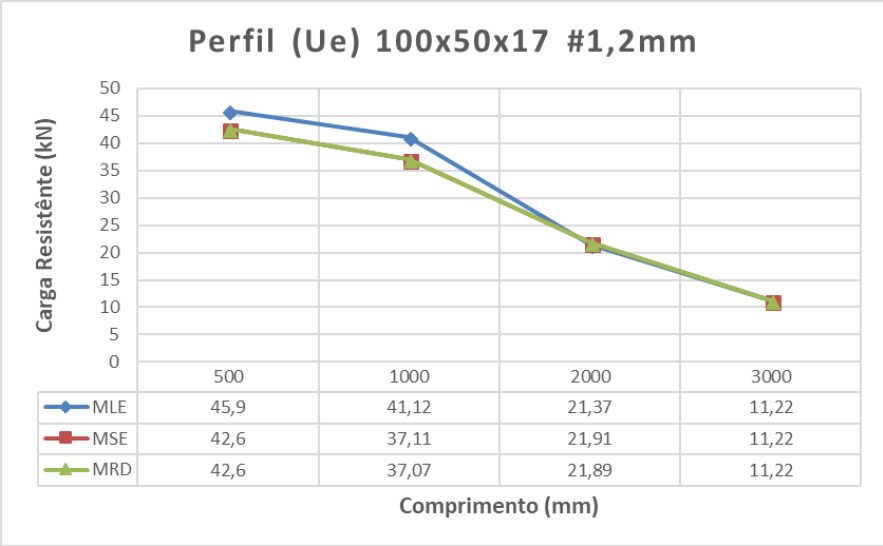

Perfil (Ue) 75x40x15 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
500
1000
2000
3000
MLE 133,7 106,96 44,11 19,6
MSE 133,7 106,96 44,11 19,6
MRD 133,7 106,96 44,11 19,6
Comprimento (mm)

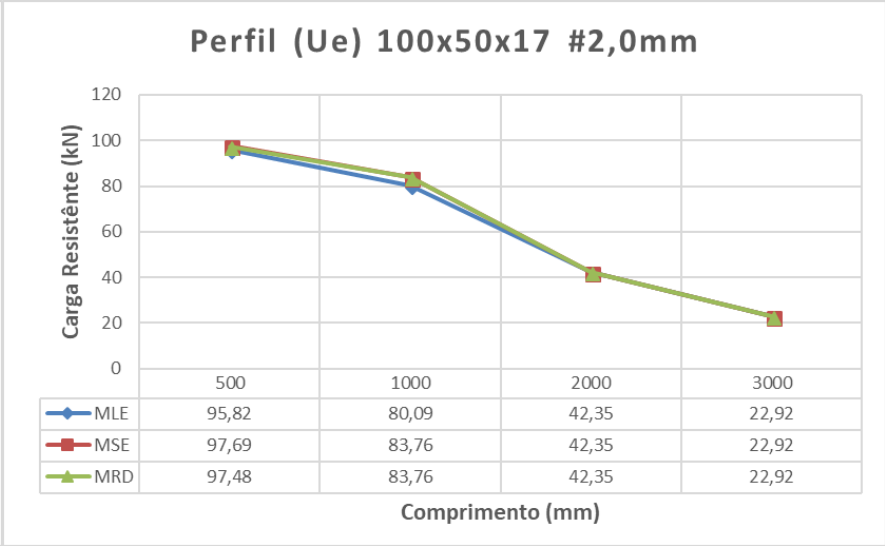

Perfil (Ue) 100x40x17 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
500
1000
2000
3000
MLE 43,56 36,78 17,64 9,4
MSE 38,87 33,26 18,7 9,4
MRD 38,87 33,26 18,7 9,4
Comprimento (mm)

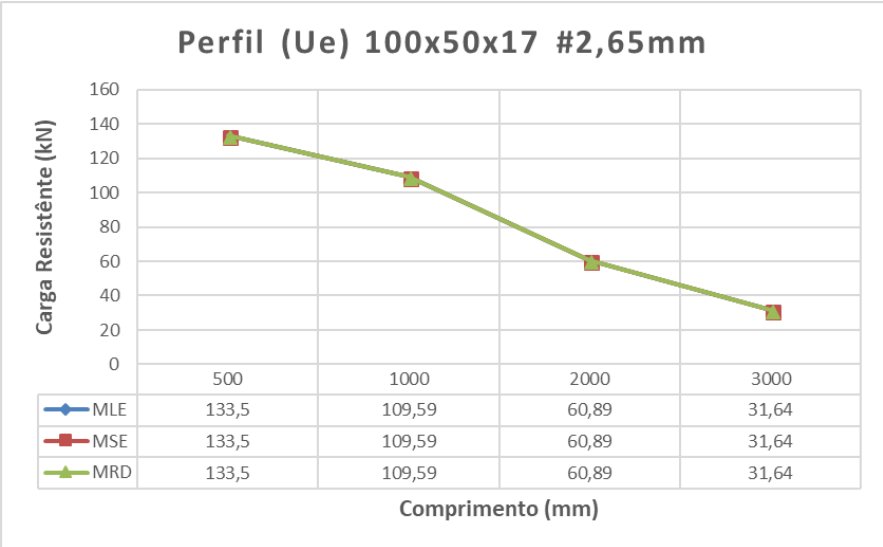

Perfil (Ue) 100x40x17 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
500
1000
2000
3000
MLE 85,81 70,58 33,36 14,83
MSE 88,88 73,84 33,36 14,83
MRD 88,69 73,84 33,36 14,83
Comprimento (mm)

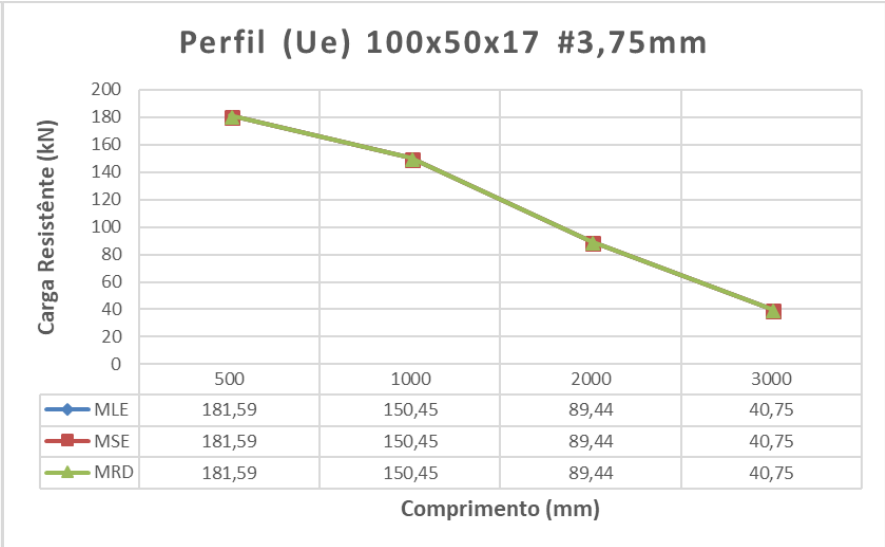

Perfil (Ue) 100x40x17 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
140
120
100
80
60
40
20
0
500
1000
2000
3000
MLE 120,01 97,28 41,37 18,39
MSE 120,1 97,28 41,37 18,39
MRD 120,1 97,28 41,37 18,39
Comprimento (mm)

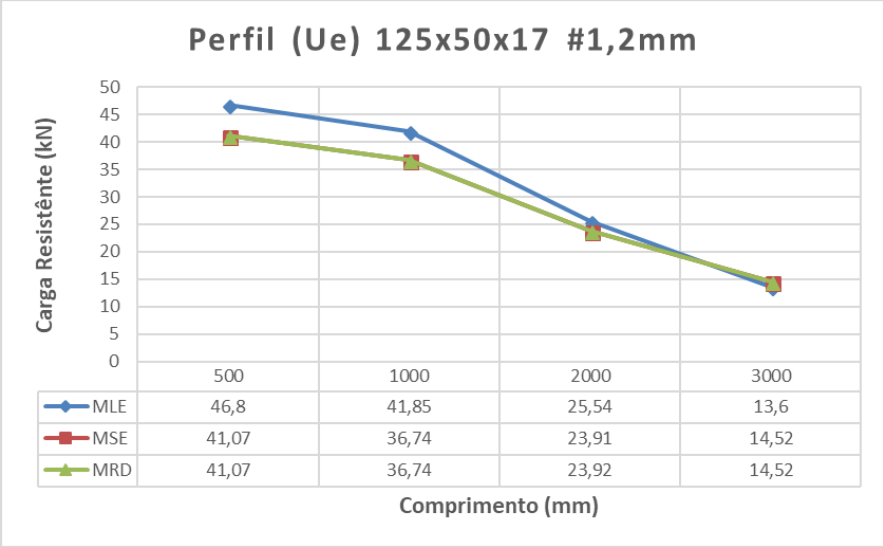

Perfil (Ue) 100x40x17 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
500
1000
2000
3000
MLE 162,78 130,14 52,42 23,2
MSE 162,78 130,14 52,42 23,2
MRD 162,78 130,14 52,42 23,2
Comprimento (mm)

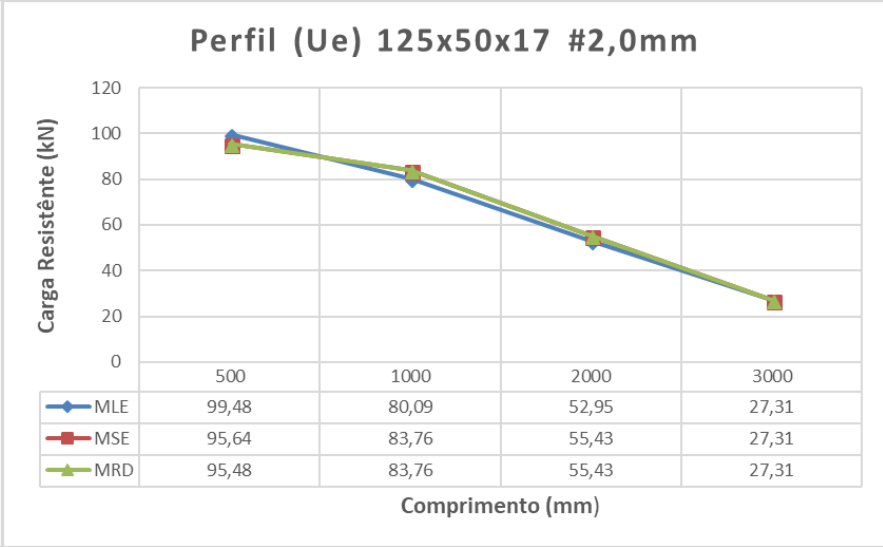

Perfil (Ue) 100x50x17 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
500 1000 2000 3000
MLE 45,9 41,12 21,37 11,22
MSE 42,6 37,11 21,91 11,22
MRD 42,6 37,07 21,89 11,22
Comprimento (mm)

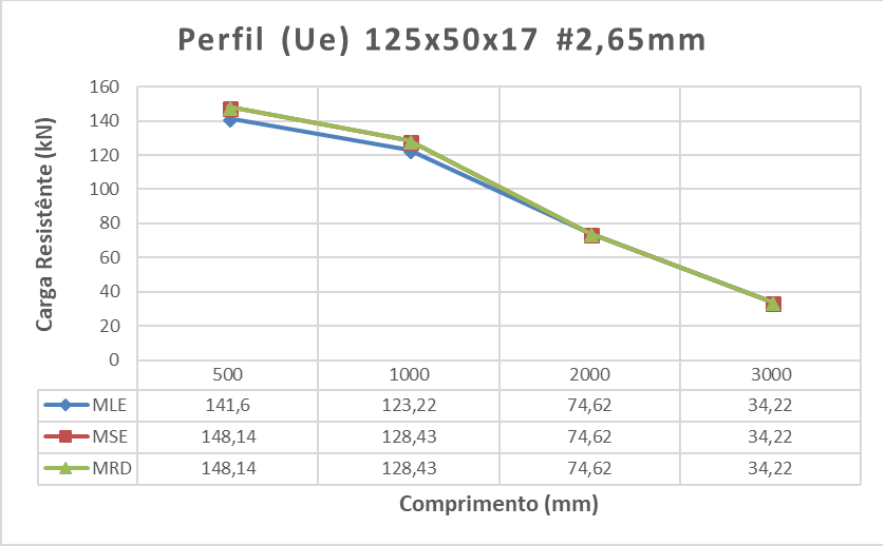

Perfil (Ue) 100x50x17 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
120
100
80
60
40
20
0
500 1000 2000 3000
MLE 95,82 80,09 42,35 22,92
MSE 97,69 83,76 42,35 22,92
MRD 97,48 83,76 42,35 22,92
Comprimento (mm)

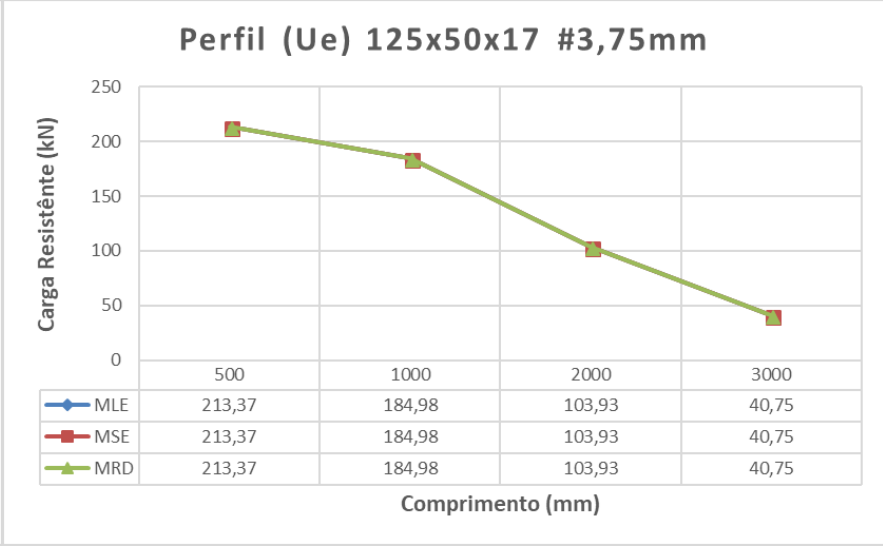

Perfil (Ue) 100x50x17 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
500 1000 2000 3000
MLE 133,5 109,59 60,89 31,64
MSE 133,5 109,59 60,89 31,64
MRD 133,5 109,59 60,89 31,64
Comprimento (mm)

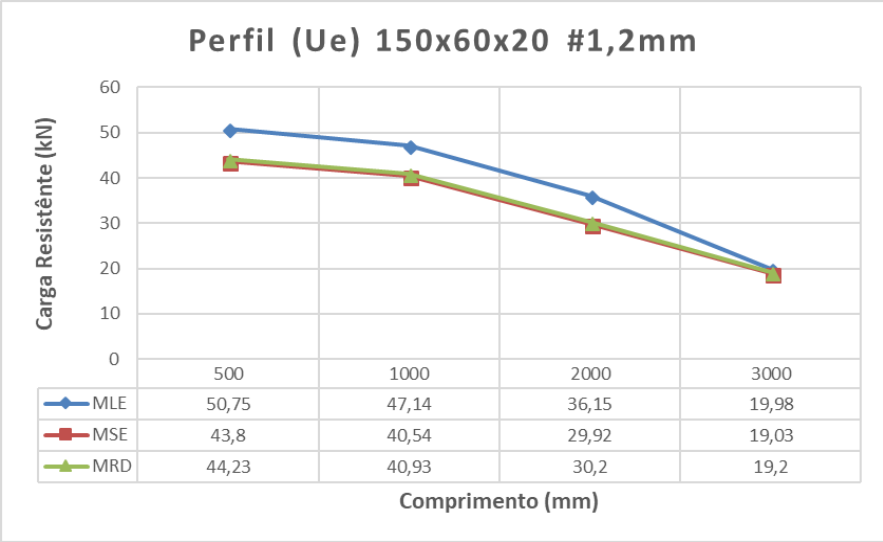

Perfil (Ue) 100x50x17 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
500 1000 2000 3000
MLE 181,59 150,45 89,44 40,75
MSE 181,59 150,45 89,44 40,75
MRD 181,59 150,45 89,44 40,75
Comprimento (mm)

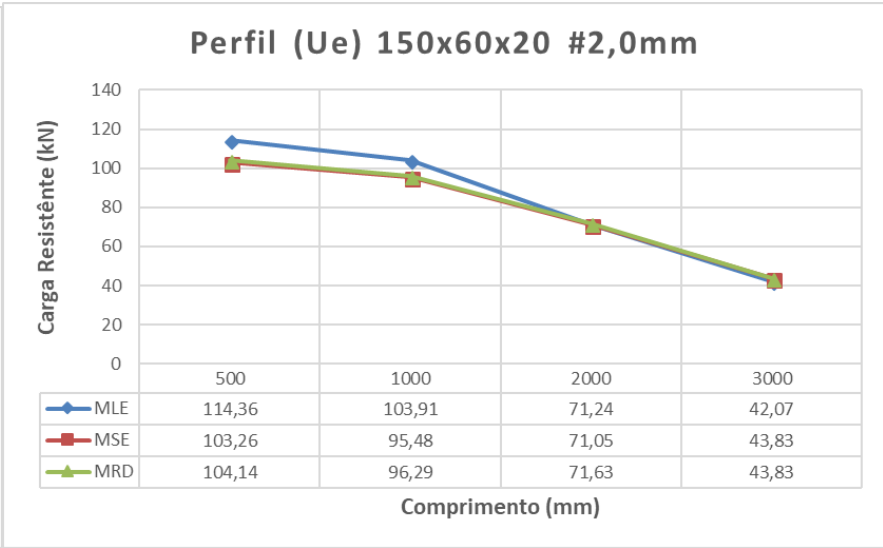

Perfil (Ue) 125x50x17 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
500
1000
2000
3000
MLE 46,8 41,85 25,54 13,6
MSE 41,07 36,74 23,91 14,52
MRD 41,07 36,74 23,92 14,52
Comprimento (mm)

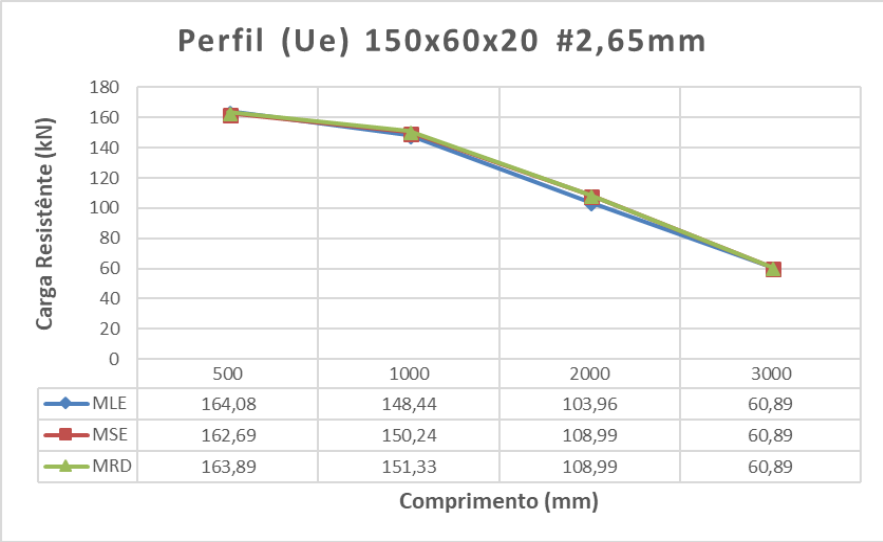

Perfil (Ue) 125x50x17 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
120
100
80
60
40
20
0
500
1000
2000
3000
MLE 99,48 80,09 52,95 27,31
MSE 95,64 83,76 55,43 27,31
MRD 95,48 83,76 55,43 27,31
Comprimento (mm)

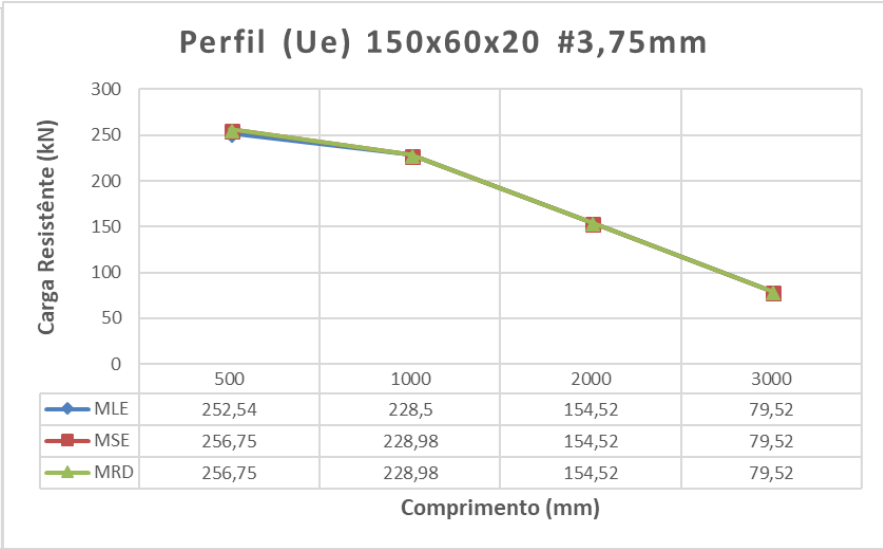

Perfil (Ue) 125x50x17 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
500
1000
2000
3000
MLE 141,6 123,22 74,62 34,22
MSE 148,14 128,43 74,62 34,22
MRD 148,14 128,43 74,62 34,22
Comprimento (mm)

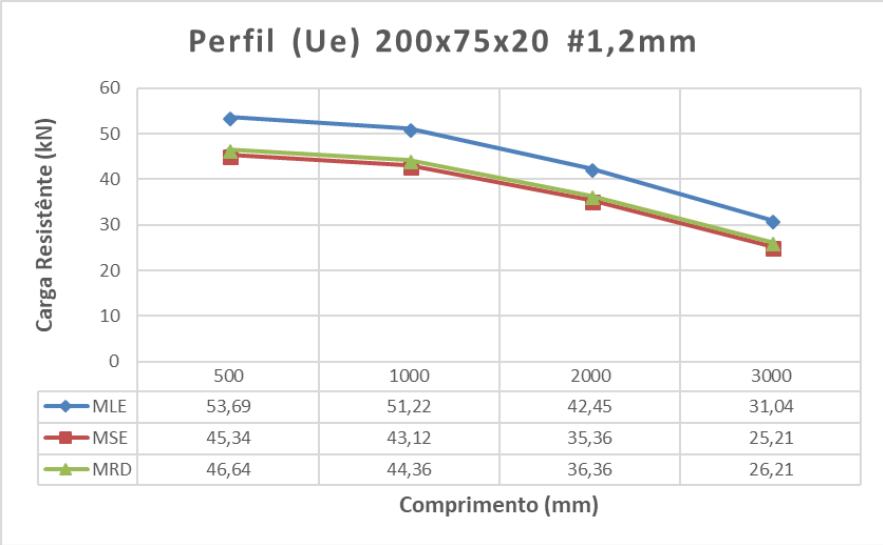

Perfil (Ue) 125x50x17 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
250
200
150
100
50
0
500
1000
2000
3000
MLE 213,37 184,98 103,93 40,75
MSE 213,37 184,98 103,93 40,75
MRD 213,37 184,98 103,93 40,75
Comprimento (mm)

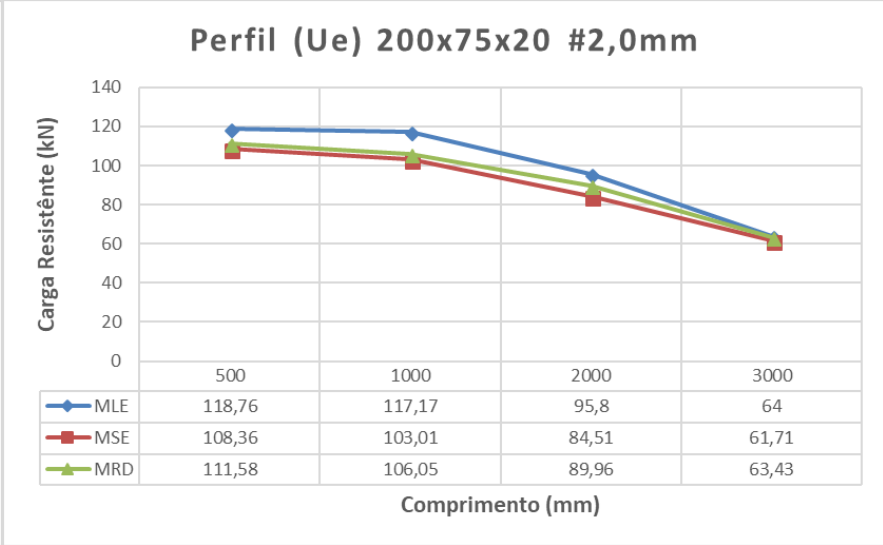

Perfil (Ue) 150x60x20 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
60
50
40
30
20
10
0
500 1000 2000 3000
MLE 50,75 47,14 36,15 19,98
MSE 43,8 40,54 29,92 19,03
MRD 44,23 40,93 30,2 19,2
Comprimento (mm)

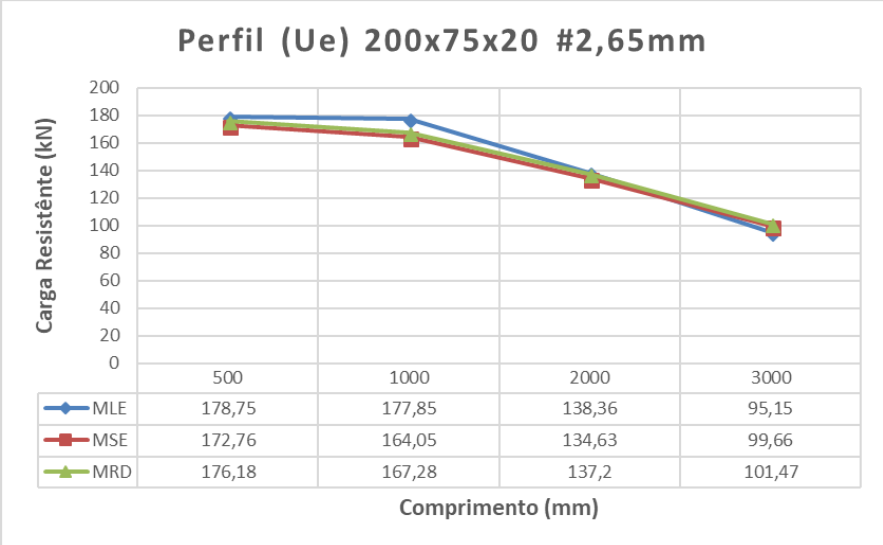

Perfil (Ue) 150x60x20 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
140
120
100
80
60
40
20
0
500 1000 2000 3000
MLE 114,36 103,91 71,24 42,07
MSE 103,26 95,48 71,05 43,83
MRD 104,14 96,29 71,63 43,83
Comprimento (mm)

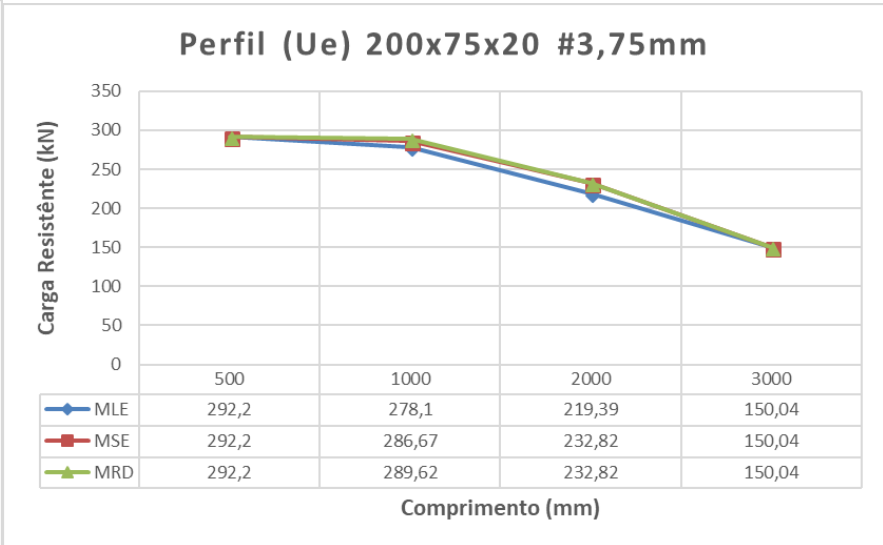

Perfil (Ue) 150x60x20 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
500 1000 2000 3000
MLE 164,08 148,44 103,96 60,89
MSE 162,69 150,24 108,99 60,89
MRD 163,89 151,33 108,99 60,89
Comprimento (mm)

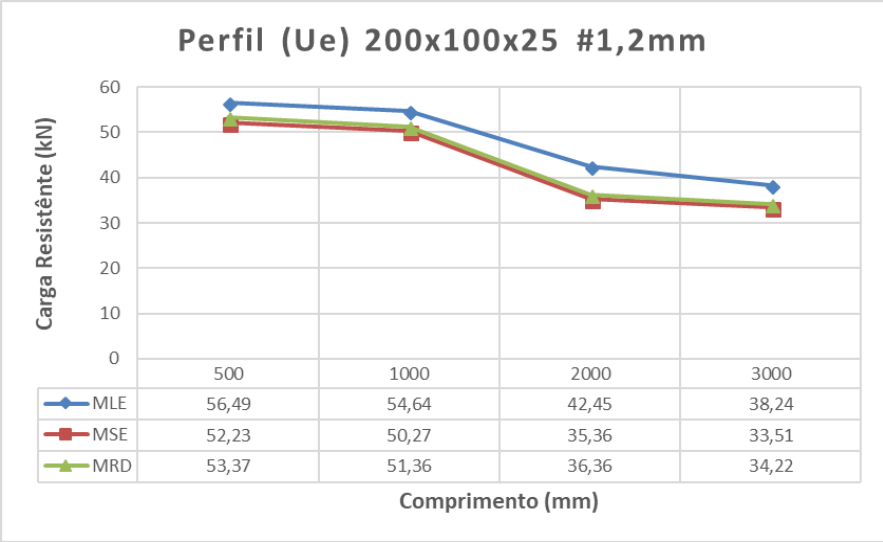

Perfil (Ue) 150x60x20 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
300
250
200
150
100
50
0
500 1000 2000 3000
MLE 252,54 228,5 154,52 79,52
MSE 256,75 228,98 154,52 79,52
MRD 256,75 228,98 154,52 79,52
Comprimento (mm)

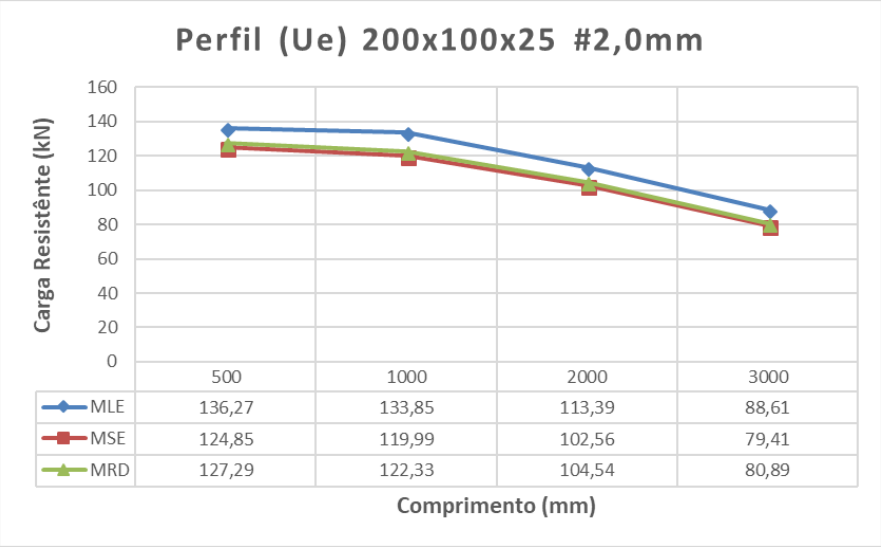

Perfil (Ue) 200x75x20 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
60
50
40
30
20
10
0
500
1000
2000
3000
MLE 53,69 51,22 42,45 31,04
MSE 45,34 43,12 35,36 25,21
MRD 46,64 44,36 36,36 26,21
Comprimento (mm)

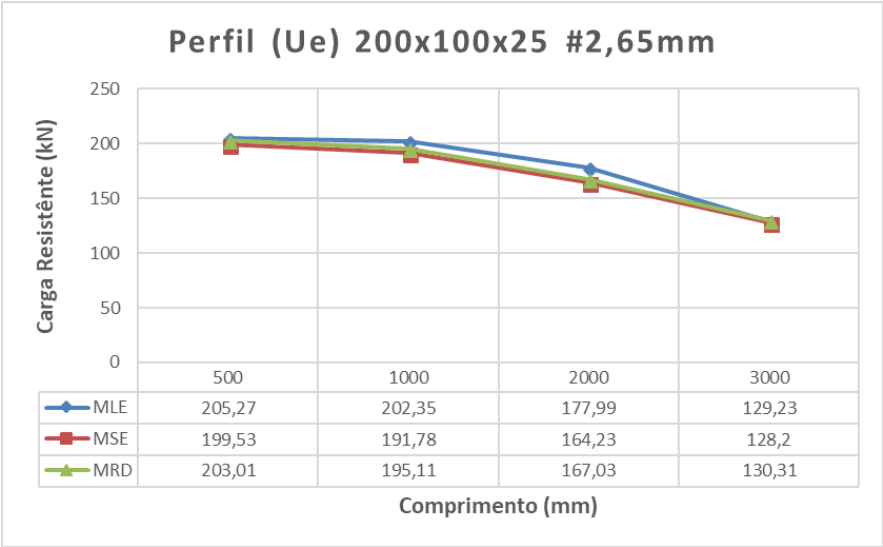

Perfil (Ue) 200x75x20 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
140
120
100
80
60
40
20
0
500
1000
2000
3000
MLE 118,76 117,17 95,8 64
MSE 108,36 103,01 84,51 61,71
MRD 111,58 106,05 89,96 63,43
Comprimento (mm)

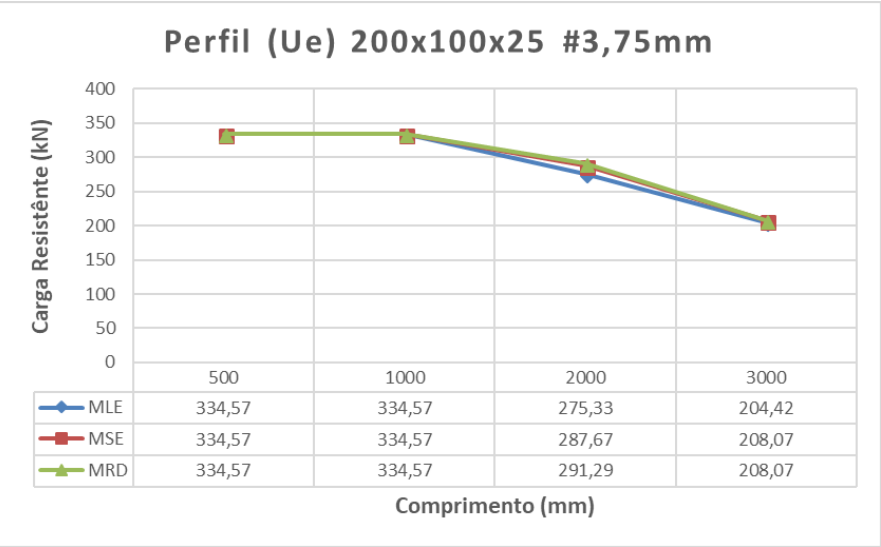

Perfil (Ue) 200x75x20 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
500
1000
2000
3000
MLE 178,75 177,85 138,36 95,15
MSE 172,76 164,05 134,63 99,66
MRD 176,18 167,28 137,2 101,47
Comprimento (mm)

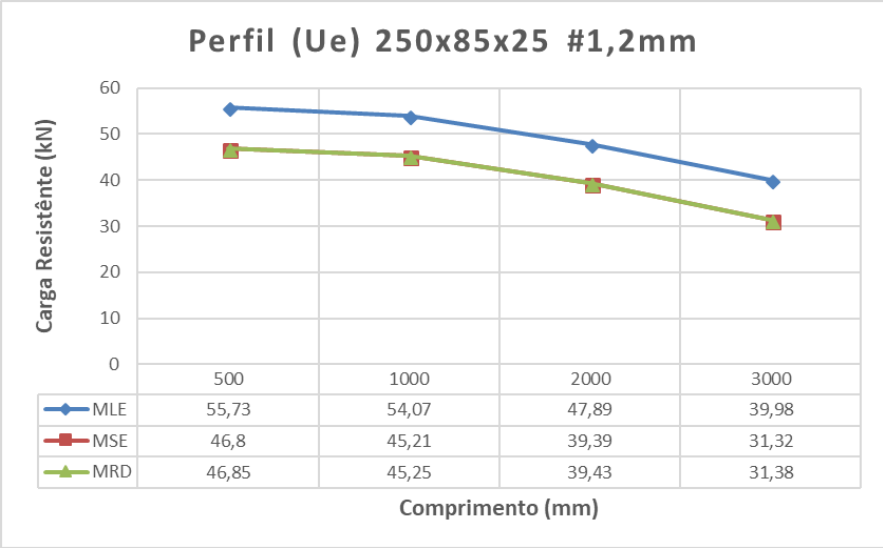

Perfil (Ue) 200x75x20 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
350
300
250
200
150
100
50
0
500
1000
2000
3000
MLE 292,2 278,1 219,39 150,04
MSE 292,2 286,67 232,82 150,04
MRD 292,2 289,62 232,82 150,04
Comprimento (mm)

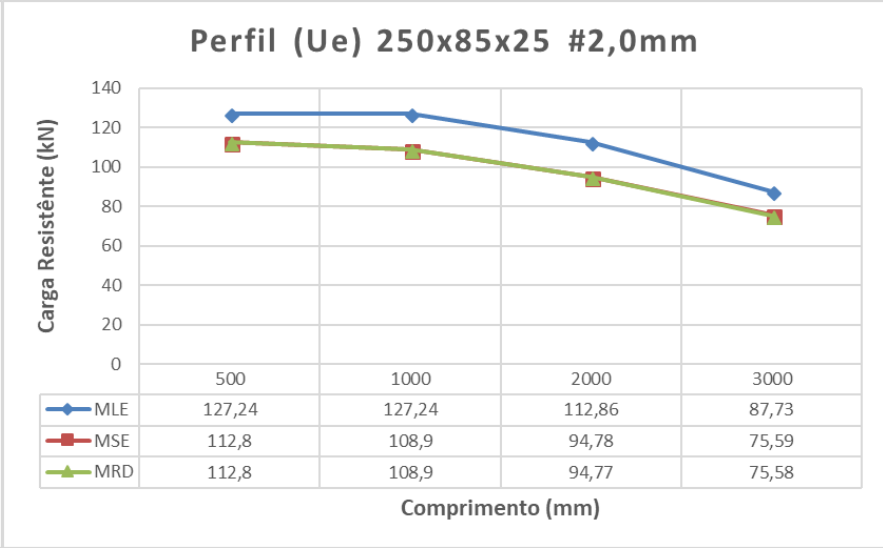

Perfil (Ue) 200x100x25 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
60
50
40
30
20
10
0
500 1000 2000 3000
MLE 56,49 54,64 42,45 38,24
MSE 52,23 50,27 35,36 33,51
MRD 53,37 51,36 36,36 34,22
Comprimento (mm)

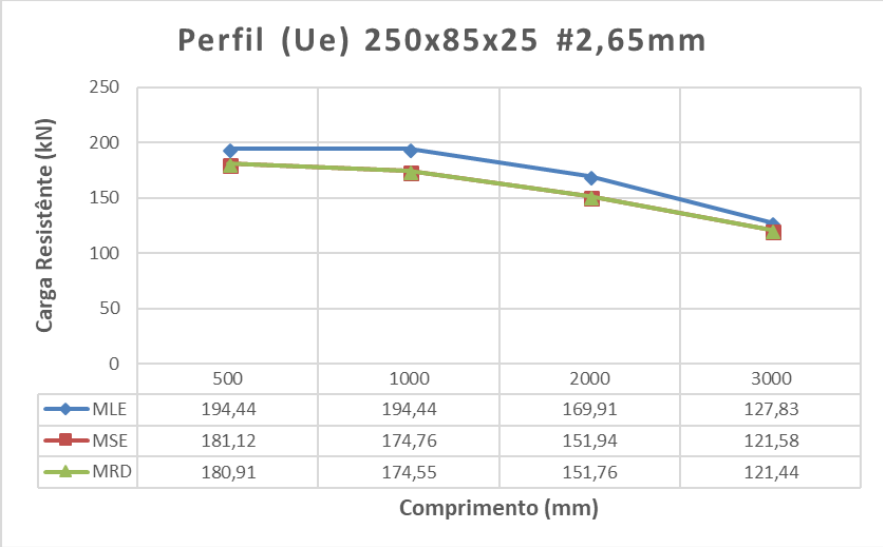

Perfil (Ue) 200x100x25 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
500 1000 2000 3000
MLE 136,27 133,85 113,39 88,61
MSE 124,85 119,99 102,56 79,41
MRD 127,29 122,33 104,54 80,89
Comprimento (mm)

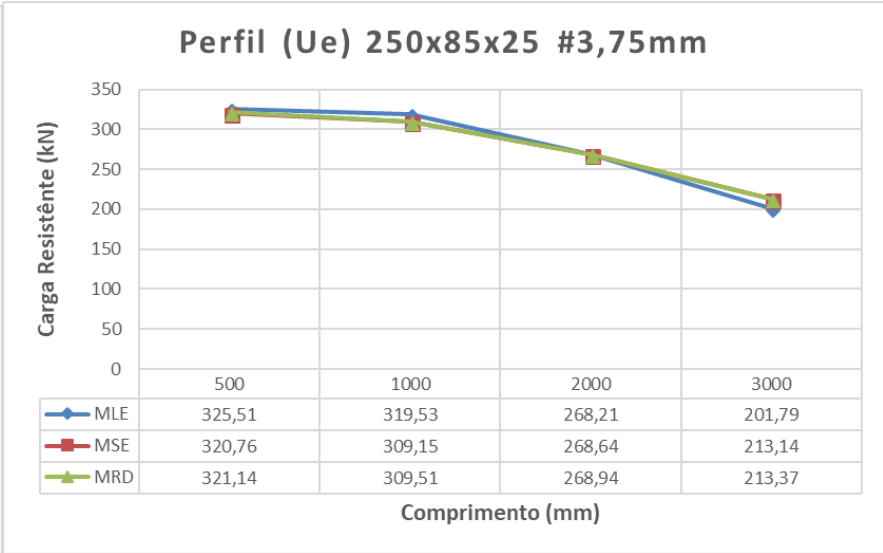

Perfil (Ue) 200x100x25 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
250
200
150
100
50
0
500 1000 2000 3000
MLE 205,27 202,35 177,99 129,23
MSE 199,53 191,78 164,23 128,2
MRD 203,01 195,11 167,03 130,31
Comprimento (mm)

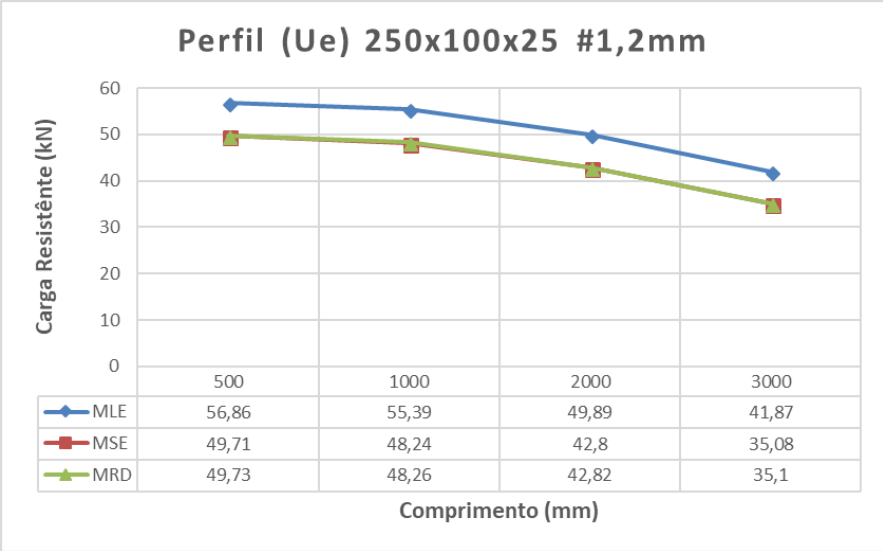

Perfil (Ue) 200x100x25 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
400
350
300
250
200
150
100
50
0
500 1000 2000 3000
MLE 334,57 334,57 275,33 204,42
MSE 334,57 334,57 287,67 208,07
MRD 334,57 334,57 291,29 208,07
Comprimento (mm)

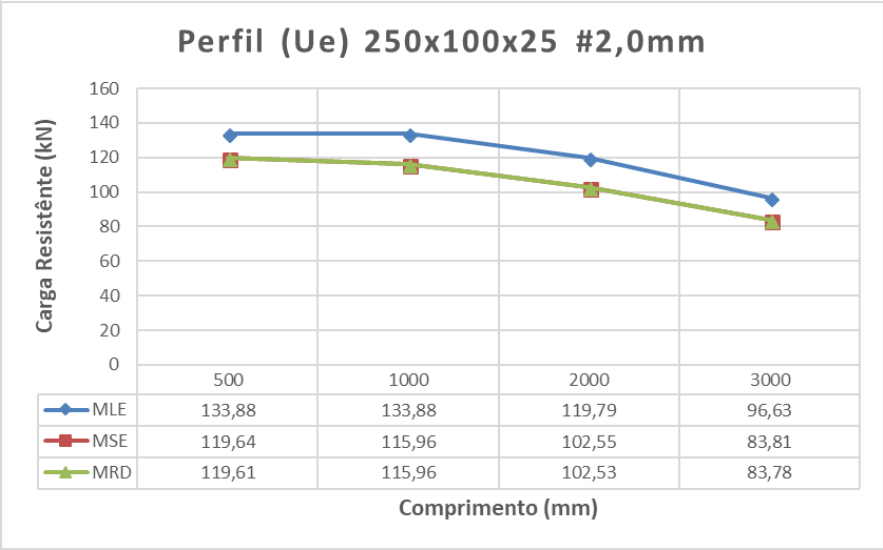

Perfil (Ue) 250x85x25 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
60
50
40
30
20
10
0
500 1000 2000 3000
MLE 55,73 54,07 47,89 39,98
MSE 46,8 45,21 39,39 31,32
MRD 46,85 45,25 39,43 31,38
Comprimento (mm)

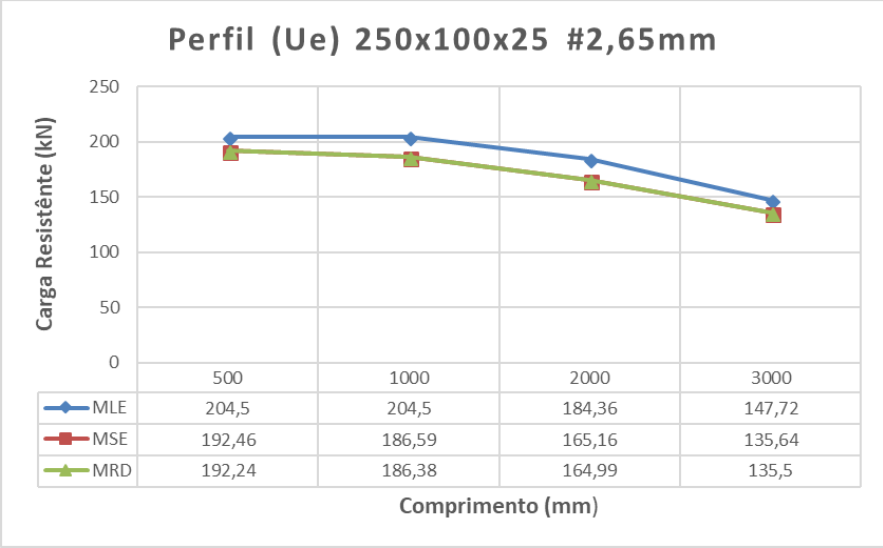

Perfil (Ue) 250x85x25 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
140
120
100
80
60
40
20
0
500 1000 2000 3000
MLE 127,24 127,24 112,86 87,73
MSE 112,8 108,9 94,78 75,59
MRD 112,8 108,9 94,77 75,58
Comprimento (mm)

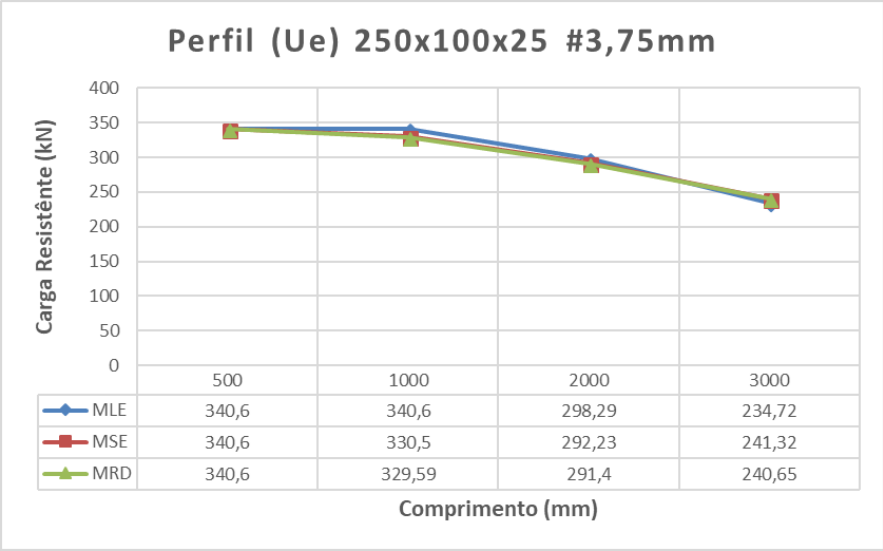

Perfil (Ue) 250x85x25 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
250
200
150
100
50
0
500 1000 2000 3000
MLE 194,44 194,44 169,91 127,83
MSE 181,12 174,76 151,94 121,58
MRD 180,91 174,55 151,76 121,44
Comprimento (mm)

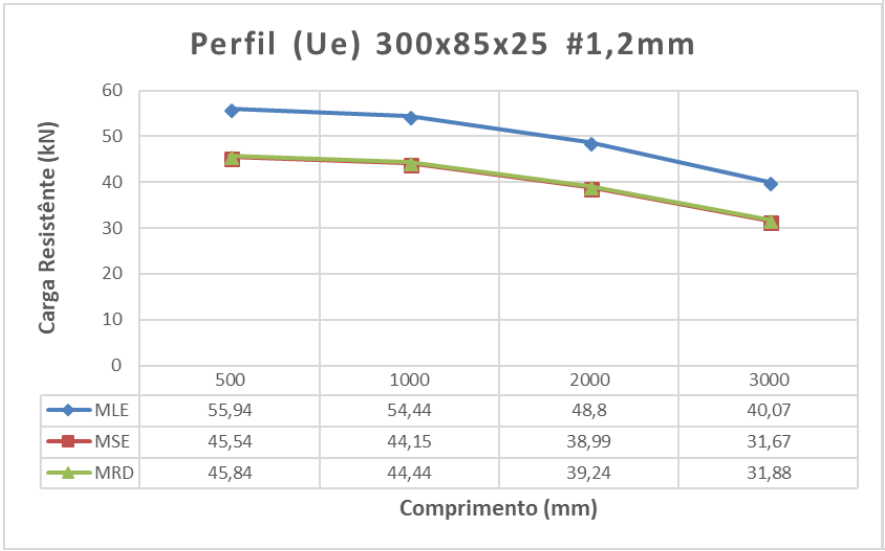

Perfil (Ue) 250x85x25 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
350
300
250
200
150
100
50
0
500 1000 2000 3000
MLE 325,51 319,53 268,21 201,79
MSE 320,76 309,15 268,64 213,14
MRD 321,14 309,51 268,94 213,37
Comprimento (mm)

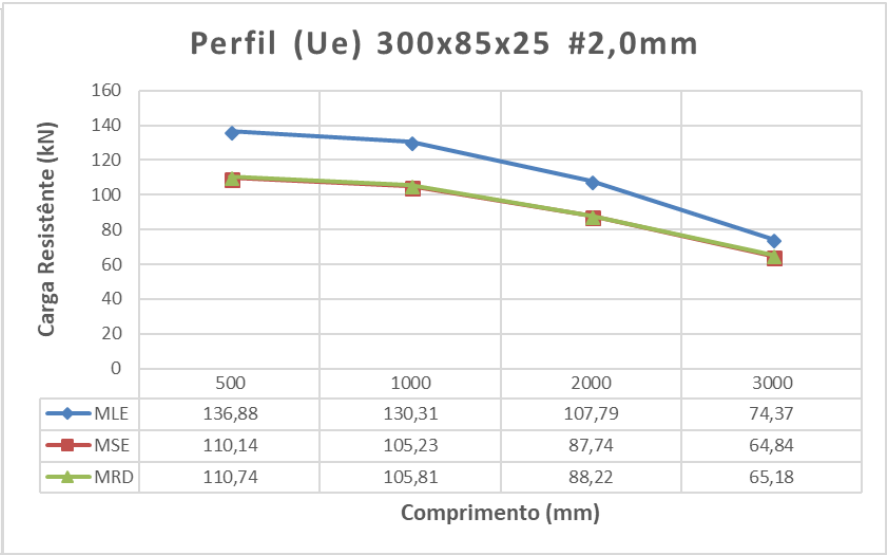

Perfil (Ue) 250x100x25 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
60
50
40
30
20
10
0
500 1000 2000 3000
MLE 56,86 55,39 49,89 41,87
MSE 49,71 48,24 42,8 35,08
MRD 49,73 48,26 42,82 35,1
Comprimento (mm)

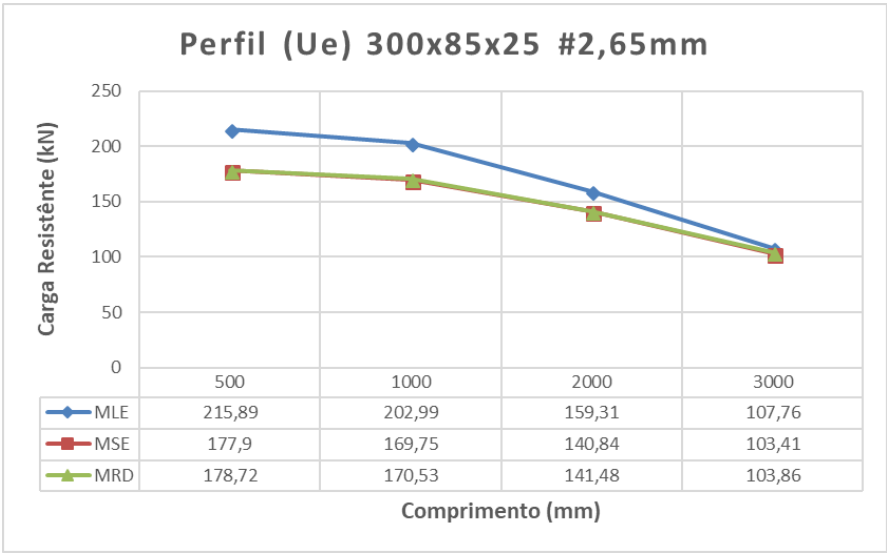

Perfil (Ue) 250x100x25 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
500 1000 2000 3000
MLE 133,88 133,88 119,79 96,63
MSE 119,64 115,96 102,55 83,81
MRD 119,61 115,96 102,53 83,78
Comprimento (mm)

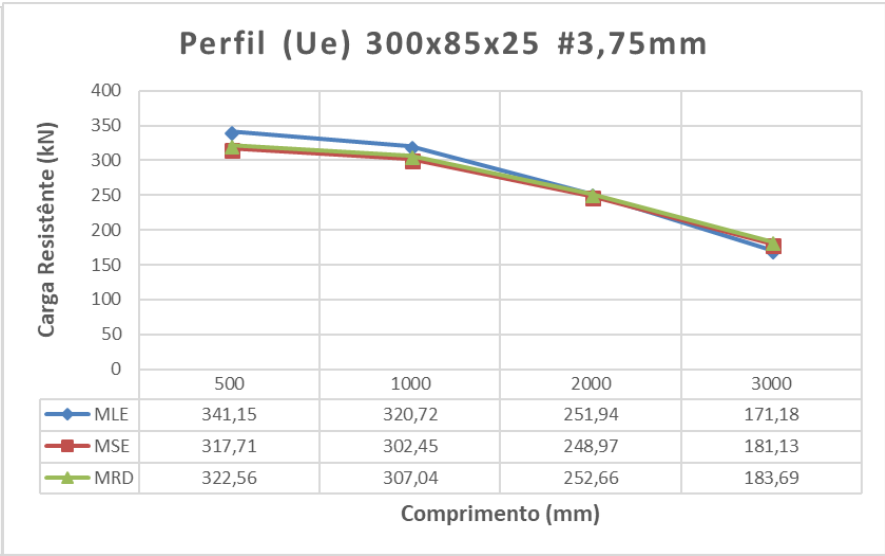

Perfil (Ue) 250x100x25 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
250
200
150
100
50
0
500 1000 2000 3000
MLE 204,5 204,5 184,36 147,72
MSE 192,46 186,59 165,16 135,64
MRD 192,24 186,38 164,99 135,5
Comprimento (mm)

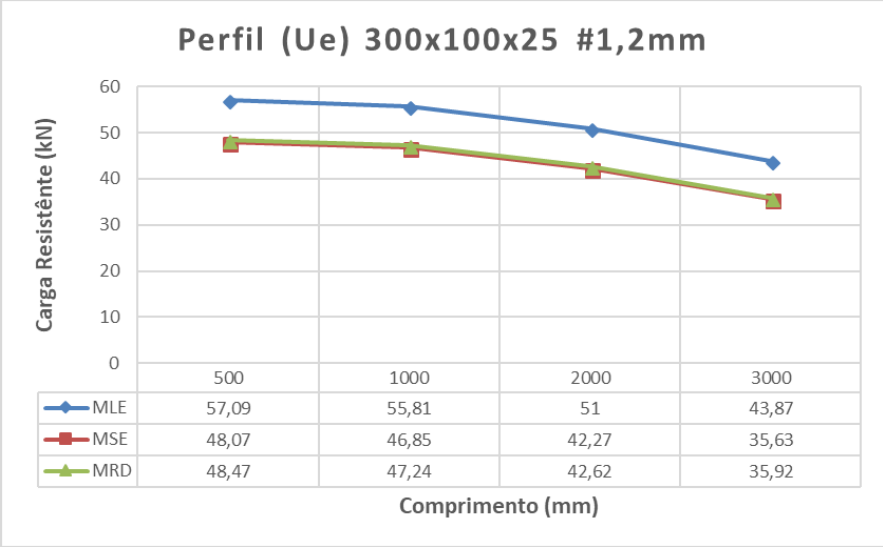

Perfil (Ue) 250x100x25 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
400
350
300
250
200
150
100
50
0
500 1000 2000 3000
MLE 340,6 340,6 298,29 234,72
MSE 340,6 330,5 292,23 241,32
MRD 340,6 329,59 291,4 240,65
Comprimento (mm)

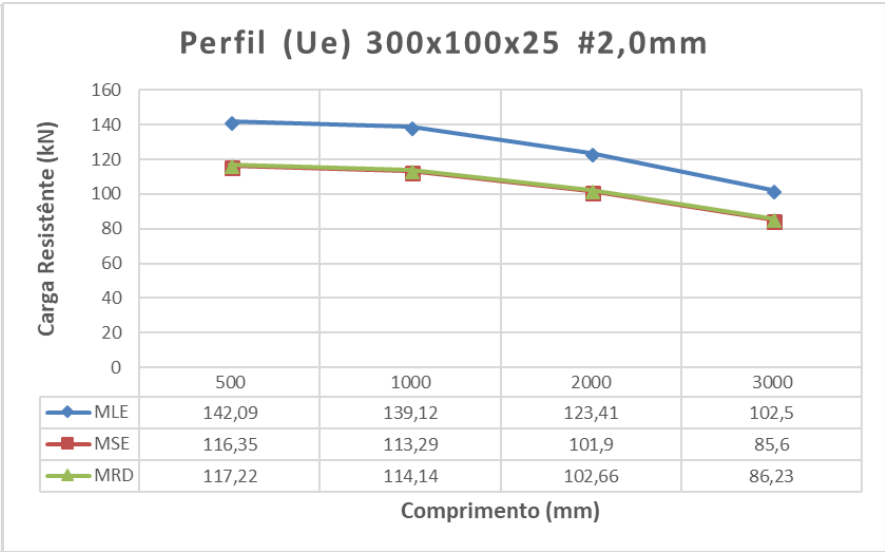

Perfil (Ue) 300x85x25 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
60
50
40
30
20
10
0
500
1000
2000
3000
MLE 55,94 54,44 48,8 40,07
MSE 45,54 44,15 38,99 31,67
MRD 45,84 44,44 39,24 31,88
Comprimento (mm)

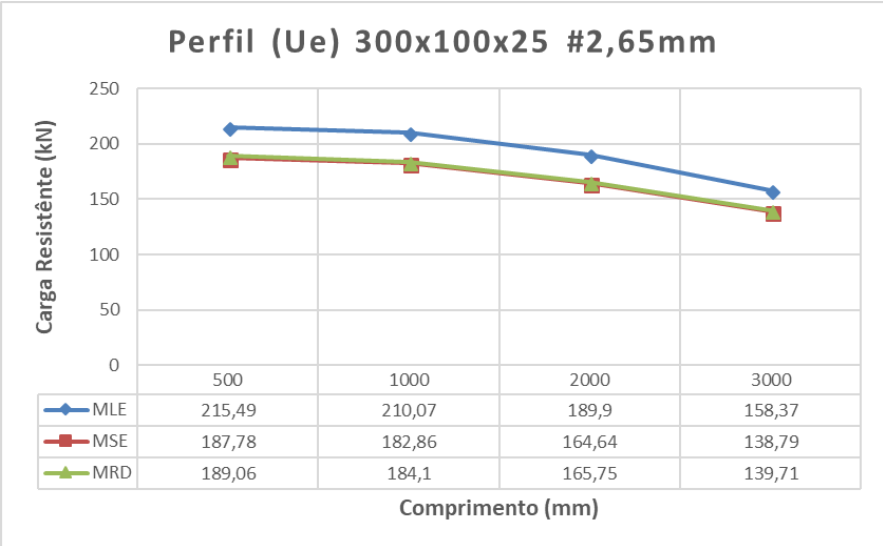

Perfil (Ue) 300x85x25 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
500
1000
2000
3000
MLE 136,88 130,31 107,79 74,37
MSE 110,14 105,23 87,74 64,84
MRD 110,74 105,81 88,22 65,18
Comprimento (mm)

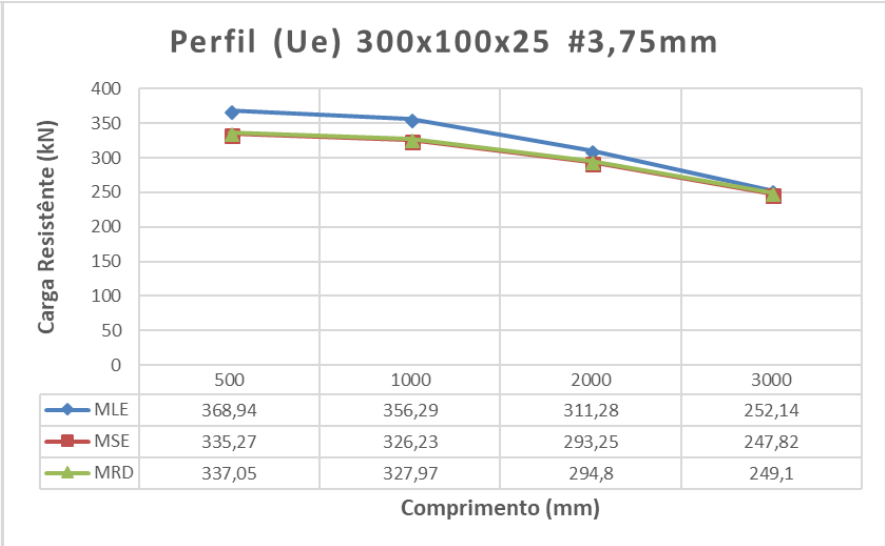

Perfil (Ue) 300x85x25 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
250
200
150
100
50
0
500
1000
2000
3000
MLE 215,89 202,99 159,31 107,76
MSE 177,9 169,75 140,84 103,41
MRD 178,72 170,53 141,48 103,86
Comprimento (mm)

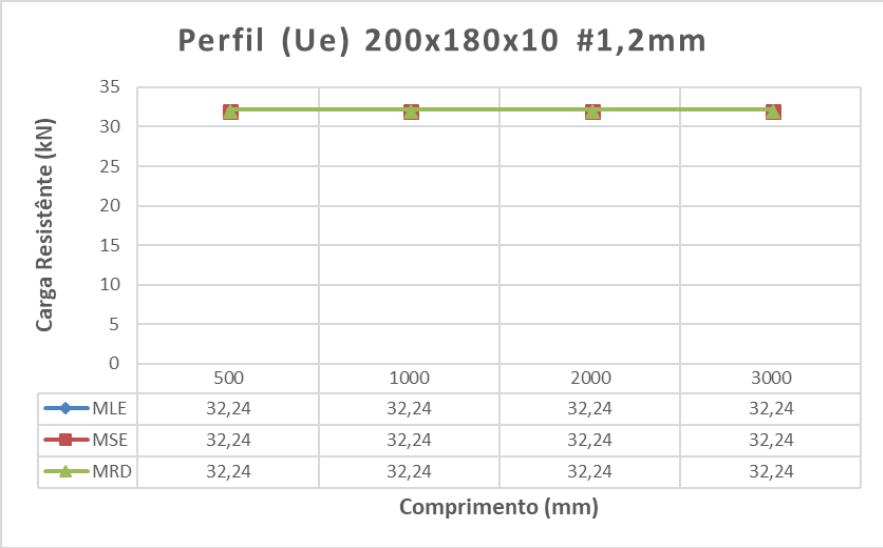

Perfil (Ue) 300x85x25 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
400
350
300
250
200
150
100
50
0
500
1000
2000
3000
MLE 341,15 320,72 251,94 171,18
MSE 317,71 302,45 248,97 181,13
MRD 322,56 307,04 252,66 183,69
Comprimento (mm)

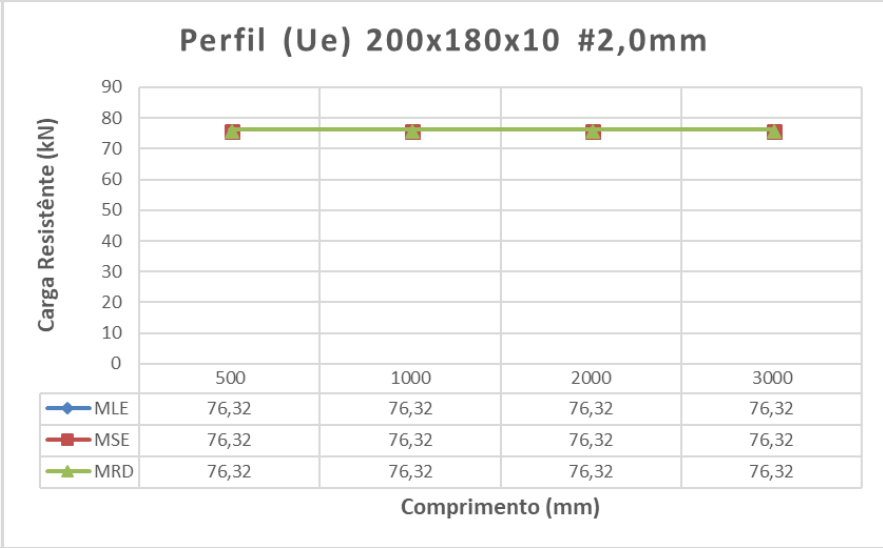

Perfil (Ue) 300x100x25 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
60
50
40
30
20
10
0
500
1000
2000
3000
MLE 57,09 55,81 51 43,87
MSE 48,07 46,85 42,27 35,63
MRD 48,47 47,24 42,62 35,92
Comprimento (mm)

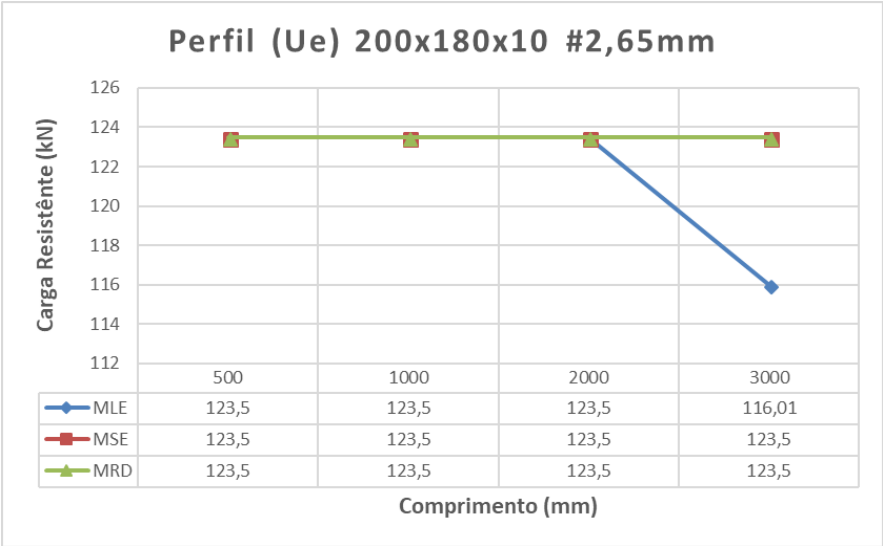

Perfil (Ue) 300x100x25 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
500
1000
2000
3000
MLE 142,09 139,12 123,41 102,5
MSE 116,35 113,29 101,9 85,6
MRD 117,22 114,14 102,66 86,23
Comprimento (mm)

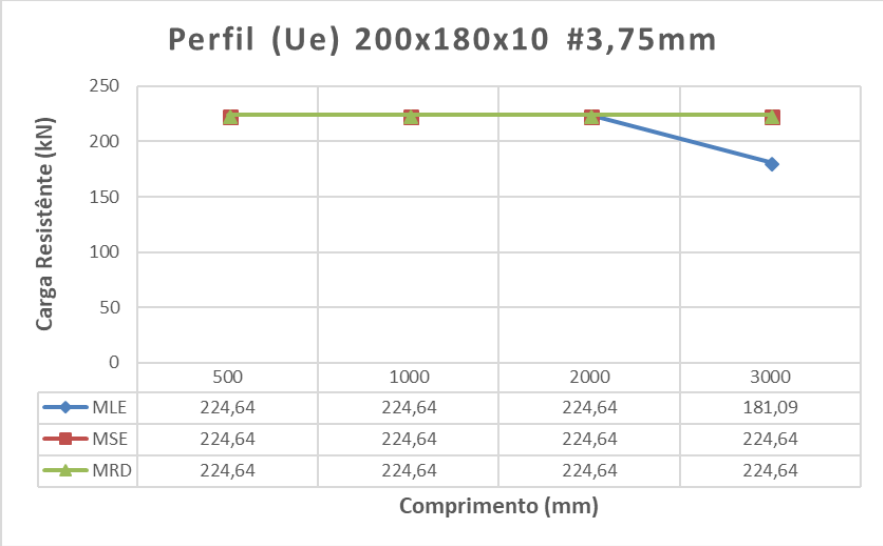

Perfil (Ue) 300x100x25 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
250
200
150
100
50
0
500
1000
2000
3000
MLE 215,49 210,07 189,9 158,37
MSE 187,78 182,86 164,64 138,79
MRD 189,06 184,1 165,75 139,71
Comprimento (mm)

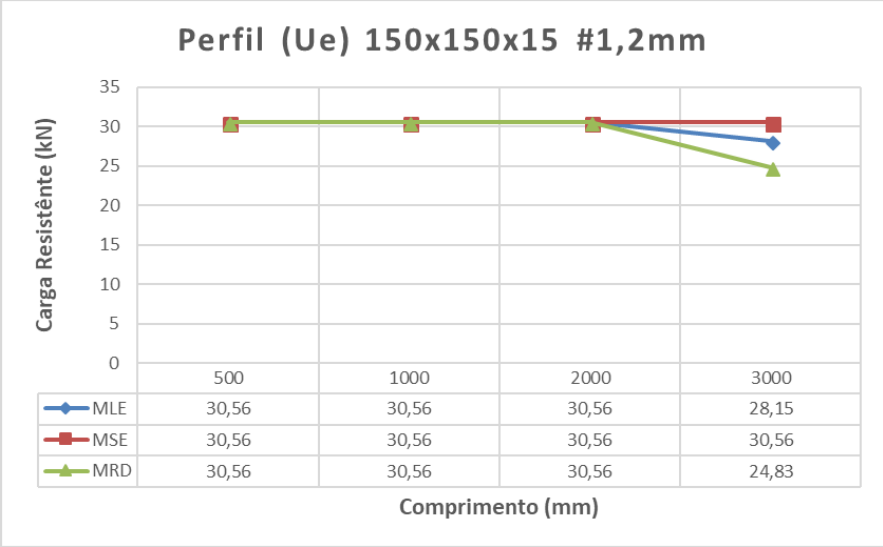

Perfil (Ue) 300x100x25 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
400
350
300
250
200
150
100
50
0
500
1000
2000
3000
MLE 368,94 356,29 311,28 252,14
MSE 335,27 326,23 293,25 247,82
MRD 337,05 327,97 294,8 249,1
Comprimento (mm)

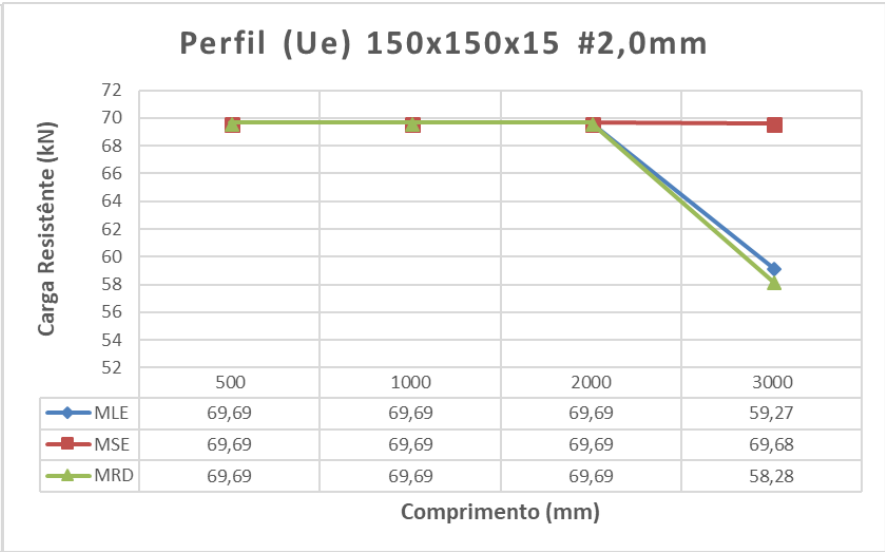

Perfil (Ue) 200x180x10 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
35
30
25
20
15
10
5
0
500
1000
2000
3000
MLE 32,24 32,24 32,24 32,24
MSE 32,24 32,24 32,24 32,24
MRD 32,24 32,24 32,24 32,24
Comprimento (mm)

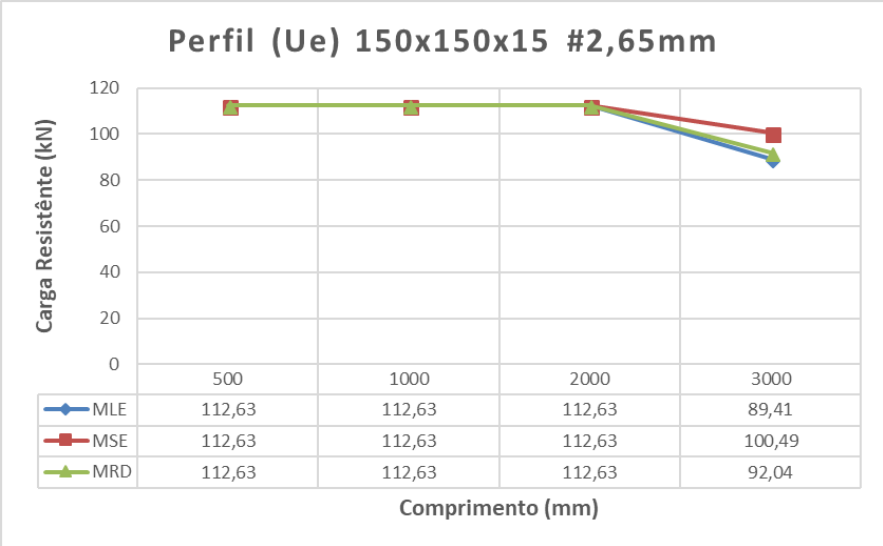

Perfil (Ue) 200x180x10 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
500
1000
2000
3000
MLE 76,32 76,32 76,32 76,32
MSE 76,32 76,32 76,32 76,32
MRD 76,32 76,32 76,32 76,32
Comprimento (mm)

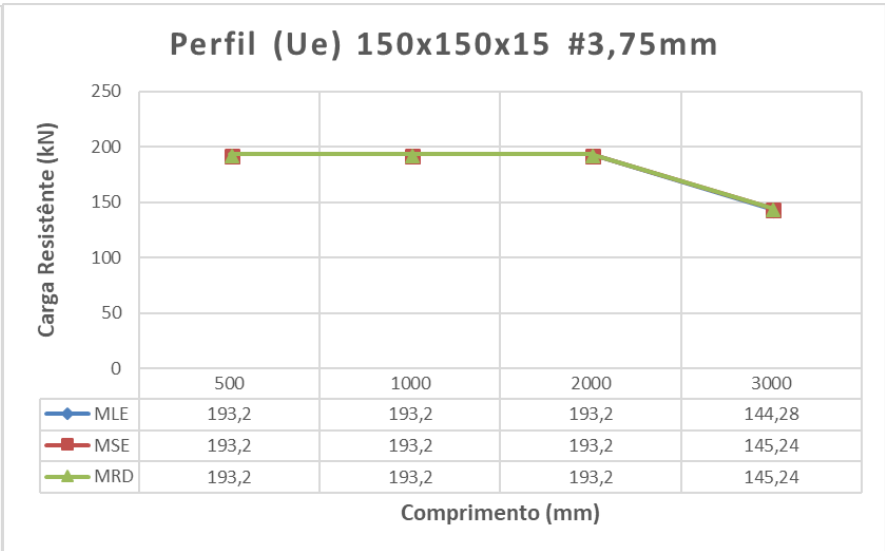

Perfil (Ue) 200x180x10 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
126
124
122
120
118
116
114
112
500
1000
2000
3000
MLE 123,5 123,5 123,5 116,01
MSE 123,5 123,5 123,5 123,5
MRD 123,5 123,5 123,5 123,5
Comprimento (mm)

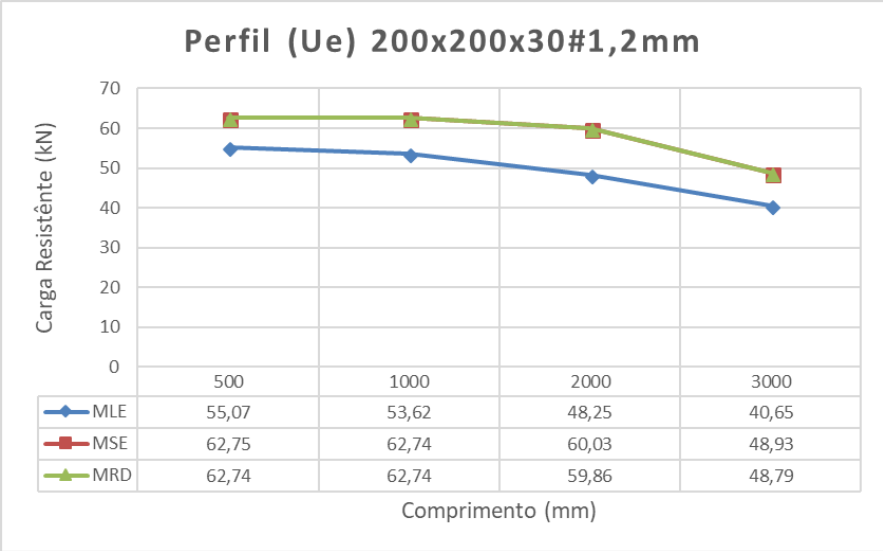

Perfil (Ue) 200x180x10 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
250
200
150
100
50
0
500
1000
2000
3000
MLE 224,64 224,64 224,64 181,09
MSE 224,64 224,64 224,64 224,64
MRD 224,64 224,64 224,64 224,64
Comprimento (mm)

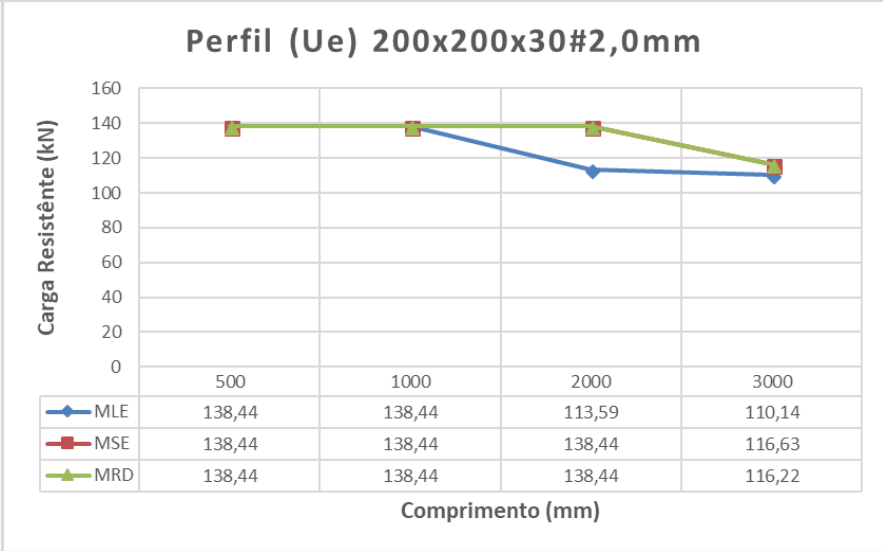

Perfil (Ue) 150x150x15 #1,2mm
Carga Resistênte (kN)
35
30
25
20
15
10
5
0
500
1000
2000
3000
MLE 30,56 30,56 30,56 28,15
MSE 30,56 30,56 30,56 30,56
MRD 30,56 30,56 30,56 24,83
Comprimento (mm)

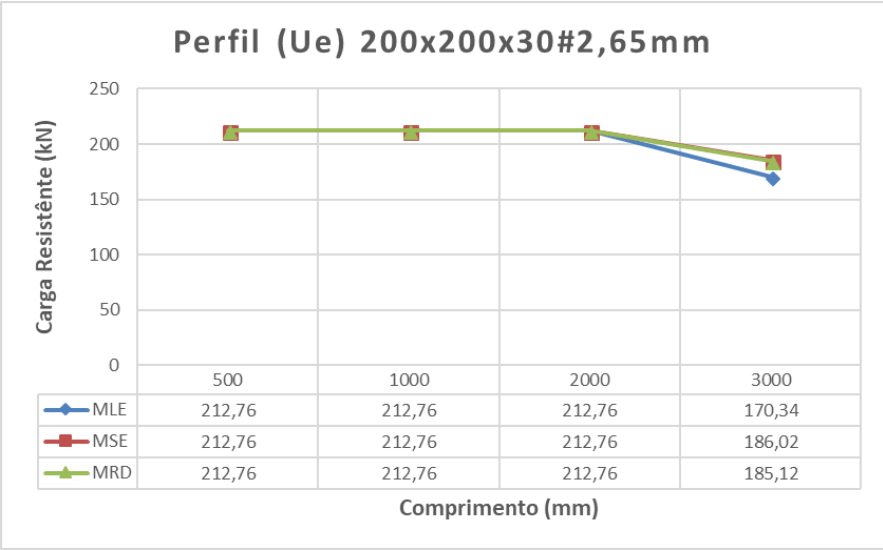

Perfil (Ue) 150x150x15 #2,0mm
Carga Resistênte (kN)
72
70
68
66
64
62
60
58
56
54
52
500
1000
2000
3000
MLE 69,69 69,69 69,69 59,27
MSE 69,69 69,69 69,69 69,68
MRD 69,69 69,69 69,69 58,28
Comprimento (mm)

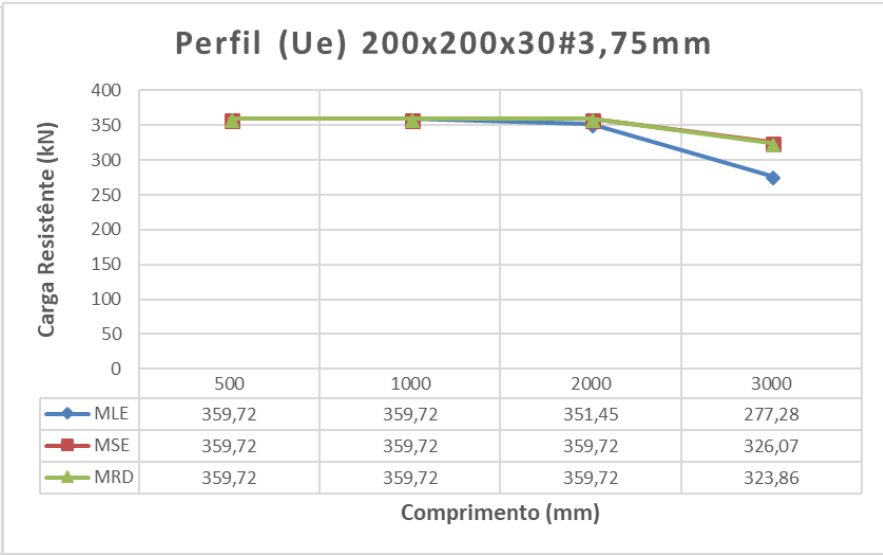

Perfil (Ue) 150x150x15 #2,65mm
Carga Resistênte (kN)
120
100
80
60
40
20
0
500
1000
2000
3000
MLE 112,63 112,63 112,63 89,41
MSE 112,63 112,63 112,63 100,49
MRD 112,63 112,63 112,63 92,04
Comprimento (mm)


Perfil (Ue) 150x150x15 #3,75mm
Carga Resistênte (kN)
250
200
150
100
50
0
500
1000
2000
3000
MLE 193,2 193,2 193,2 144,28
MSE 193,2 193,2 193,2 145,24
MRD 193,2 193,2 193,2 145,24
Comprimento (mm)


Perfil (Ue) 200x200x30#1,2mm
Carga Resistênte (kN)
70
60
50
40
30
20
10
0
500
1000
2000
3000
MLE 55,07 53,62 48,25 40,65
MSE 62,75 62,74 60,03 48,93
MRD 62,74 62,74 59,86 48,79
Comprimento (mm)


Perfil (Ue) 200x200x30#2,0mm
Carga Resistênte (kN)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
500
1000
2000
3000
MLE 138,44 138,44 113,59 110,14
MSE 138,44 138,44 138,44 116,63
MRD 138,44 138,44 138,44 116,22
Comprimento (mm)


Perfil (Ue) 200x200x30#2,65mm
Carga Resistênte (kN)
250
200
150
100
50
0
500
1000
2000
3000
MLE 212,76 212,76 212,76 170,34
MSE 212,76 212,76 212,76 186,02
MRD 212,76 212,76 212,76 185,12
Comprimento (mm)


Perfil (Ue) 200x200x30#3,75mm
Carga Resistênte (kN)
400
350
300
250
200
150
100
50
0
500
1000
2000
3000
MLE 359,72 359,72 351,45 277,28
MSE 359,72 359,72 359,72 326,07
MRD 359,72 359,72 359,72 323,86
Comprimento (mm)

ANEXO A – PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

No.	A cm^2	b_{fw} mm	b_f mm	D mm	t = t_n mm	I_x cm^4	r_x cm	x_0 cm	I_y cm^4	r_y cm	J cm^4	C_w cm^6	r_0 cm	σl=	σd=
1	1,35	50	25	10	1,2	5,24	1,97	2,17	1,23	0,95	0,013	8,13	3,08	562,54	689,23
2	2,14	50	25	10	2	7,93	1,93	2,07	1,78	0,91	0,029	11,68	2,97	1537,7	1221,65
3	2,72	50	25	10	2,65	9,68	1,89	1,99	2,09	0,88	0,065	13,66	2,88	2644,3	x
4	3,57	50	25	10	3,75	11,87	1,82	1,82	2,43	0,82	0,16759	12,14	2,71	x	x
5	2,13	75	40	15	1,2	19,32	3,02	3,56	5,14	1,55	0,01	76,95	4,92	249,34	411,3
6	3,44	75	40	15	2	30,33	2,97	3,47	7,88	1,51	0,046	116,73	4,81	688,31	737,32
7	4,44	75	40	15	2,65	38,22	2,93	3,39	9,72	1,48	0,106	143,09	4,72	1199,21	1002,63
8	6,02	75	40	15	3,75	49,59	2,87	3,24	12,23	1,42	0,282	156,5	4,55	2355,93	1571,61
9	2,47	100	40	17	1,2	38,29	3,93	3,36	6,01	1,56	0,01	148,49	5,41	144,91	316,68
10	4,02	100	40	17	2	60,66	3,89	3,27	9,25	1,52	0,05	227,57	5,3	399,94	563,49
11	5,21	100	40	17	2,65	77,03	3,85	3,19	11,47	1,48	0,12	281,34	5,21	696,69	798,49
12	7,104	100	40	17	3,75	101,2017	3,77	3,042	14,5345	1,4307	0,33283	316,783	5,0564	1369,05	1203,39
13	2,71	100	50	17	1,2	44,15	4,03	4,28	10,12	1,93	0,013	246,61	6,19	141,5	287,25
14	4,42	100	50	17	2	70,26	3,99	4,18	15,76	1,89	0,06	381,65	6,08	391,32	515,02
15	5,74	100	50	17	2,65	89,59	3,95	4,1	19,74	1,85	0,13	475,74	5,99	683,35	708,02
16	7,85	100	50	17	3,75	118,58	3,89	3,95	25,42	1,77	0,36799	550,21	5,83	1350,61	1098,92
17	3,01	125	50	17	1,2	73,86	4,95	3,96	10,94	1,91	0,0145	372,96	6,62	92,78	223,61
18	4,92	125	50	17	2	118,35	4,91	3,87	17,04	1,86	0,07	594,42	6,52	256,35	402,76
19	6,4	125	50	17	2,65	151,52	4,87	3,79	21,35	1,83	0,15	744,3	6,43	447,22	560,85
20	9,01	125	50	17	3,75	206,34	4,78	3,86	29,64	1,81	0,42	1103,07	6,41	882,05	882,31
21	3,62	150	60	20	1,2	128,64	5,95	4,76	19,05	2,29	0,0174	933,23	7,96	66,17	181,02
22	5,94	150	60	20	2	207,59	5,91	4,66	30,02	2,25	0,08	1498,57	7,86	183,44	320,8
23	7,75	150	60	20	2,65	267,39	5,87	4,59	37,99	2,21	0,18	1894,61	7,77	321,29	447,34
24	10,7	150	60	20	3,75	360,28	5,8	4,46	49,61	2,15	0,5	2473,81	7,63	639,81	689,85
25	4,58	200	75	20	1,2	287,51	7,91	5,51	35,41	2,78	0,022	2846,6	10,04	39,35	110,14
26	7,54	200	75	20	2	467,42	7,88	5,42	56,3	2,73	0,1	4615,39	9,94	109,95	199,77
27	9,87	200	75	20	2,65	605,75	7,83	5,34	71,79	2,7	0,23	5890,44	9,86	188,23	275,46

No.	A cm^2	b_{fw} mm	b_f mm	D mm	t = t_n mm	I_x cm^4	r_x cm	x_0 cm	I_y cm^4	r_y cm	J cm^4	C_w cm^6	r_0 cm	σl=	σd=
28	13,7	200	75	20	3,75	825	7,76	5,21	95,03	2,63	0,64	7817,8	9,71	367,65	425,64
29	5,31	200	100	25	1,2	354	8,17	8,06	76	3,79	0,025	6431,1	12,09	37,58	111,74
30	8,74	200	100	25	2	576,6	8,12	7,96	122,3	3,741	0,117	10213	11,974	104,02	195,35
31	11,46	200	100	25	2,65	750,68	8,09	7,89	157,2	3,7	0,27	13447,29	11,89	181,87	268,25
32	15,95	200	100	25	3,75	1028,07	8,03	7,75	211,55	3,64	0,75	18049,4	11,74	360,52	405,2
33	5,54	250	85	25	1,2	533,51	9,81	6,18	55,58	3,17	0,027	7052,5	12,02	23,62	86,77
34	9,14	250	85	25	2	871,52	9,77	6,09	88,98	3,12	0,12	11477,06	11,93	65,42	153,36
35	11,99	250	85	25	2,65	1133,79	9,72	6,02	114,13	3,08	0,28	14733,46	11,84	114,48	213,14
36	16,7	250	85	25	3,75	1554,63	9,65	5,89	152,64	3,02	0,788	19752,09	11,7	230,83	331,22
37	5,91	250	100	25	1,2	589,22	9,99	7,46	81,73	3,72	0,028	10268	13,01	23,22	84,82
38	9,737	250	100	25	2	961,9533	9,94	7,359	131,5811	3,676	0,12983	16350	12,902	64,37	149,47
39	12,79	250	100	25	2,65	1255,39	9,91	7,29	169,21	3,64	0,299	21574,59	12,83	112,74	206,51
40	17,83	250	100	25	3,75	1725,17	9,84	7,16	227,83	3,58	0,84	29072,02	12,68	224,52	314,45
41	6,14	300	85	25	1,2	817,9	11,54	5,73	58,6	3,09	0,029	10463	13,25	16,94	x
42	10,17	300	85	25	2	94,7	11,49	5,69	94,7	3,05	0,136	16972,4	13,17948	46,96	x
43	13,38	300	85	25	2,65	121,8	11,45	5,63	121,8	3,02	0,313	21785,1	13,11182	82,27	x
44	18,7	300	85	25	3,75	163,8	11,38	5,54	163,8	2,96	0,876	29196,7	12,99837	169,93	x
45	6,51	300	100	25	1,2	898,3	11,75	6,95	86,4	3,64	0,0312	15236	14,13	16,75	x
46	10,74	300	100	25	2	1469,1	11,68	6,85	139,1	3,6	0,1432	24322	14,03	46,46	x
47	14,11	300	100	25	2,65	1920,58	11,67	6,79	178,97	3,56	0,33	32115,67	13,96	81,44	x

No.	A cm^2	b_{fw} mm	b_f mm	D mm	t = t_n mm	I_x cm^4	r_x cm	x_0 cm	I_y cm^4	r_y cm	J cm^4	C_w cm^6	r_0 cm	σl=	σd=
48	19,7	300	100	25	3,75	2645,98	11,59	6,66	241,02	3,5	0,923	43389,66	13,82	162,53	x
49	6,84	200	180	10	1,2	517,2	8,69	14,11	264	6,2	0,03286	19002	17,7	29,2	20,24
50	11,33	200	180	10	2	848,8	8,65	14,014	431	6,167	0,1511	30675	17,58	x	38,24
51	14,91	200	180	10	2,65	1108,2	8,622	13,922	559,5	6,126	0,349	39413	17,48	x	55,81
52	20,82	200	180	10	3,75	1527,9	8,565	13,762	762,8	6,052	0,9762	52783	17,303	x	92,03
53	5,67	150	150	15	1,2	244,2	6,57	12,65	161,5	5,34	0,02719	7122,2	15,22	26,55	25,65
54	9,34	150	150	15	2	397,8	6,53	12,54	261,4	5,29	0,12449	11325	15,101	72,42	46,04
55	12,26	150	150	15	2,65	517,2	6,49	12,45	337,9	5,25	0,28695	14434	14,997	123,73	67,71
56	17,07	150	150	15	3,75	708,6	6,44	12,3	458,5	5,18	0,8	19103	14,82	x	101,02
57	7,82	200	200	30	1,2	597,4	8,73	17,83	423,3	7,35	0,037	37724	21,18	27,13	52,62
58	12,94	200	200	30	2	979,1	8,7	17,73	691	7,31	0,1725	60823	21,062	75,16	90,53
59	17,03	200	200	30	2,65	1279,6	8,67	17,649	900,3	7,27	0,3986	78424	20,96	131,51	122,9
60	23,86	200	200	30	3,75	1769	8,616	17,5	1238	7,207	1,1168	105906	20,795	261,22	181,59