



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica
Mestrado Profissional em Construção Metálica - MECOM

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA EM
PERFIS U ENRIJECIDOS FORMADOS A FRIO COM PERFURAÇÕES**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica
Mestrado Profissional em Construção Metálica - MECOM

Fausto Jardim Júnior

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA EM
PERFIS U ENRIJECIDOS FORMADOS A FRIO COM PERFURAÇÕES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Construção Metálica.

Orientador: Prof. Flávio Teixeira de Souza
Coorientadora: Prof.^a Arlene Maria Cunha Sarmanho

Ouro Preto
2018

J372e

Jardim Júnior, Fausto .

Estudo da viabilidade do Método da Resistência Direta em perfis U enrijecidos formados a frio com perfurações [manuscrito] / Fausto Jardim Júnior. - 2018.

76f.: il.: color; graf; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Teixeira Souza.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Arlene Maria Cunha Sarmanho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Mestrado Profissional em Construção Metálica.

Área de Concentração: Construção Metálica.

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

CDU: 624.014

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA
DIRETA EM PERFIS U ENRIJECIDOS FORMADOS A FRIO
COM PERFURAÇÕES**

AUTOR: FAUSTO JARDIM JÚNIOR

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em vinte e seis de julho de 2018, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:


Prof. Flávio Teixeira de Souza, D.Sc. – IFMG (Presidente)


Prof. Arlene Maria Cunha Sarmanho, D.Sc. – UFOP


Eng. Vinícius Nicchio Alves, D.Sc. – UFOP


Prof. Mário Luís Cabello Russo, D.Sc. – IFMG

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem o qual não estaria aqui.

Agradeço em especial o Professor Flávio, que não mediu esforços para transmitir o seu conhecimento, dedicação e comprometimento pela pesquisa. Agradeço pelo profissionalismo singular e sensibilidade em problemas técnicos e pessoais, que por vezes, apareceram durante toda a caminhada deste trabalho.

Agradeço as pessoas que me ajudaram a superar os obstáculos para estar aqui. Minha vó Irany, exemplo de luta e serenidade. Meus pais Heloisa e Fausto, meus irmãos Caio, Fabrine e Ana, minha companheira Thayná.

Agradeço a todos os professores do MECOM, pelos ensinamentos e contribuição profissional. Agradeço todos os colegas do MECOM, em especial, Guido, Emerson, Adilson e Heriston, por compartilharem boas lembranças.

A Universidade Federal de Ouro Preto pela grande oportunidade concedida.

E finalmente a todas pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste curso.

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

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Os perfis formados a frio são largamente utilizados na construção civil devido sua versatilidade, leveza e resistência. Muitas vezes, para atender a passagem de dutos e soluções estruturais como as ligações dos sistemas de armazenagem industrial, os perfis formados a frio são perfurados. As literaturas normativas atuais não consideram a influência das perfurações na capacidade resistente e no comportamento de perfis formados a frio com perfurações, e a pesquisa sobre o tema ainda é inicial. Em vista disso, é de suma importância estudos e pesquisas que visam consolidar uma base para o dimensionamento de perfis formados a frio com perfurações. O objetivo deste trabalho é a avaliação de extensões de procedimentos normativos para a determinação da força axial resistente de perfis formados a frio de seção U enrijecido, com furos, sob compressão centrada, no âmbito da flambagem distorcional. Foram avaliadas propostas de adaptação do Método da Resistência Direta, previsto em anexo na NBR 14762:2010. Tais avaliações foram feitas realizando estudos numéricos por meio do Método dos Elementos Finitos, com a utilização do programa ANSYS. Inicialmente foi criado um modelo numérico para obter a resistência do perfil U enrijecido, sobre compressão, sem perfurações. Os resultados foram comparados com às prescrições normativas segundo o Método da Resistência Direta para garantir a validade do modelo numérico. Posteriormente, foram introduzidas perfurações no modelo numérico e avaliados os procedimentos de adaptações do Método de Resistência Direta para perfis com furos. Foram avaliados procedimentos propostos por outros pesquisadores, e um procedimento proposto neste trabalho. Os resultados indicaram a viabilidade da adaptação do Método de Resistência Direta para considerar a presença de furos no dimensionamento de perfis formados a frio.

Palavras chave: Estruturas metálicas, Perfil formado a frio, Flambagem distorcional, Método da Resistência Direta.

ABSTRACT

The cold-formed steel profiles are widely used in the civil construction due to its versatility, lightness and strength. Often, to accommodate the passage of ducts and structural solutions such as the connections of Industrial Storage Systems, the cold-formed steel profiles are perforated. The current literature normative does not consider the influence of perforations on the strength capacity and behavior of cold-formed steel profiles with perforations, and research about the subject is still initial. In view of this, studies and research are extremely important to consolidate a technological base for design procedure of cold-formed steel profiles with perforations. The objective of this research work is the avaluation of adaptations of normative procedures for the determination of the strong axial force of cold-formed profiles C-section, with holes, under centered compression, in the scope of distorcional buckling. Proposals for adaptation of the Direct Strength Method, predicted in the annex in NBR 14762:2010, were evaluated. The numerical studies were performed using the Finite Element Method by means of the software ANSYS. Initially, a numerical model was created to obtain the strength of the profiles C-section, on compression, without perforation. The results were compared with the normative prescriptions according to the Direct Strength Method to guarantee the validity of the numerical model. Subsequently, were introduced holes in the numerical model and were evaluated the proposals for adaptation of the predicted of the Direct Strength Method. Procedures proposed by previous researchers were evaluated, and a proposed procedure was performed. The results indicated the feasibility of the adaptation of the Direct Strength Method to consider the presence of holes in the design procedure of cold-formed steel profiles.

Keywords: Steel structures, Cold-formed steel profiles, Distorcional buckling, Direct Strength Method

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Modos de flambagem global: (a) flexão, (b) torção e (c) flexo-torção.....	15
Figura 1.2 - Modos de flambagem local para os perfis: (a) U simples e (b) U enrijecido.	16
Figura 1.3 - Representação do modo de flambagem distorcional para o perfil U enrijecido...	17
Figura 1.4 - Perfurações em colunas de armazenamento em sistemas estrutural porta-pallets.	18
Figura 2.1 - Curva da flambagem distorcional.	25
Figura 2.2 – Método aproximado para cálculo do P_{crd} de colunas com furos. Análise de autovalor via GBTul.	27
Figura 2.3 - Disposição dos furos na alma dos modelos estudados.	30
Figura 2.4 – Espessuras fictícias propostas.	30
Figura 3.1 - Dimensões e disposições dos furos dos perfis com perfurações estudados.	32
Figura 3.2 – Elemento de casca SHELL181.....	34
Figura 3.3 – Distribuição da malha de elementos finitos.	35
Figura 3.4 – Restrições e carregamentos para o modelo numérico.	36
Figura 3.5 – Diagrama tensão x deformação do aço $f_y = 400\text{MPa}$	37
Figura 3.6 - Modelo criado através do programa GBTul: (a) seção transversal; (b) isometria demonstrando as vinculações a condição de carregamento.	40
Figura 3.7 - Comparação entre os resultados do ANSYS e GBTUL da carga crítica da seção UE50x45x10x1,6.....	40
Figura 3.8 - Modo de flambagem e carga crítica para as simulações: (a) ANSYS sem furos, (b) GBTul.	41
Figura 4.1 - Comparação entre curva teórica do MRD e resultados numéricos via MEF, para resistência de colunas sem perfurações. Resultados para aço com 400 MPa (a) e 200 MPa (b) de tensão de escoamento.	43
Figura 4. 2 - Comparação entre resistência entre MOEN 2 e análises numéricas. Resultados para aço com 400 MPa (a) e 200 MPa (b) de tensão de escoamento.	44
Figura 4. 3 - Comparação entre resistência entre MOEN 4 e análises numéricas. Resultados para aço com 400 MPa (a) e 200 MPa (b) de tensão de escoamento.	45
Figura 4. 4 - Comparação entre resistência entre método SALES e análises numéricas. Resultados para aço com 400 MPa (a) e 200 MPa (b) de tensão de escoamento.....	46

Figura 4. 5 - Comparação entre resistência entre método ALTERNATIVO e análises numéricas. Resultados para aço com 400 MPa (a) e 200 MPa (b) de tensão de escoamento.....	47
Figura 4. 6 - Comparação da dispersão entre os resultados da resistência a compressão propostas pelos métodos teórico e numéricos.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Nomenclatura para métodos estudados.	24
Tabela 3.1 - Nomenclatura adotada para os modelos estudados.	31
Tabela 3.2 - Dimensões das 20 seções transversais estudadas.	33
Tabela 4.1 - Análise estatística da dispersão percentual entre os resultados dos métodos estudados.	48
Tabela C.1 - Resultado Carga Resistentes pela análise numérica de perfis sem furos, $f_y = 400$ Mpa.	68
Tabela C.2 - Resultado Carga Resistentes pela análise numérica de perfis sem furos, $f_y = 220$ Mpa.	69
Tabela D.1 - Resultados numéricos para método MOEN 2, $f_y = 400$ MPa.	70
Tabela D. 2 - Resultados numéricos para método MOEN 2, $f_y = 220$ MPa.	71
Tabela E. 1 - – Resultados numéricos para método MOEN 4, $f_y = 400$ MPa.	72
Tabela E. 2 - Resultados numéricos para método MOEN 4, $f_y = 220$ MPa.	73
Tabela F. 1 - Resultados numéricos para método SALES, $f_y = 400$ MPa.	74
Tabela F. 2 - Resultados numéricos para método SALES, $f_y = 220$ MPa.	75
Tabela G. 1 - Resultados numéricos para método ALTERNATIVO, $f_y = 400$ MPa.	76
Tabela G. 2 - Resultados numéricos para método ALTERNATIVO, $f_y = 220$ MPa.	77

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 PERFIS FORMADOS A FRIO	14
1.2 MODOS DE INSTABILIDADE DOS PERFIS FORMADOS A FRIO.....	14
1.2.1 Flambagem Global	14
1.2.2 Flambagem Local	15
1.2.3 Flambagem Distorcional	16
1.3 PERFIS FORMADOS A FRIO COM PERFURAÇÕES	17
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.4.1 Métodos de dimensionamento	18
1.4.2 Perfis formados a frio com perfurações	19
1.5 OBJETIVOS	21
1.6 JUSTIFICATIVA	22
1.7 METODOLOGIA	22
1.8 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
2 PRESCRIÇÃO NORMATIVA E PROPOSTAS PARA MODIFICAÇÃO DO MRD .	24
2.1 MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA	24
2.2 PROPOSTAS PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA AXIAL RESISTENTE DE PERFIS FORMADOS A FRIO COM FUROS	26
2.2.1 MOEN 2	27
2.2.2 MOEN4	28
2.2.3 SALES	29
3. ESTUDOS NUMÉRICOS	31
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	31
3.2 GEOMETRIA DOS MODELOS.....	31

3.3 MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS.....	33
3.3.1 Tipo de elemento	33
3.3.2 Refinamento da malha	34
3.3.3 Condições de contorno e carregamento	35
3.3.4 Propriedades mecânica dos materiais	36
3.3.5 Rotina de programação para análise numérica linear via Ansys	37
3.3.6 Rotina de programação para análise numérica não linear via Ansys	38
3.3.7 Análise linear via Teoria Generalizada de Vigas através do software GBTul .	39
4. RESULTADOS	42
4.1 COMPARAÇÃO DAS CARGAS RESISTÊNTES DAS COLUNAS SEM FURO	42
4.2 COMPARAÇÃO DAS CARGAS RESISTENTES DAS COLUNAS COM FUROS ..	43
4.2.1 MOEN 2 (MOEN E SCHAFER, 2009)	44
4.2.2 MOEN 4 (MOEN E SCHAFER, 2009)	44
4.2.3 SALES (SALES, 2017)	45
4.2.4 ALTERNATIVO	46
4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS	53
APÊNDICE A - APDL SEM FUROS	55
APÊNDICE B - APDL COM FUROS	61
APÊNDICE C - RESULTADOS PARA SEÇÕES SEM FUROS	68
APÊNDICE D - RESULTADOS PARA SEÇÕES COM FUROS – MOEN 2	70
APÊNDICE E - RESULTADOS PARA SEÇÕES COM FUROS – MOEN 4	72
APÊNDICE F - RESULTADOS PARA SEÇÕES COM FUROS – SALES	74
APÊNDICE G - RESULTADOS PARA SEÇÕES COM FUROS – ALTERNATIVO	76

1. INTRODUÇÃO

1.1 PERFIS FORMADOS A FRIO

Os perfis formados a frio são elementos estruturais formados por dobramento em dobradeira ou por conformação em perfiladeira de chapas de aço à temperatura ambiente. Tais processos de fabricação permitem grande variabilidade de seções transversais, que somada à economia desses perfis devido ao seu baixo peso próprio e à sua boa resistência, confere a estes competitividade no mercado, substituindo, em muitos casos com excelência, os perfis laminados e soldados tradicionais. O dimensionamento dos perfis formados a frio segue as prescrições da norma NBR 14762 (ABNT,2010).

A facilidade no processo produtivo dos perfis formados a frio, está relacionada às pequenas espessuras utilizadas nas chapas que compõem a suas seções. Esse fato também confere aos perfis formados a frio algumas particularidades em relação aos perfis soldados e laminados de aço.

Devido à grande relação largura/espessura das chapas que constituem sua seção transversal, os perfis formados a frio apresentam problemas de instabilidade característicos. Além da flambagem global do elemento estrutural, pode ocorrer instabilidade por flambagem local de placa, e flambagem por distorção (ou distorcional).

1.2 MODOS DE INSTABILIDADE DOS PERFIS FORMADOS A FRIO

1.2.1 Flambagem Global

A flambagem global é um fenômeno que acomete a barra com elevado índice de esbeltez global, que reduz sua capacidade em resistir a esforços solicitantes, o que significa, que a carga resistente de um elemento será inferior à carga de escoamento do aço. Conforme esquematizado por Almeida (2007) na Figura 1.1, a perda de estabilidade global pode-se apresentar de três formas:

- Flambagem por Flexão: encurvamento do eixo da barra, caracterizando-se pelo movimento de corpo rígido da seção transversal em reposta ao deslocamento do eixo da barra, que assume a forma curva.
- Flambagem por Torção: refere-se à rotação da seção transversal em torno do seu centro de torção, sem que haja deformações no plano da mesma.
- Flambagem por Flexo-torção: corresponde ao encurvamento do eixo da barra e a rotação da seção transversal, simultaneamente.

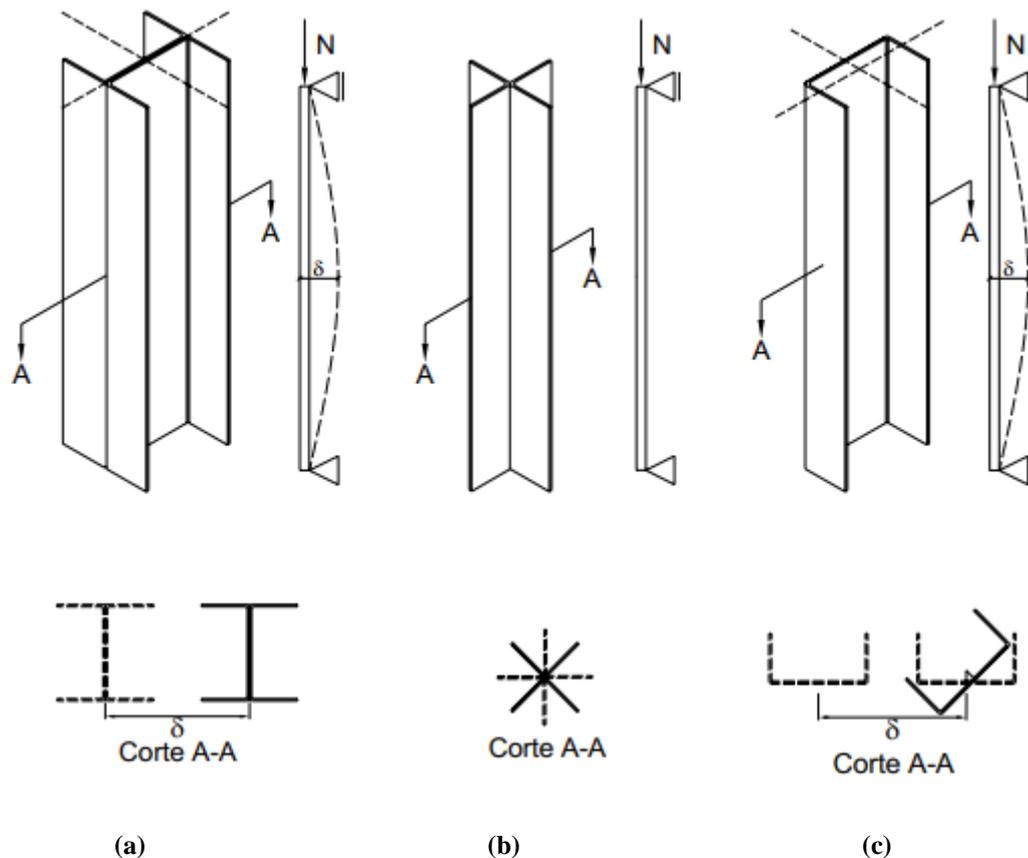


Figura 1.1 - Modos de flambagem global: (a) flexão, (b) torção e (c) flexo-torção. Fonte: ALMEIDA, 2007

1.2.2 Flambagem Local

Em perfis curtos formados por chapas excessivamente finas, a capacidade de resistir a esforços é determinada pela flambagem local. A flambagem local é um fenômeno típico de placa, definindo-se pela flexão dos elementos que constituem a seção transversal (alma, flange, enrijecedor de borda), sem que haja deslocamento ou variação nos ângulos formados pelas arestas comuns destes elementos. A Figura 1.2 ilustra o modo de falha local para perfis U

simples e U enrijecido, onde pode-se observar a característica formação de meia onda, cujo comprimento é menor que os demais modos.

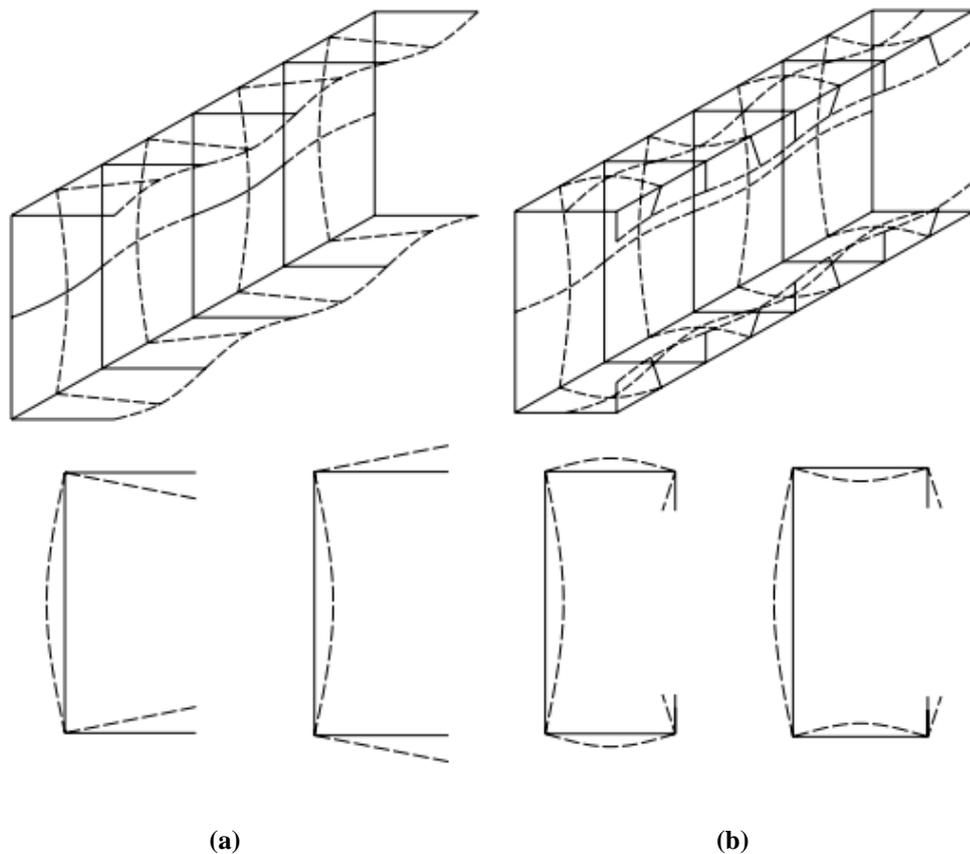


Figura 0.1 - Modos de flambagem local para os perfis: (a) U simples e (b) U enrijecido. Fonte: ALMEIDA, 2007

1.2.3 Flambagem Distorcional

Em perfis não excessivamente curtos ou esbeltos a capacidade resistente pode estar relacionada à flambagem por distorção da seção transversal, ou flambagem distorcional. Hancock (1985), demonstrou que esse tipo de instabilidade pode ser governante em determinadas seções transversais, podendo-se destacar perfis com enrijecedores de borda e enrijecedores adicionais como perfis U enrijecido, “rack”, Z enrijecido e perfis cartola. Mais tarde, Galambos (1998), destacou que esse modo de instabilidade é mais evidente em elementos constituídos por aço de elevada resistência mecânica, e o fato da carga crítica estar relacionada ao comprimento de meia onda intermediários, entre os comprimentos de onda correspondentes aos modos local e global.

A flambagem distorcional caracteriza-se pela rotação entre o conjunto formado pelos elementos comprimidos (mesa e enrijecedor, por exemplo), alterando a formação inicial do perfil, pela variação angular inicial dos elementos comuns a uma aresta, ou translação desta. A Figura 1.3 a apresenta o modo distorcional para o perfil U enrijecido, onde observa-se a configuração da meia onda ao longo do comprimento do perfil.

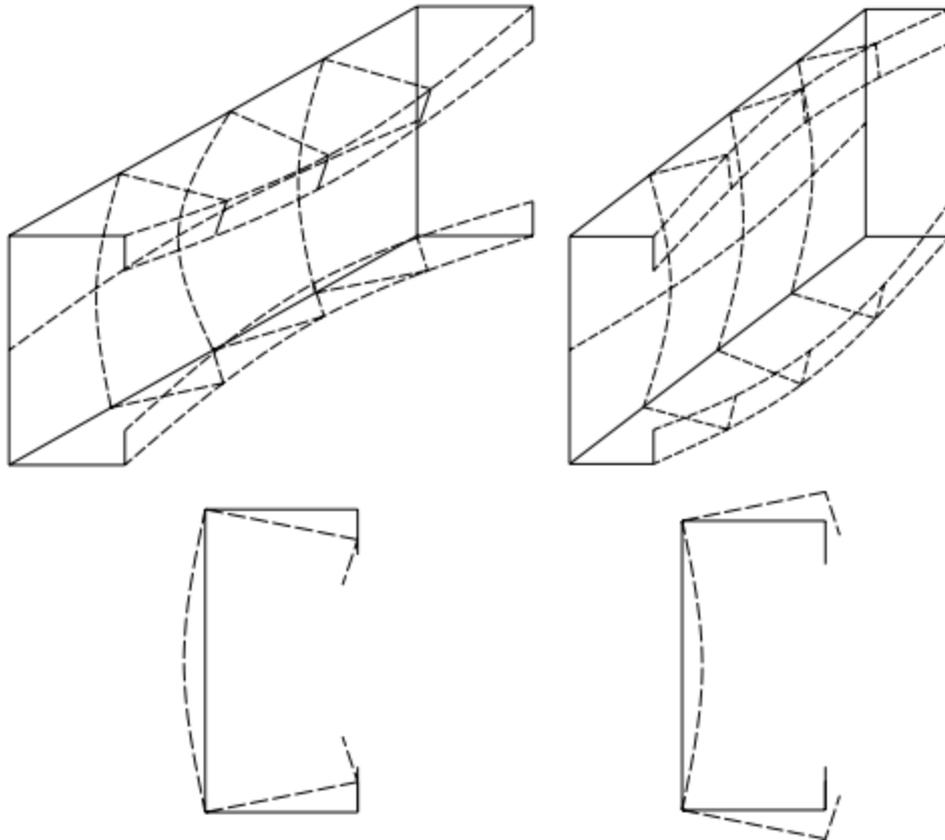


Figura 0.2 - Representação do modo de flambagem distorcional para o perfil U enrijecido. Fonte: ALMEIDA, 2007

1.3 PERFIS FORMADOS A FRIO COM PERFURAÇÕES

Alguns sistemas estruturais, como vigas e colunas de aço formado a frio, são fabricados com perfurações. As perfurações são adotadas, por exemplo, para atender à passagem de dutos de instalações prediais. Outra finalidade das perfurações é atender a soluções estruturais como o encaixe das ligações dos sistemas de armazenamento industrial (OLIVEIRA, 2000; SOUZA, 2013), conforme mostrado na Figura 1.4.

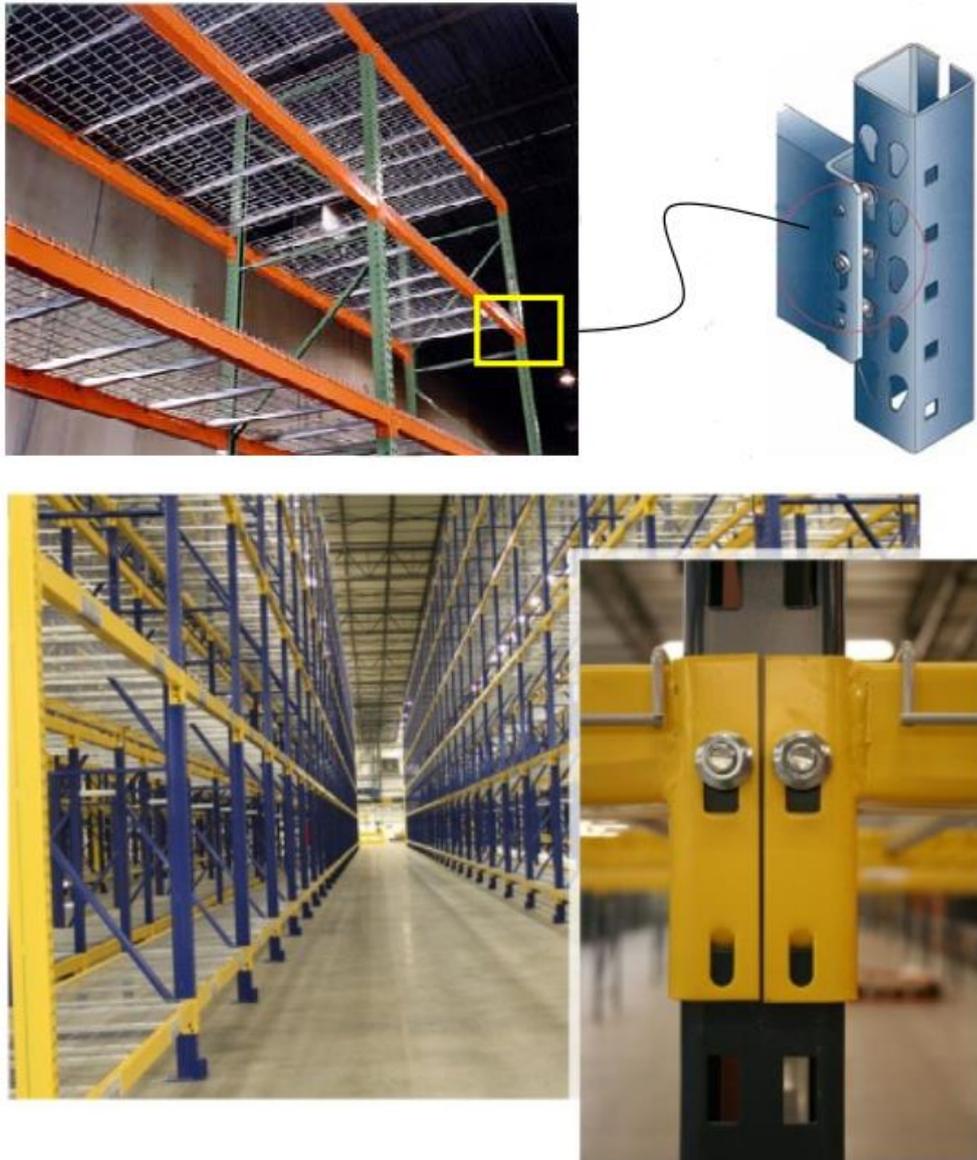


Figura 0.3 - Perfurações em colunas de armazenamento em sistemas estrutural porta-pallets. Fonte: MOEN E SCHAFFER, 2009 e CAI E MOEN, 2016

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.4.1 Métodos de dimensionamento

Devido à complexidade da solução de equações de equilíbrio para determinação do comportamento relacionado aos fenômenos de placas esbeltas que compõem os perfis formados a frio, tornou-se necessário o desenvolvimento de métodos de dimensionamento simplificados.

O Método da Largura Efetiva, MLE, foi proposto por von Karman (1932), com modificações realizadas por George Winter (1947). Esse método analisa individualmente cada elemento de chapa que compõem a seção transversal, porém leva em conta as condições de vinculação impostas pelos elementos de chapas vizinhos. Apesar de mais difundido e presente em literaturas normativas, este método apresenta algumas limitações, tais como a não consideração da continuidade física e interação dos elementos, bem como a inviabilidade de cálculo para seções não convencionais.

O Método da Resistência Direta, MRD, presente na norma NBR 14762 (ABNT, 2010) como procedimento alternativo para determinação da carga resistente de perfis formados a frio. O Método da Resistência Direta foi utilizado pela primeira vez por Hancock, Kwon e Bernard (1994), propondo resolver problemas de flambagem distorcional de perfis de parede fina submetidos à compressão centrada ou flexão simples. Posteriormente Schafer e Peköz (1998) ampliaram a utilização deste método para barras fletidas ou comprimidas considerando todos os modos possíveis de colapso, flambagem local, distorcional e global.

O Método da Seção Efetiva, MSE, proposto por Batista (2009), é exclusivo da literatura normativa brasileira e foi criado como alternativa à análise de estabilidade da seção necessária para o Método da Resistência Direta. Para isto é utilizado um conjunto de expressões baseadas na parametrização do MRD para perfis mais usuais.

1.4.2 Perfis formados a frio com perfurações

Os métodos de dimensionamento existentes nas prescrições geralmente não contemplam perfis com perfurações, por isto diversos estudos têm avaliado estas estruturas.

Yao e Rasmussen (2010) realizaram desenvolvimentos analíticos para aplicação do Método Isoparamétrico de Faixas Finitas (ISFSM – Isoparametric Spline Finite Strip Method) na análise de perfis formados a frio com perfurações, considerando material inelástico e geometrias com não-linearidades. Foram realizadas várias análises com placas perfuradas e não perfuradas considerando tiras finitas isoparamétricas, demonstrando a precisão do método para a previsão do comportamento inelástico pós-flambagem de perfis formados a frio com perfurações.

Moen e Schaffer (2009) desenvolveram um estudo visando a ampliação do Método da Resistência Direta para o dimensionamento de perfis formados a frio com perfurações. O estudo empregou a análise numérica conjunta do Método dos Elementos Finitos através do programa ABAQUS e do Método das Faixas Finitas através do software CUFSM. Os resultados das simulações e experimentos orientaram o desenvolvimento de equações de projeto relacionando a flambagem elástica e a resistência final dos elementos formados a frio com perfurações.

Silva (2011) realizou um estudo teórico-experimental de colunas curta perfuradas com carregamento centrado, com a análise da influência dos furos no seu comportamento local. Os resultados experimentais foram comparados com resultados numéricos obtidos pela análise via Método dos Elementos Finitos, através do software ANSYS. Os resultados obtidos apresentaram boa correlação em termos de carga de flambagem e comportamento das colunas.

Souza (2013) realizou um estudo teórico-experimental de perfis formados a frio do tipo rack, utilizados na construção de sistemas de armazenagem, e que apresentam perfurações ao longo de seu comprimento visando facilitar a sistema de montagem. O objetivo desse trabalho foi contribuir com o entendimento da influência das perfurações na ocorrência dos modos de flambagem em perfis perfurados e a possível interação entre eles. O estudo empregou a análise numérica conjunta do Método dos Elementos Finitos através do software ANSYS e do Método das Faixas Finitas através do software CUFSM. Neste estudo os resultados numéricos e experimentais foram comparados a resultados teóricos, obtidos a partir do Método de Resistência Direta, com adaptações para a seção perfurada.

Faria (2016), segue a mesma linha de Souza (2013) no trabalho de análise de perfis formados a frio tipo rack, utilizado para sistemas de armazenamento. Contudo, neste trabalho preocupou-se com a magnitude do furo, disposição e forma dos mesmos, bem como a influência destes na capacidade resistente dos elementos. De maneira geral, este trabalho teve como objetivo avaliar os modos de instabilidade local e distorcional, considerando a influência dos furos no comportamento estrutural do perfil mediante análises numéricas e experimentais. O estudo empregou a análise numérica conjunta do Método dos Elementos Finitos através do software ANSYS e da Teoria Generalizada da Vigas através do software GBTul. Entre os resultados observou-se que a existência dos furos acarreta em redução da força axial de compressão resistente das colunas com a identificação do modo local somente entre as perfurações. Contudo, esse último não influenciou na capacidade resistente das mesmas, predominando em todos os casos o modo distorcional.

Neiva (2017) realizou estudo teórico por meio do Método dos Elementos Finitos, com a utilização do software ANSYS, de colunas de seção rack com perfurações ao longo de seu comprimento. Foi analisado a influência das perfurações e da excentricidade nas colunas, bem como a ocorrência dos modos de flambagem local e distorcional, considerando o carregamento centrado e excêntrico. Foi avaliada ainda a influência do tamanho e da inclinação dos furos, assim como a variação da largura da alma, na carga crítica de flambagem e na carga últimas das colunas.

Sales (2017) realizou um estudo numérico utilizando o Método dos Elementos Finitos via software ANSYS, de colunas com seção tipo rack com perfurações. O trabalho visou contribuir para a adaptação do Método da Resistência Direta para ao cálculo da resistência de perfis com perfurações no âmbito da flambagem distorcional. Para isso, os resultados numéricos foram comparados para três opções de adaptação do Método da Resistência Direta para colunas com perfurações. A análise das três situações indicou a viabilidade da adaptação do Método da Resistência Direta para o dimensionamento de perfis com perfurações.

Neiva et al. (2018) realizaram estudo teórico e numérico da influência de perfurações no comportamento e capacidade resistente de pilares em perfis formados a frio submetidos a compressão. Foram avaliados numericamente via ANSYS e GBTul, pilares com diferentes seções transversais e perfurações, enfatizando o modo de instabilidade distorcional. As forças de compressão resistentes da análise numérica foram comparadas às equações do Método da Resistência Direta. Com os resultados, foram propostas adequações das equações do Método da Resistência Direta para possibilitar o dimensionamento dos pilares comprimidos com as tipologias de perfurações estudadas.

1.5 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral a avaliação da adaptação do Método de Resistência Direta para a determinação da força axial resistente de perfis formados a frio de seção U enrijecido, com furos, sob compressão centrada.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- I. Avaliação da influência das perfurações na carga última de colunas no âmbito da flambagem distorcional considerando aços com diferentes resistências;

- II. Avaliação das opções de extensão do Método da Resistência Direta propostas por Moen e Schaffer (2009), e Sales (2017) para previsão de cargas últimas;
- III. Proposição de extensão do Método da Resistência Direta com melhor correlação entre resultados teóricos e numéricos.

1.6 JUSTIFICATIVA

Diante do aumento da utilização dos perfis formados a frio, tornam-se necessário estudos e pesquisas na área, de forma a consolidar uma base para dimensionamento de elementos formados a frio, contribuindo para estabelecer soluções técnicas e econômicas.

As literaturas normativas atuais não consideram a influência das perfurações na capacidade resistente de perfis formados a frio, e a pesquisa sobre o tema é ainda incipiente. Ao consideramos que os furos podem influenciar a capacidade resistente dos perfis, o dimensionamento seguindo premissas normativas existentes é inviável, demandando, muitas vezes, testes experimentais que oneram o projeto. Desta forma, uma solução de dimensionamento prático e econômico pode ser de grande relevância, principalmente em situações em que o uso de perfis formados a frio com perfurações é frequente, como em sistemas de armazenamento citados no item 1.3.

Neste contexto, este trabalho é uma extensão das pesquisas de Souza (2005, 2013), Faria (2016), Neiva (2017), Neiva et al. (2018) e Sales (2017), visando contribuir no tema.

1.7 METODOLOGIA

A primeira etapa do trabalho consistiu na análise linear de colunas sem perfurações via Teoria Generalizada de Vigas (GBT) através do programa GBTul (BEBIANO et al., 2008), a fim de obter as forças axiais de flambagem distorcional elástica (N_{dist}) de colunas sem furos. Posteriormente essas cargas foram utilizadas nas rotinas de cálculo do Método da Resistência Direta para obtenção das forças axiais de compressão resistentes ($N_{c,Rk}$) das colunas sem furos. No final desta etapa, os valores das forças axiais de compressão resistentes teóricas foram

comparados com os valores numéricos, obtidos pela análise não-linear de modelos numéricos desenvolvidos em elementos finitos, via software ANSYS (ANSYS, 2013).

Uma vez obtido um modelo numérico com boa correlação entre os resultados numéricos e teóricos, foram introduzidas as perfurações e realizadas novas análises não-lineares via elementos finitos para obter, desta vez, as forças axiais de compressão resistentes dos perfis com furos. Estes valores foram comparados com os obtidos pelas recomendações de extensão do Método da Resistência Direta apresentadas por Moen e Schaffer (2009), e Sales (2017).

Ainda é proposto no trabalho, um método alternativo para o cálculo das forças axiais de compressão resistentes, e finalmente analisa-se a viabilidade de todos os métodos para a determinação da resistência de colunas com furos.

1.8 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 2, são apresentadas as prescrições teóricas para cálculo da força axial de compressão resistente de colunas sem furos para o modo de flambagem distorcional, presentes na norma NBR 14762 (ABNT, 2010), pelo Método da Resistência Direta, e propostas por Moen e Schaffer (2009), e Sales (2017).

No capítulo 3, são apresentados os princípios adotados para a criação dos modelos numéricos, bem como os métodos numéricos empregados. Teoria Generalizada de Vigas (GBT), através do software GBTul, e Método dos Elementos Finitos (MEF), através do software ANSYS.

No capítulo 4, são apresentados os resultados das análises numéricas das colunas sem furos com as prescrições da NBR 14762 (ABNT, 2010) e das colunas com furos, segundo propostas de extensão do Método de Resistência Direta (MRD) de Moen e Schaffer (2009), e Sales (2017). Ainda nesse capítulo é apresentada uma nova proposta para extensão do MRD.

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as considerações finais da pesquisa, assim como propostas para trabalhos futuros.

2 PRESCRIÇÃO NORMATIVA E PROPOSTAS PARA MODIFICAÇÃO DO MRD

Esse capítulo é destinado à apresentação das prescrições normativas do método estudado nesse trabalho, o Método de Resistência Direta. São apresentados também, os métodos propostos por Moen e Schaffer (2009) e Sales (2017) de extensão do (MRD), que serão estudados para perfis U enrijecidos com perfurações submetidas à compressão centrada.

Os tópicos a seguir apresentam as prescrições de cálculo da resistência direta de perfis formados a frio considerando a flambagem distorcional como forma de colapso. A Tabela 2.1 apresenta as nomenclaturas adotadas para os métodos estudados.

Tabela 2. 1 - Nomenclatura para métodos estudados. Fonte: Autor

MRD	NBR 14762 (ABNT, 2010)
MOEN 2	Moen e Schaffer (2009)
MOEN 4	Moen e Schaffer (2009)
SALES	Sales (2017)

2.1 MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

O Método da Resistência Direta, apresentado em várias literaturas normativas, possibilita obtenção direta da resistência de barras submetidas à compressão centrada e à flexão simples. Contudo, o cálculo da capacidade resistente do perfil de aço formado a frio, demanda a análise elástica da seção, que é feita por meio de softwares específicos. Neste trabalho optou-se por utilizar o software livre GBTul (BEBIANO et al., 2008), fundamentado na Teoria Generalizada de Vigas (GBT).

O Método da Resistência Direta permite a análise dos modos de flambagem isolados e em interação, contudo nesse trabalho considera o modo distorcional isolado para avaliação da resistência de barras à compressão centrada sem perfurações.

A Figura 2.1 apresenta a curva de resistência associada ao modo distorcional. Em seguida são apresentadas as expressões para cálculo da força axial de compressão resistente associado à flambagem distorcional, $N_{c,Rdist}$, que está relacionada ao índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional, λ_{dist} .

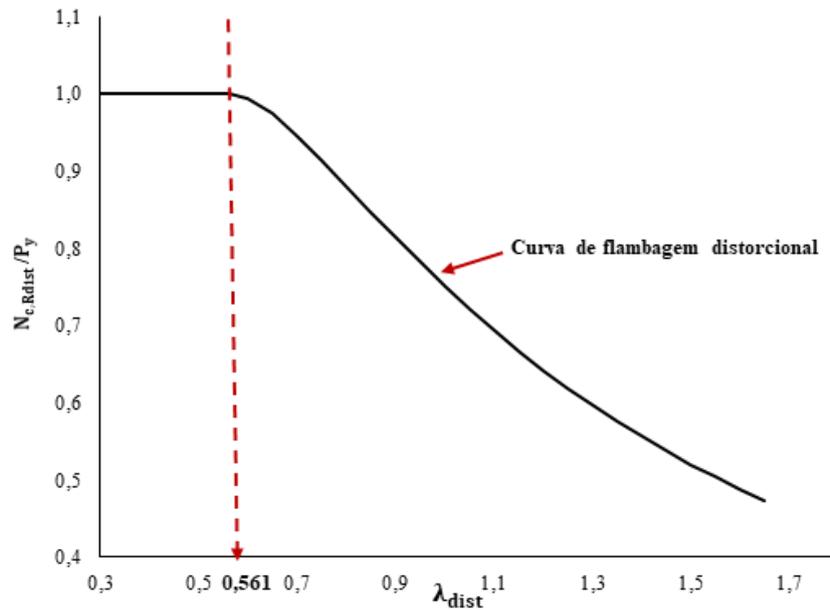


Figura 2.1 - Curva da flambagem distorcional. Fonte: Autor

$$N_{c,Rdist} = Af_y, \quad \text{para} \quad \lambda_{dist} \leq 0,561 \quad \text{Equação 2.1}$$

$$N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{Af_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}, \quad \text{para} \quad \lambda_{dist} > 0,561 \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde,

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{Af_y}{N_{dist}}\right)^{0,5} \quad \text{Equação 2.3}$$

A é a área bruta da seção transversal da barra;

f_y é a tensão de escoamento do aço;

N_{dist} é a força axial de flambagem distorcional elástica em que nesse trabalho será determinada pela análise de estabilidade elásticas pelo software GBTul (BEBIANO et al., 2008).

λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional.

2.2 PROPOSTAS PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA AXIAL RESISTENTE DE PERFIS FORMADOS A FRIO COM FUROS

Moen e Schaffer (2009) realizam um amplo estudo, patrocinado pelo American Iron and Steel Institute, para avaliar a influência de furos no dimensionamento de perfis formados a frio, submetidos à compressão e à flexão, no âmbito dos três modos de colapso, flambagem local, distorcional e global. Os autores fizeram a análise de estabilidade elástica pelo método das faixas finitas no software CUFSM (SCHAFER E ÁDÀNY, 2006) e as análises não lineares pelo software ABAQUS.

O método de previsão da carga crítica de flambagem distorcional P_{crd} (N_{dist} , pela NBR 14762) apresentado por Moen e Schaffer assume que a mudança da rigidez da seção transversal dentro do comprimento de meia onda do modo distorcional, L_{crd} , causada pela presença do furo (ou furos), pode ser simulada considerando uma espessura reduzida da seção transversal. A curva de flambagem distorcional é calculada usando a seção bruta da coluna, e L_{crd} é extraído da curva na localização do mínimo distorcional conforme Figura 2.2 (construída considerando uma seção estudada nesse trabalho e obtida pelo GBTul). O método assume que o comprimento de meia onda do modo distorcional, L_{crd} não muda com a presença de furos. A seção transversal é então modificada para aproximar a presença de furos, para isso modifica-se a espessura da seção para a sua utilização no programa de análise elástica (CUFSM ou GBTul), com a seguinte equação:

$$t_{web,hole} = \left(1 - \frac{L_h}{L_{crd}}\right)^{1/3} t_w \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde,

$t_{web,hole}$ é a espessura reduzida da seção transversal;

t_w é a espessura da seção sem furos;

L_h é o comprimento do furo;

L_{crd} é o comprimento de meia onda associada ao modo distorcional.

Uma vez que a seção transversal é modificada para considerar a presença do furo, no CUFSM ou GBTul, outra curva de flambagem elástica é gerada e P_{crd} (N_{dist} , pela NBR 14762) é determinada como a força axial de flambagem elástica que ocorre no comprimento de meia

onda associado ao modo distorcional comum à seção bruta e a seção com furos, conforme Figura 2.2.

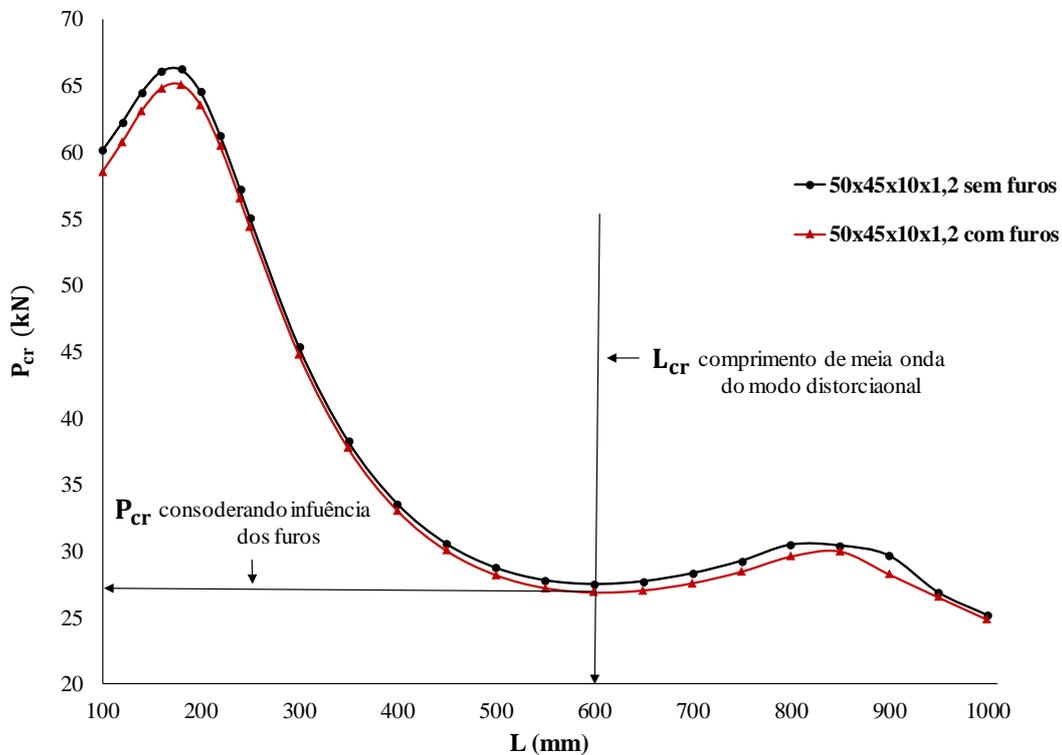


Figura 2.2 – Método aproximado para cálculo do P_{crd} de colunas com furos. Análise de autovvalor via GBTul. Fonte: Autor

Em posse da carga crítica de flambagem, P_{crd} , ocasionada pela presença dos furos, Moen e Scharffer propõem seis opções para extensão do MRD para cálculo da resistência de perfis formados a frio submetidos a compressão sobre os modos local, distorcional e global. As equações para os métodos estudados, associadas ao modo distorcional, estão apresentadas nas seções 2.2.1 e 2.2.2, aqui chamadas, de MOEN 2 e MOEN 4. Ressalta-se que o método simplificado para obtenção da P_{crd} (N_{dist} , pela NBR 14762) utilizado nesse trabalho foi através do software GBTul.

2.2.1 MOEN 2

Esse método inclui os furos na análise da carga crítica de flambagem, P_{crd} , e usa a tensão de escoamento da seção líquida, P_{ynet} . A única mudança com relação a equação do Método da Resistência Direta, é a substituição da carga de escoamento da seção bruta P_y , pela

P_{ynet} , que por sua vez é determinada pela multiplicação da área líquida, A_{net} , pela tensão de escoamento do aço, f_y . Com a essa alteração, tem-se as seguintes equações para força axial resistente associada ao modo distorcional:

$$P_{nd} = P_{ynet}, \text{ para } \lambda_{dnet} \leq 0,561 \quad \text{Equação 2.5}$$

$$P_{nd} = \left(1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_{ynet}} \right)^{0,6} \right) \left(\frac{P_{crd}}{P_{ynet}} \right)^{0,6} P_{ynet}, \text{ para } \lambda_{dnet} > 0,561 \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde,

$$\lambda_{dnet} = \sqrt{P_{ynet}/P_{crd}};$$

$$P_{ynet} = A_{net}f_y;$$

A_{net} é a área líquida da seção transversal da barra;

f_y é a tensão de escoamento do material;

P_{crd} é a força axial de flambagem elástica associada ao modo distorcional (N_{dist} , pela NBR 14762), determinada conforme a seção anterior, onde a espessura da alma da seção sem furos t_w é modificada por $t_{web,hole}$, podendo ser usada em análise numerica simplificada através software GBTul.

λ_{dnet} é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional;

P_{nd} é a força axial resistente a compressão da seção com furos associada ao modo distorcional ($N_{c,Rdist}$, pela NBR 14762).

2.2.2 MOEN4

Com a observação dos resultados obtidos, Moen e Schaffer propõe para esse método uma modificação para a curva do Método da Resistência Direta para colunas com furos, considerando um efeito transitório de falha da seção líquida precedente à distorção da seção. A força axial resistente, P_{nd} ($N_{c,Rdist}$, pela NBR 14762), associado ao modo distorcional é calculada pelas seguintes expressões:

$$P_{nd} = P_{ynet}, \quad \text{para } \lambda_d \leq \lambda_{d1} \quad \text{Equação 2.7}$$

$$P_{nd} = P_{ynet} - \left(\frac{P_{ynet} - P_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) \lambda_d, \quad \text{para } \lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2} \quad \text{Equação 2.8}$$

$$P_{nd} = \left(1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y}\right)^{0,6}\right) \left(\frac{P_{crd}}{P_y}\right)^{0,6} P_y, \quad \text{para } \lambda_d > \lambda_{d2} \quad \text{Equação 2.9}$$

Onde,

$$\lambda_d = \sqrt{P_y/P_{crd}};$$

$$\lambda_{d1} = 0,561(P_{ynet}/P_y);$$

$$\lambda_{d2} = 0,561 \left(14(P_{ynet}/P_y)^{-0,4} - 13\right);$$

$$P_{d2} = \left(1 - \left(1 - 0,5\lambda_{d2}^{-1,2}\right)^2\right) P_y;$$

$$P_{ynet} = A_{net}f_y \geq 0,6P_y;$$

A_{net} é a área líquida da seção transversal da barra;

f_y é a tensão de escoamento do material;

P_{crd} é a força axial de flambagem elástica associada ao modo distorcional (N_{dist} , pela NBR 14762), determinada conforme a seção 2.2, onde a espessura da alma da seção sem furos t_w é modificada por $t_{web,hole}$, podendo ser usada em análise numérica simplificada através do software GBTul.

2.2.3 SALES

Sales (2017) propôs um método alternativo para ao método MOEN 2 desenvolvido por Moen e Schaffer (2009). Foram obtidos bons resultados quando comparados os métodos de Moen com o método alternativo para colunas de seção do tipo Rack. Esse método consistiu na alteração na determinação da espessura fictícia da alma ($t_{web,hole}$), para obtenção da força axial de flambagem elástica, considerando que a redução da espessura da alma da seção transversal deve seguir a proporção entre sua área líquida ($A_{w,net}$) e sua área bruta ($A_{w,g}$), conforme mostra a equação 2.10. Nas análises de Sales (2017) esta relação foi igual a 0,8.

$$t_{fic} = \frac{A_{w,net}}{A_{w,g}} t_w. \quad \text{Equação 2.10}$$

A Figura 2.3 apresenta a disposição dos furos na alma dos modelos estudados e as espessuras fictícias propostas por Moen e Sales para a determinação da força de flambagem

elástica. Na Figura 2.4 é apresentada a tela do software GBTul que possibilita a criação de variadas seções transversais e aplicação de diferentes espessuras nas paredes da seção. Isso, viabilizou a análise da carga crítica de flambagem de seções com diferentes espessuras fictícias para a alma propostas por Sales e Moen.

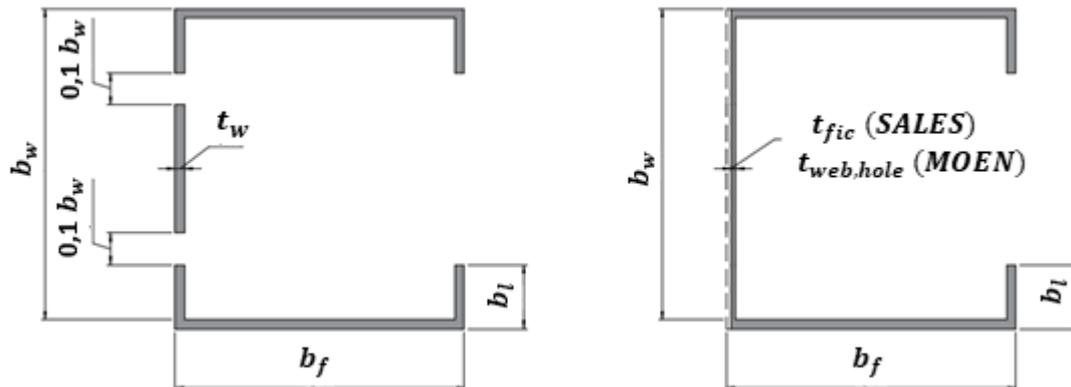


Figura 2.3 - Disposição dos furos na alma dos modelos estudados. Fonte: Autor

Cross-Section Analysis | Mode Selection | Member Analysis | Results

Material Properties

#Material	Eox	Ess	vxs	vxz	Gxs	ρ
1	200000	200000	0.3	0.3	76923	7.85E-12

Natural Nodes

#Node	Y	Z
1	45	40
2	45	50
3	0	50
4	0	40

Walls and Intermediate Nodes

#Wall	#Node1	#Node2	#Material	IntermediateNodes	Thickness
1	1	2	1	3	1.2
2	2	3	1	4	1.2
3	3	4	1	5	1.177

Length-Distributed Elastic Supports and Additional Masses

Distributed along longitudinal edges

#Node	Ky	Kz	Ko	M

Cross-Section Geometry

Plot Options

- Natural Nodes
- Walls
- Materials
- Intermediate Nodes
- Wall Segments
- Y-Z Coordinate System

Figura 2.4 – Espessuras fictícias propostas. Fonte: GBTul – BEBIANO et al., 2008

3. ESTUDOS NUMÉRICOS

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os métodos numéricos viabilizam a análise estrutural, em casos onde soluções analíticas são inviáveis. Nesse trabalho o estudo numérico foi realizado por meio da Teoria Generalizada de Vigas (GBT), através do software GBTul (BEBIANO et al., 2008) e o Método dos Elementos Finitos (MEF), através do software ANSYS (2013). O GBTul foi utilizado para a obtenção das cargas críticas de flambagem utilizadas no Método de Resistência Direta e suas adaptações, já o Método dos Elementos Finitos foi utilizado para as análises linear e não-linear dos modelos propostos.

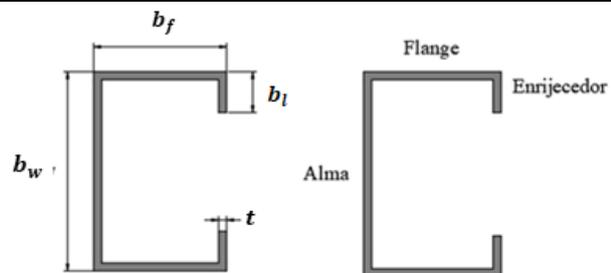
Este capítulo descreve o desenvolvimento de modelos numéricos para a avaliação do comportamento estrutural de perfis U enrijecidos com perfurações submetidos à compressão.

3.2 GEOMETRIA DOS MODELOS

Nesse estudo foram analisados modelos de 20 seções transversais consideradas do perfil U enrijecido sem furos e 20 com furos, além de serem considerados aços com propriedades mecânicas diferentes, totalizando 80 modelos. A Tabela 3.1 apresenta a nomenclatura adotada.

Tabela 3.1 - Nomenclatura adotada para os modelos estudados. Fonte: Autor

Nomenclatura dos modelos - $U_e b_w \times b_f \times b_l \times t$	
U_e	Perfil U enrijecido
b_w	Dimensão da alma
b_f	Dimensão do flange
b_l	Dimensão do enrijecedor
t	Espessura do perfil



As dimensões e disposições dos furos nos modelos com perfurações estão expostas na Figura 3.1. Foram adotados furos com larguras iguais a 10% de b_w , comprimentos iguais a 40%

de b_w , posicionados a uma distância da aresta alma/flange igual a 20% de b_w e espaçados entre eles a uma distância de 40% de b_w , seguindo estudos anteriores de Souza (2013) e Sales (2017).

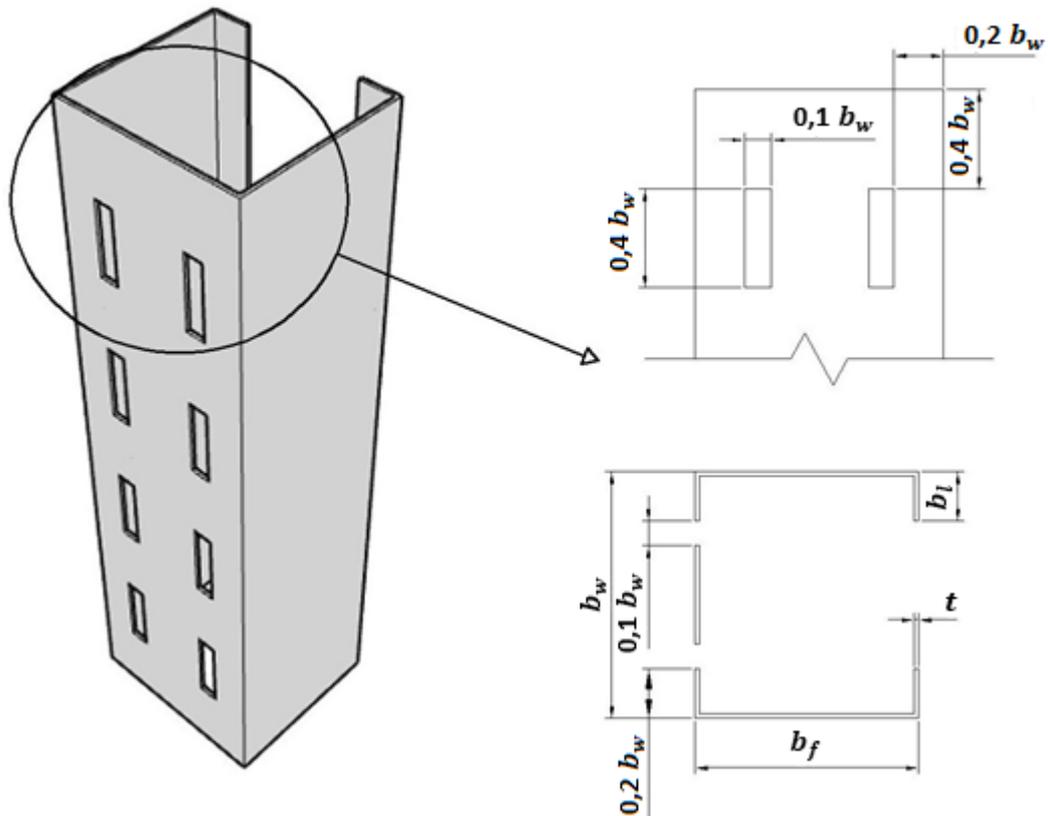


Figura 3.1 - Dimensões e disposições dos furos dos perfis com perfurações estudados. Fonte: Autor

As dimensões adotadas nas 20 seções transversais estão apresentadas na Tabela 3.2. Foram utilizados perfis com relação b_f/b_w iguais a 0,9 e 1, relação b_f/b_w igual a 20 e a relação b_w/t foi variada, adotando espessuras (t) que levassem a seções cuja carga crítica de flambagem local fosse menor que a distorcional. Os comprimentos críticos associados à flambagem distorcional foram obtidos pela análise de autovalor no software.

Tabela 3.2 - Dimensões das 20 seções transversais estudadas. Fonte: Autor

Seção Estudada	Dimensões da Seção Transversal					
	b_w	b_f	b_l	t	$L_{dist,SF}$	$L_{nl,adotado}$
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Ue 50x45x10x1,2	50	45	10	1,2	350	400
Ue 50x45x10x1,4	50	45	10	1,4	300	400
Ue 50x45x10x1,6	50	45	10	1,6	300	400
Ue 50x45x10x1,8	50	45	10	1,8	280	400
Ue 50x45x10x2,0	50	45	10	2	260	400
Ue 75x65x15x1,6	75	65	15	1,60	550	720
Ue 75x65x15x1,8	75	65	15	1,80	500	720
Ue 75x65x15x2,0	75	65	15	2,00	450	720
Ue 75x65x15x2,2	75	65	15	2,20	450	720
Ue 75x65x15x2,4	75	65	15	2,40	450	720
Ue 100x100x20x1,6	100	100	20	1,6	900	1200
Ue 100x100x20x1,8	100	100	20	1,8	840	1200
Ue 100x100x20x2,0	100	100	20	2	800	1200
Ue 100x100x20x2,2	100	100	20	2,2	750	1200
Ue 100x100x20x2,4	100	100	20	2,4	730	1200
Ue 125X125X25X2,0	125	125	25	2	1100	1500
Ue 125X125X25X2,2	125	125	25	2,2	1050	1500
Ue 125X125X25X2,4	125	125	25	2,4	1000	1500
Ue 125X125X25X2,6	125	125	25	2,6	1000	1500
Ue 125X125X25X2,8	125	125	25	2,8	950	1500

3.3 MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS

3.3.1 Tipo de elemento

Para a criação das paredes dos modelos do perfil U enrijecido, foi utilizado o elemento do ANSYS SHELL181. Em estudos realizados por Souza (2013) e Sales (2017) com a utilização desse elemento em seções “rack”, foram observados bons resultados em relação a

resultados teóricos e experimentais. O elemento SHELL181 é um elemento de casca indicado para análises elastoplásticas, com quatro nós e seis graus de liberdade em cada um dos nós, sendo a translação e rotação nos eixos X, Y e Z. Este elemento está apresentado da Figura 3.2.

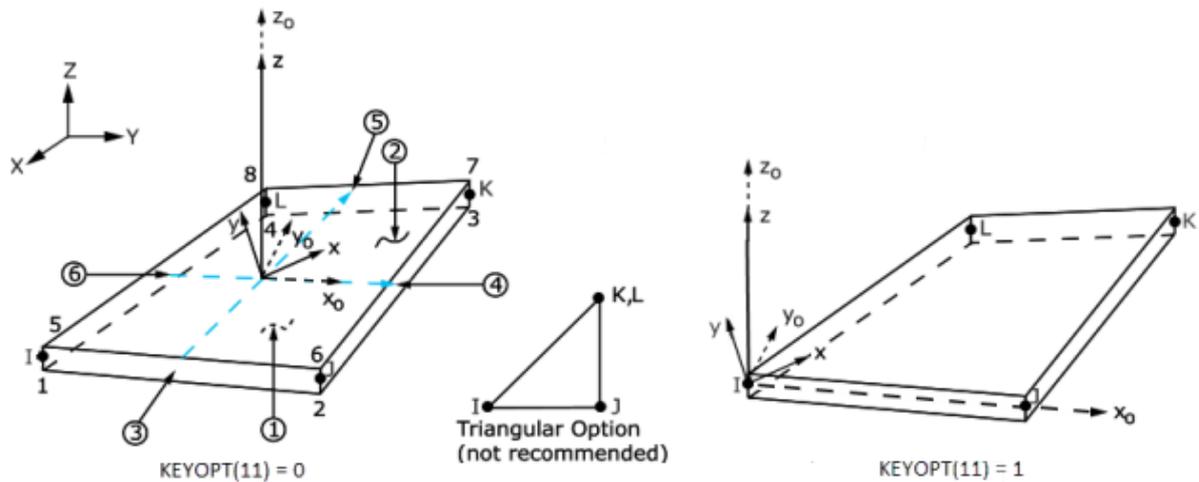


Figura 3.2 – Elemento de casca SHELL181. Fonte: ANSYS, 2013

3.3.2 Refinamento da malha

Um parâmetro importante na análise numérica via elementos finitos é o estudo da sensibilidade da malha utilizada para a discretização do modelo, buscando precisão aliada a baixo custo computacional.

Souza (2013) realizou um estudo de refinamento relacionando o tamanho dos elementos à largura da alma (b_w), tendo em vista ainda a acomodação das perfurações nos modelos com furos. O elemento com lados iguais 10% da largura da alma apresentou desempenho satisfatório, sendo adotado também neste trabalho. A figura 3.3 apresenta a distribuição da malha de elementos finitos.

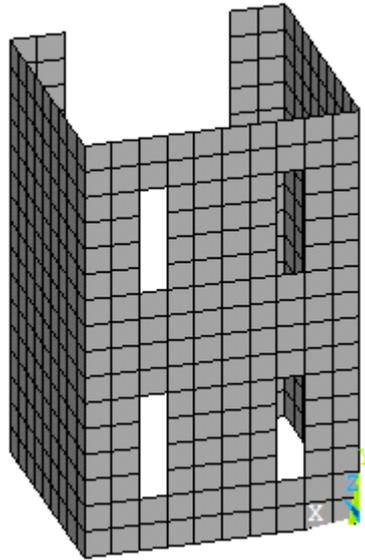


Figura 3.3 – Distribuição da malha de elementos finitos. Fonte: ANSYS, 2013

3.3.3 Condições de contorno e carregamento

As condições de contorno foram adotadas de forma a simular extremidades rotuladas. Para essa condição, todos os nós das extremidades foram restringidos quanto aos deslocamentos no plano ortogonal ao eixo da coluna. A fim de simular o vínculo de “garfo” adotado pelo software GBTul, todos os nós das extremidades, foram restringidos quanto à rotação em relação ao eixo longitudinal. Finalmente, para impedir o deslocamento de corpo rígido na direção longitudinal da coluna, um nó à meia altura nesta direção teve sua translação restringida.

A carga foi aplicada de forma distribuída ao longo das arestas das extremidades da coluna. Visando melhor distribuição de carga ao longo do eixo longitudinal, as cargas aplicadas nos nós da ponta dos enrijecedores tiveram metade do valor aplicado nos demais nós, considerando a menor área de influência dos elementos dessa região do modelo. A Figura 3.4 apresenta as restrições e carregamentos adotados para o modelo.

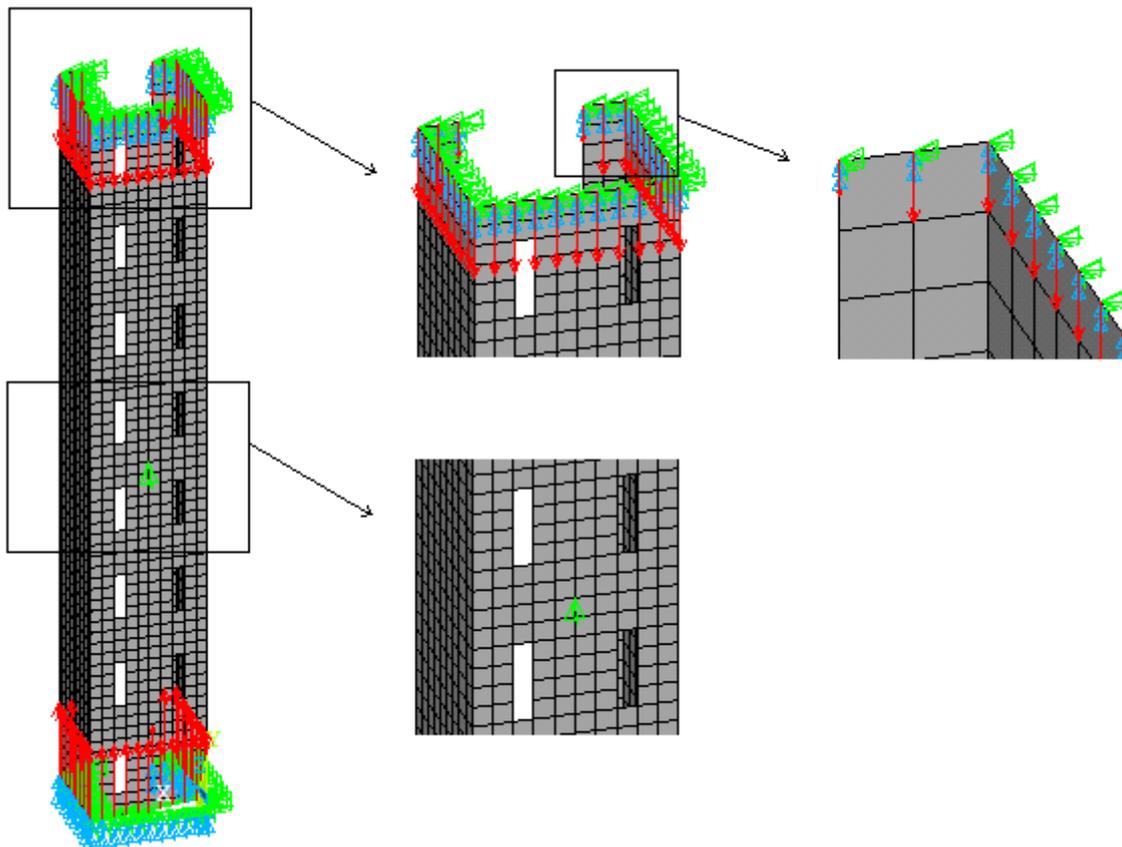


Figura 3.4 – Restrições e carregamentos para o modelo numérico. Fonte: ANSYS, 2013

3.3.4 Propriedades mecânicas dos materiais

Foram utilizados diagramas tensão x deformação multilíneares para os aços considerados nesse trabalho. Com base em estudos que calibraram resultados numéricos com experimentais (FARIA, 2016), foi adotado o modelo proposto por Salmon e Johnson (1990), e apresentado na Figura 3.5, para aço com tensão de escoamento (f_y) igual a 400MPa e tensão última (f_u) igual a 500 MPa.

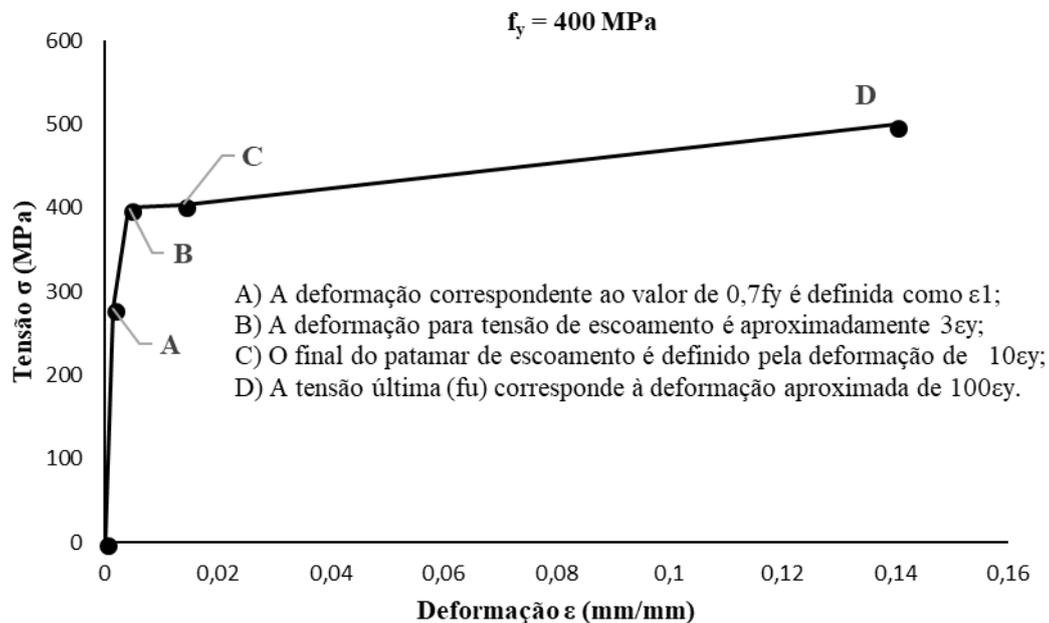


Figura 3.5 – Diagrama tensão x deformação do aço $f_y = 400\text{MPa}$. Fonte: Autor

Nesse trabalho também foi utilizado o aço com $f_y = 220 \text{ MPa}$ e $f_u = 328 \text{ MPa}$, considerado de forma similar à apresentada na Figura 3.5.

Para todos os aços, considerou-se o módulo de elasticidade (E) igual a 200000 MPa .

3.3.5 Rotina de programação para análise numérica linear via Ansys

Com o objetivo de automatizar a construção dos modelos numéricos no software ANSYS, foi utilizada a linguagem de programação paramétrica (APDL – ANSYS Parametric Design Language). Essa ferramenta facilita o estudo, uma vez que permite alterações das geometrias dos modelos e perfurações, além de outras variáveis do estudo. A seguir é apresentada a rotina de comandos para análise linear.

1. Inicialização do software ANSYS Mechanical APDL 18.0.
2. Definição do tipo de Análise Estrutural.
3. Ajuste das opções de visualizações.

4. Definição dos parâmetros do modelo (alma, flange, enrijecedor, espessura, comprimento do modelo).
5. Propriedades Mecânicas do aço:
 - a. Módulo de elasticidade.
6. Definição do tipo de Elemento utilizado: SHELL181.
7. Criação da geometria através dos parâmetros definidos no passo 4:
 - a. Criação de keypoints.
 - b. Replicação dos keypoints a uma distância igual ao comprimento do modelo.
 - c. Criação das áreas.
 - d. Inserção dos furos (caso possua)
8. Geração das malhas.
9. Aplicação das restrições aos deslocamentos e rotações.
 - a. Restrição dos nós das extremidades quanto aos deslocamentos no plano perpendicular ao eixo da coluna.
 - b. Restrição de um nó à meia altura do perfil.
 - c. Restrição dos nós das extremidades quanto a rotação ao longo do eixo da coluna.
10. Aplicação das cargas:
 - a. Aplicação em todos os nós das bordas uma carga igual a $1/(\text{números de nós} - 1)$.
 - b. Retirada dos carregamentos dos nós das extremidades.
 - c. Aplicação nos nós das extremidades uma carga igual a $1/(2 * (\text{números de nós} - 1))$.
11. Solução do problema de autovalor e autovetor, para determinação da força axial de flambagem elástica e do modo a ela associado.
12. Visualização e avaliação dos resultados.

3.3.6 Rotina de programação para análise numérica não linear via Ansys

Para obter a resistência última dos perfis “U” enrijecidos submetidos à compressão, além da análise linear, foi realizada a análise não linear considerando os efeitos de segunda ordem e as propriedades elastoplásticas do aço. Para tanto, também foi adotada a metodologia da linguagem paramétrica APDL, cuja rotina de comandos está apresentada a seguir.

1. Inicialização do software ANSYS Mechanical APDL 18.0.
2. Deste passo ao 11º, segue-se os procedimentos do item 3.3.5.

12. Introdução das imperfeições geométricas e escolha dos modos de flambagem:
 - a. A introdução das imperfeições irá induzir a flambagem. Seguindo premissas de Faria (2016), o fator de imperfeição foi definido como metade da espessura do modelo.
 - b. A definição do modo de flambagem é feita após análise linear prévia, posteriormente são introduzidos no modelo, fatores de imperfeição (Souza,2013).
13. Propriedades elastoplásticas do aço e introdução do diagrama multilinear:
 - a. Aços utilizados:
 - $f_y = 400$ MPa e $f_u = 500$ MPa
 - $f_y = 220$ MPa e $f_u = 328$ MPa
 - b. As não linearidades do aço foram feitas considerando o gráfico de tensão x deformação multilinear conforme apresentado no item 3.3.4.
14. Apagadas todas a cargas e aplicadas cargas com um fator P_y igual ao escoamento da seção bruta do perfil ($A_g f_y$):
 - d. Aplicação em todos os nós das bordas uma carga igual a $P/(\text{números de nós} - 1)$.
 - e. Retirada dos carregamentos dos nós das extremidades.
 - f. Aplicação nós das extremidades uma carga igual a $P/(2*(\text{números de nós} - 1))$.
15. Solução do problema de análise não linear: Para garantir a convergência da análise foi utilizado o Método do Comprimento de Arco, onde a carga foi aplicada em 50 subetapas e o critério de parada adotado, variou para cada família de seções geométricas, procurando deixar o modelo livre para atingir sua força axial de compressão resistente.
16. Visualização e avaliação dos resultados.

3.3.7 Análise linear via Teoria Generalizada de Vigas através do software GBTul

A análise de estabilidade das seções, necessária para a utilização do Método da Resistência Direta, foi feita neste trabalho através do software GBTul (BEBIANO et al., 2008). O modelo gerado é apresentado na Figura 3.6. A Figura 3.6a mostra a fase de criação da seção através das posições nodais. Na Figura 3.6b, são apresentadas as condições de vinculação do modelo, onde são consideradas as extremidades simplesmente apoiadas com vínculo de

“garfo”, quanto as condições do carregamento, que é unitário e aplicado no centro de gravidade da seção.

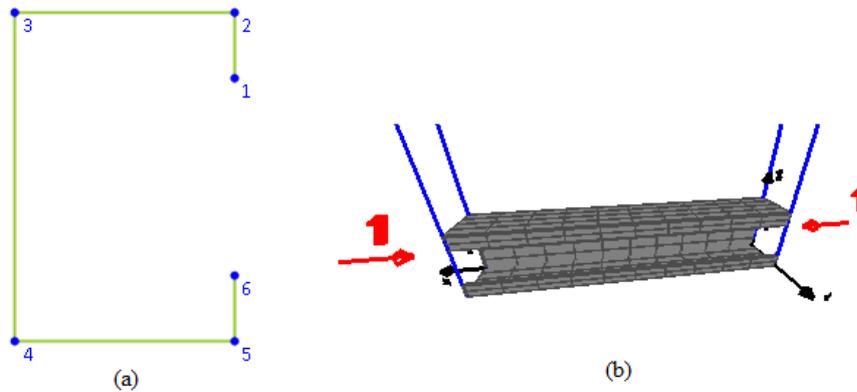


Figura 3.6 - Modelo criado através do programa GBTul: (a) seção transversal; (b) isometria demonstrando as vinculações a condição de carregamento. Fonte: BEBIANO et al., 2008.

A validação da análise numérica é indicada pela boa correlação entre os resultados da análise de flambagem elástica pelo método dos elementos finitos e também pela Teoria Generalizada de Vigas, conforme apresentado na Figura 3.7 para o perfil eu 50x45x10x1,6. Foram analisadas as cargas críticas em função do comprimento da seção, que foi variado, de 100 a 1000 mm, e observou-se boa correlação entre os resultados.

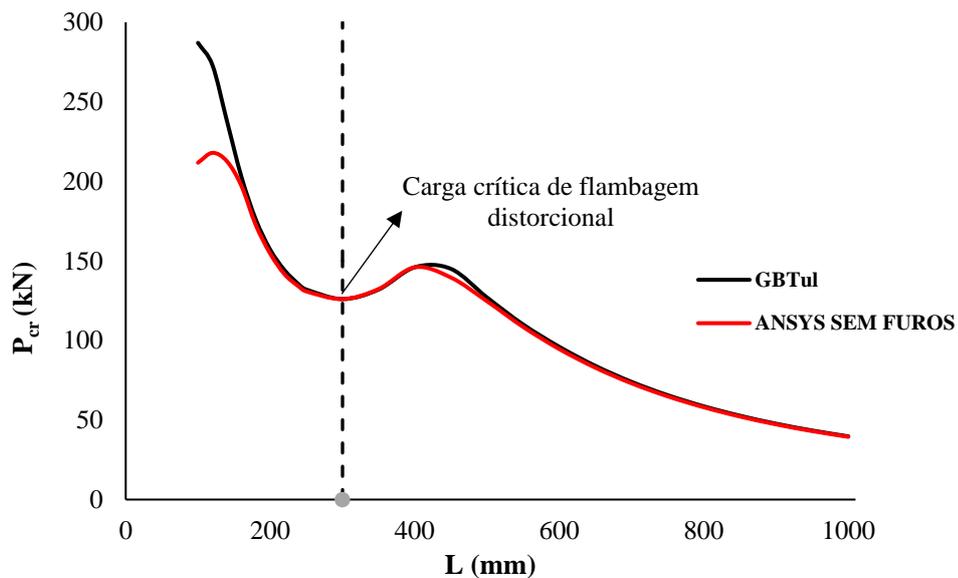


Figura 3.7 - Comparação entre os resultados do ANSYS e GBTUL da carga crítica da seção UE50x45x10x1,6. Fonte: Autor

A Figura 3.8 apresenta os modos de flambagem e respectivas cargas críticas de flambagem para o perfil UE50x45x10x1,6 considerando um comprimento de 300 mm. Mais uma vez observa-se boa correlação entre os resultados

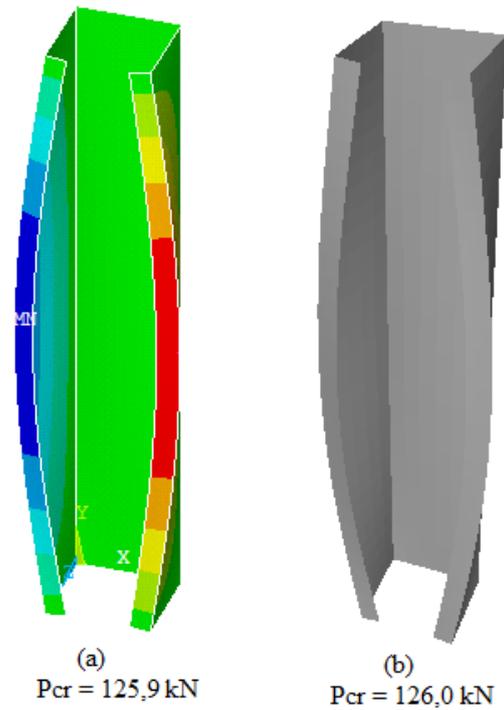


Figura 3.8 - Modo de flambagem e carga crítica para as simulações: (a) ANSYS sem furos, (b) GBTul.
Fonte: ANSYS, 2013 e BEBIANO et al., 2008.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das forças axiais de compressão resistentes dos modelos estudados, obtidos numericamente pela análise não linear via ANSYS, e é feita sua comparação com os resultados métodos teóricos apresentados no capítulo 2.

O tópico 4.1 apresenta a análise numérica das colunas sem perfurações e sua comparação com os resultados normativos, visando indicar a viabilidade do modelo numérico. O tópico 4.2 apresenta os resultados para os métodos estudados nesse trabalho, aqui intitulados de MOEN 2, MOEN 4 e SALES, além da proposição de uma adequação, intitulado de ALTERNATIVO. O tópico 4.3, apresentam as análises quantitativas e qualitativas dos resultados obtidos, através da comparação de dados estatísticos.

4.1 COMPARAÇÃO DAS CARGAS RESISTENTES DAS COLUNAS SEM FURO

Esse tópico compara os resultados das forças axiais de compressão resistentes obtidas pelo modelo numérico não linear das colunas sem furos, com os obtidos pelo Método da Resistência Direta, de acordo com as prescrições do anexo C da norma NBR 14762:2010 (ABNT, 2010).

As forças axiais de flambagem distorcional elástica (N_{dist}) obtidas via GBTul foram utilizadas para o cálculo das cargas resistentes das colunas sem furos pelo Método da Resistência Direta ($N_{c,Rdist-MRD}$). Posteriormente, estes resultados foram comparados com as forças axiais de compressão resistentes obtidas pela análise não linear via ANSYS ($N_{c,Rdist-ANSYS}$). A Figura 4.1, apresenta os resultados considerando o aço com escoamento de 400 e 220 MPa, respectivamente, e o Apêndice C apresentam os resultados obtidos pela análise das colunas sem furos, considerando as duas tensões de escoamento. Observa-se, em geral, boa correlação entre os resultados, indicando a viabilidade do método.

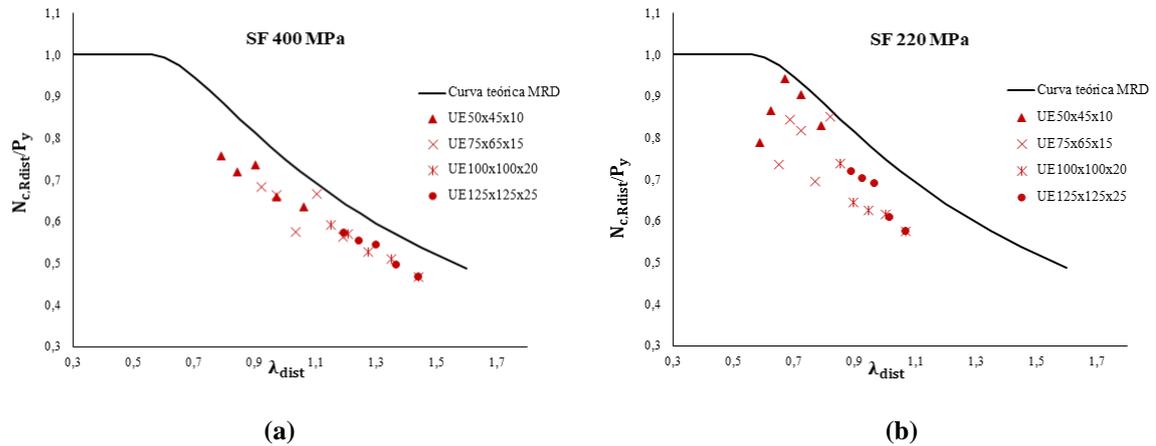


Figura 4.1 - Comparação entre curva teórica do MRD e resultados numéricos via MEF, para resistência de colunas sem perfurações. Resultados para aço com 400 MPa (a) e 200 MPa (b) de tensão de escoamento. Fonte: Autor

4.2 COMPARAÇÃO DAS CARGAS RESISTENTES DAS COLUNAS COM FUROS

Essa seção compara as cargas resistentes obtidas via Método dos Elementos Finitos, com as obtidas pelos métodos MOEN 2 e 4 de cálculo (MOEN E SCHAFER, 2009), cujas equações são apresentadas no Capítulo 2. A análise da estabilidade elástica é feita através do software GBTul, adotando para alma do perfil U enrijecido uma espessura ($t_{web,hole}$) determinada pelo procedimento sugerido pelos autores (Equação 2.4).

Será utilizado também o método alternativo de Sales (2017), chamado nesse trabalho de SALES, onde o método MOEN 2 (MOEN E SCHAFER, 2009) é adaptado pela consideração na análise de estabilidade elástica de uma espessura fictícia (t_{fic}) determinada pela Equação 2.10.

Finalmente será apresentada uma proposta de modificação do método de Sales (2017), chamado de método ALTERNATIVO, que considera que a perda da resistência de um perfil com furos seja proporcional à relação entre a área líquida da seção (A_{net}) e a área bruta (A_g) da mesma.

4.2.1 MOEN 2 (MOEN E SCHAFFER, 2009)

A Figura 4.2 apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelo método proposto por Moen e Schafer (2009), MOEN 2, com os resultados numéricos frutos da análise não linear de perfis U enrijecido com perfurações. Nos modelos foram consideradas 4 seções U enrijecido, cada uma delas com 5 espessuras diferentes conforme apresentado na tabela 3.2. Foram considerados aços com duas tensões de escoamento (f_y), 400 e 220 MPa, totalizando 40 análises numéricas. Os resultados são apresentados no Apêndice D.

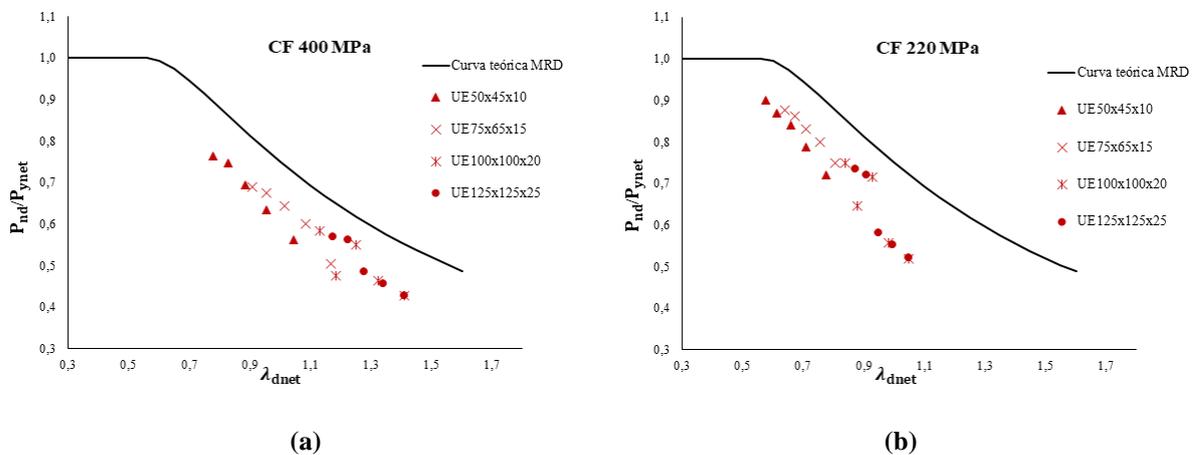


Figura 4.2 - Comparação entre resistência entre MOEN 2 e análises numéricas. Resultados para aço com 400 MPa (a) e 200 MPa (b) de tensão de escoamento. Fonte: Autor

4.2.2 MOEN 4 (MOEN E SCHAFFER, 2009)

A Figura 4.3 apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelo método proposto por Moen e Schafer (2009), MOEN 4, com os resultados numéricos frutos da análise não linear de perfis U enrijecido com perfurações. Nos modelos foram consideradas 4 seções U enrijecido, cada uma delas com 5 espessuras diferentes conforme apresentado na tabela 3.2. Foram considerados aços com duas tensões de escoamento (f_y), 400 e 220 MPa, totalizando 40 análises numéricas. Os resultados são apresentados no Apêndice E.

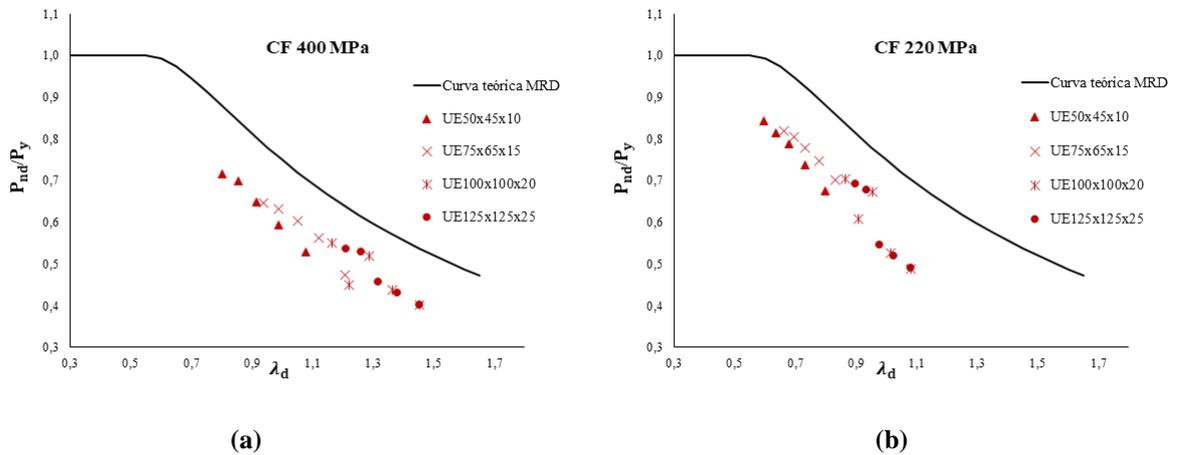


Figura 4.3 - Comparação entre resistência entre MOEN 4 e análises numéricas. Resultados para aço com 400 MPa (a) e 200 MPa (b) de tensão de escoamento. Fonte: Autor

4.2.3 SALES (SALES, 2017)

Ao estudar as opções de extensões do Método de Resistência Direta propostas por Moen e Schafer (2009) para perfis rack com perfurações, Sales (2017), propõe um método alternativo (SALES) através da modificação de MOEN 2. Conforme apresentado no item 2.2.3, Sales (2017) propõe que o cálculo da força axial de flambagem elástica, P_{crd} (N_{dist} , pela NBR 14762), a ser utilizada no cálculo de a resistência pelo método MOEN 2, dever ser calculada considerando a espessura fictícia (t_{fic}), Equação 2.10, cuja redução é proporcional à área remanescente da alma após a subtração dos furos.

A Figura 4.4 apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelo método proposto por Sale (2017), com os resultados numéricos frutos da análise não linear de perfis U enrijecido com perfurações. Nos modelos foram consideradas 4 seções U enrijecido, cada uma delas com 5 espessuras diferentes conforme apresentado na tabela 3.2. Foram considerados aços com duas tensões de escoamento (f_y), 400 e 220 MPa, totalizando 40 análises numéricas. Os resultados são apresentados no Apêndice F.

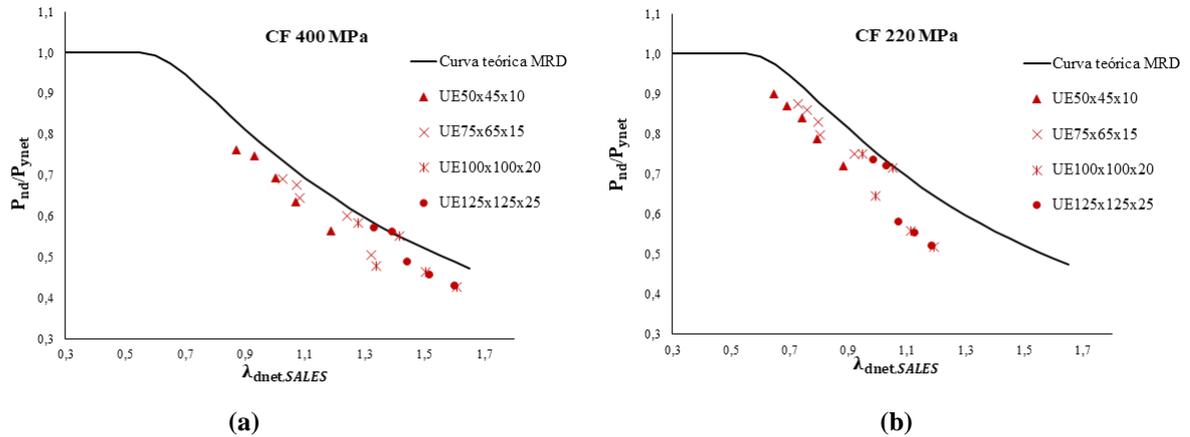


Figura 4.4 - Comparação entre resistência entre método SALES e análises numéricas. Resultados para aço com 400 MPa (a) e 200 MPa (b) de tensão de escoamento. Fonte: Autor

4.2.4 ALTERNATIVO

Nesse método alternativo, a análise de flambagem elástica realizada no software GBTul utiliza a espessura fictícia (t_{fic}) proposta Sales (2017), contudo, propõe-se ainda a modificação da equação de resistência proposta por Moen e Schafer (2009), em MOEN 2, considerando que a perda da resistência de um perfil com furos seja proporcional à relação entre a sua área líquida (A_{net}) e a área da sua seção bruta (A_g). Adotando o coeficiente (α) como sendo a relação entre essas áreas, temos:

$$\alpha = \frac{A_{net}}{A_g} \quad \text{Equação 4.1}$$

Com isso temos as seguintes equações de resistência:

Para $\lambda_{dnet} \leq 0,561$:

$$P_{nd,ALTERN} = \alpha P_{y_{net}} \quad \text{Equação 4.2}$$

Para $\lambda_{dnet} > 0,561$:

$$P_{nd,ALTERN} = \alpha \left(1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_{y_{net}}} \right)^{0,6} \right) \left(\frac{P_{crd}}{P_{y_{net}}} \right)^{0,6} P_{y_{net}} \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde:

$$\lambda_{dnet} = \left(\frac{P_{y_{net}}}{P_{crd,SALES}} \right)^{0,5}; \quad \text{Equação 4.4}$$

$P_{crd,SALES}$ é a força axial de flambagem distorcional (N_{dist} , pela NBR 14762), para as seções com furos, obtida através da análise elástica no programa GBTul, utilizando a espessura fictícia (t_{fic}) proposta Sales (2017).

A Figura 4.5 apresenta a curva de resistência das colunas se seção U enrijecido submetidas à compressão, com furos, obtida através do método ALTERNATIVO. Devido ao padrão das seções transversais adotadas nesse trabalho, a relação A_{net}/A_g para todos os modelos, com duas casas decimais, é igual a 0,94. A Figura 4.5 apresenta a curva de resistência para $\alpha = 0,94$. Nos modelos foram consideradas 4 seções U enrijecido, cada uma delas com 5 espessuras diferentes conforme apresentado na tabela 3.2. Foram considerados aços com duas tensões de escoamento (f_y), 400 e 220 MPa, totalizando 40 análises numéricas. Os resultados são apresentados no Apêndice G.

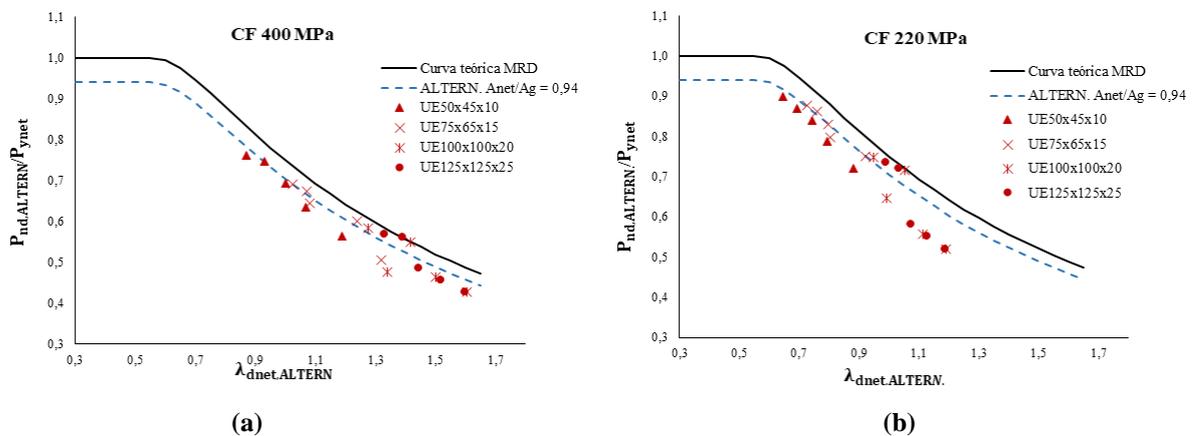


Figura 4.5 - Comparação entre resistência entre método ALTERNATIVO e análises numéricas. Resultados para aço com 400 MPa (a) e 200 MPa (b) de tensão de escoamento. Fonte: Autor

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 4.1 exhibe as médias e os desvios padrões obtidos para a dispersão percentual entre os resultados da resistência à compressão determinada pelas extensões do Método da Resistência Direta, e os resultados numéricos, aqui tomados como referências. A Figura 4.6 contém a comparação dos dados estatísticos da dispersão entre os resultados numéricos e os resultados teóricos para cada um dos métodos estudados nesse trabalho.

Tabela 4.1 - Análise estatística da dispersão percentual entre os resultados dos métodos estudados. Fonte: Autor

Método	Com (CF) ou sem (SF) furos	f_y (MPa)	N.º de modelos	Dispersão percentual média (%)	Desvio padrão (%)
MRD	SF	400	20	14,06	4,40
		220	20	16,86	9,18
MOEN 2	CF	400	20	21,00	6,98
		220	20	20,64	10,54
MOEN 4	CF	400	20	25,47	7,03
		220	20	20,82	15,23
SALES	CF	400	20	9,00	5,56
		220	20	11,49	7,96
ALTERNATIVO	CF	400	20	4,69	3,35
		220	20	6,42	6,11

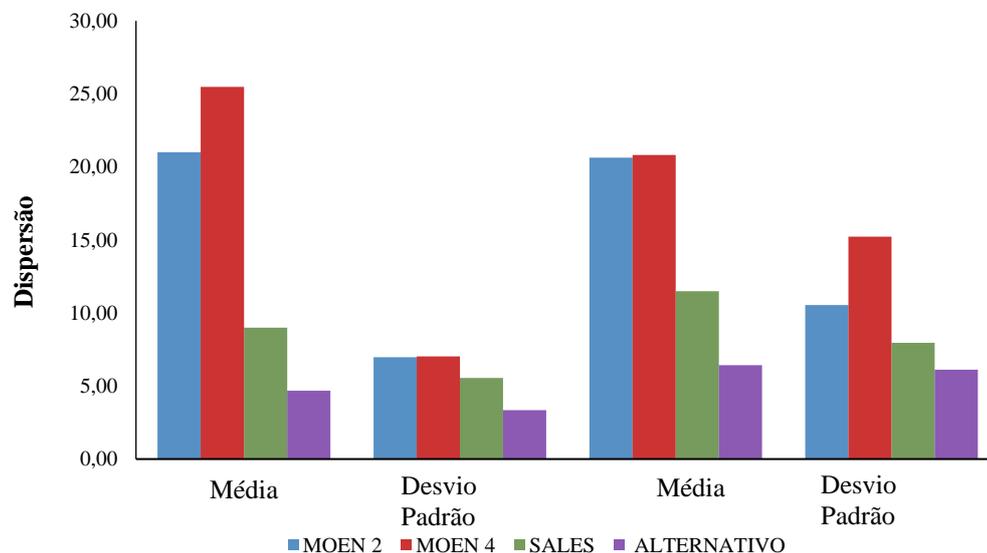


Figura 4.6 - Comparação da dispersão entre os resultados da resistência a compressão propostas pelos métodos teórico e numéricos. Fonte: Autor

Pode-se observar, que o modelo numérico sem furos apresentou boa correlação com os resultados obtidos via Método da Resistência Direta, com dispersão percentual média de 14,06 e 16,86%, para os aços com tensão de escoamento de 400 e 220 MPa, respectivamente, o que indica a validade do procedimento.

Dos métodos propostos por Moen e Schafer (2009), MOEN 2, apresentou melhores resultados. Ressalta-se que estes métodos foram desenvolvidos considerando um arranjo de perfurações bastante diferente do empregado neste trabalho.

O método de Sales (2017), apresentou resultados melhores que os métodos propostos por Moen e Schafer (2009). Em média os resultados do método SALES tiveram uma dispersão

entre seus valores de 9,00 e 11,49%, e um desvio padrão de 5,56 e 7,96%, para aços com a tensão de escoamento de 400 e 220 MPa, respectivamente. Ressalta-se também, que para esse método, todos os valores das análises numéricas foram menores que os valores teóricos, ficando a favor da segurança.

Observa-se que o método ALTERNATIVO, proposto nesse trabalho, apresentou resultados mais próximos entre a compressão teórica e a obtida pela análise numérica via ANSYS, indicando a viabilidade do método. Em média os resultados tiveram uma dispersão entre seus valores de 4,69 e 6,42%, e um desvio padrão da dispersão de seus resultados de 3,35 e 6,11%, para aços com a tensão de escoamento de 400 e 220 MPa, respectivamente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho teve como objetivo a avaliação de extensões do Método de Resistência Direta para a determinação da resistência de perfis U enrijecidos formados a frio, sob compressão centrada, com furos. As perfurações são utilizadas para passagem de dutos e para atender a soluções estruturais como as ligações dos sistemas de armazenagem industrial. Nesse contexto, tornam-se de suma importância estudos e pesquisas que visam consolidar uma base tecnológica para o dimensionamento de perfis formados a frio com perfurações.

As análises numéricas não lineares de perfis U enrijecidos com e sem furos foram realizadas utilizando o Método dos Elementos Finitos, via ANSYS. Foram criados modelos utilizando a linguagem de programação APDL (*Parametric Design Language - ANSYS*), automatizando a criação e variação dos parâmetros dos modelos numéricos. As condições de contorno foram adotadas de forma a simular extremidades rotuladas. Baseados em estudos prévios foi adotado o elemento de casca SHELL181 para a parede das colunas e elementos de malha com dimensão igual a 10% da dimensão da alma b_w .

Utilizou-se ainda, análise numérica fundamentada na Teoria Generalizada de Viga, via GBTul, para determinação da força axial de flambagem elástica, empregada no cálculo da resistência axial das colunas pelo Método de Resistência Direta e suas extensões avaliadas neste trabalho.

Definiram-se modelos para simulação de 20 seções transversais U enrijecido: Ue 50x45x10, Ue 75x65x15, Ue 100x100x20 e Ue 125x125x25, com 5 espessuras de chapa para cada, analisadas para os comprimentos fixos de 300, 700, 1200 e 1500 mm, respectivamente. Foram considerados aços com duas tensões de escoamento (f_y), 400 e 220 MPa, totalizando 80 análises numéricas para colunas com e sem furos.

Inicialmente, o método simplificado na análise elástica, via GBTul, foi utilizado para determinação da força axial de flambagem elástica empregada no cálculo da força axial resistente pelo Método da Resistência Direta das colunas sem furos. Esses valores foram comparados com a força axial resistente obtidas via ANSYS, para colunas sem furos. Os resultados indicaram boa correlação do modelo numérico implementado.

Na implementação do modelo numérico, foram adotados procedimentos nas condições de contorno e carregamento que tiveram importante contribuição nos resultados. De forma a simular o vínculo de “garfo” adotado pelo software GBTul, todos os nós das extremidades, foram restringidos quanto à rotação em relação ao eixo longitudinal. Quanto ao carregamento, para melhor distribuição de carga ao longo do eixo longitudinal, as cargas aplicadas nos nós da ponta dos enrijecedores, tiveram metade do valor aplicado nos demais nós, considerando a menor área de influência dos elementos dessa região do modelo.

Uma vez validado o modelo numérico, foram introduzidas as perfurações através da linguagem de programação do ANSYS e realizadas novas análises não-lineares para obter, desta vez, a carga resistente dos perfis com furos. Estas cargas foram comparadas com as opções de extensão do Método da Resistência Direta de estudos anteriores (MOEN 2, MOEN 4 e SALES) e uma proposta nesse estudo (ALTERNATIVO).

Observou-se que entre os métodos propostos Moen e Schafer (2009), MOEN 2, apresentou melhores resultados. O método proposto por Sales (2017), SALES, apresentou resultados melhores que os métodos propostos por Moen e Schafer (2009). Os valores das análises numéricas, ainda, foram menores que os valores teóricos, o que indicou que o método está a favor da segurança.

Apresentou-se ainda um método ALTERNATIVO em busca de resultados ainda mais próximo entre as resistências teóricas e numéricas. Esse método propôs estender o método SALES, adaptando a curva de resistência apresentada em MOEN 2 para considerar a relação entre a área da seção líquida e a área da seção bruta da coluna com furos. Com isso, foram observados resultado com melhores correlações que os estudos anteriores.

A análise das quatro alternativas estudadas indicou a viabilidade da extensão do Método de Resistência Direta para o dimensionamento de perfis formados a frio com perfurações. Embora a análise de estabilidade elástica seja, em termos práticos, pouco utilizada, os softwares de fácil manuseio como o GBTul, torna essa análise viável.

Sugerem-se os seguintes itens para continuidade desse trabalho:

- Realizar programa experimental para calibração com o modelo numérico;
- Expandir a variedade de seções U enrijecido estudadas;

- Considerar novas geometrias e disposições de furos;
- Investigar as condições de contorno em caráter prático simulando novas condições de vinculação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S. J. C. **Análise numérica de perfis de aço formados a frio comprimidos considerando imperfeições geométricas iniciais**. 206 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- ANSYS® Structural Analysis, release 15.0, Help System. **Mechanical APDL Structural Analysis Guide**. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA. 522 p., 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14762: **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**, ABNT NBR 14762: Rio de Janeiro, 2010.
- BATISTA, E. M. **Local–global buckling interaction procedures for the design of cold formed columns: Effective width and direct method integrated approach**. *Thin-Walled Structures* 47, p.1218–1231, 2009.
- BEBIANO R., PINA P., SILVESTRE N., CAMOTIM D. **GBTUL – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members**, DECivil/IST, Technical University of Lisbon Disponível em: <<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>>, 2008.
- CAI J., MOEN, C. D. Elastic buckling analysis of thin-walled structural members with rectangular holes using generalized beam theory. **Thin-Walled Structures**, v. 107, p. 274–286, 2016.
- FARIA, V. O. **Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- GALAMBOS, T. V. **Guidetostability design criteria for metal structures**. New York: **John Wiley & Sons**. 911p, New York, 1998.
- HANCOCK, G. J. Distortional buckling of steel storage rack columns. **Journal of Structural Engineering**, v.111, n. 12, p. 2770–2783, 1985.
- HANCOCK G. J., KWON Y. B., BERNARD, E. S. Strength design curves for thin walled sections undergoing distortional buckling. **Journal of Construction Steel Research**, v.31, p.169- 86, 1994.
- MOEN, C. D., SCHAFER, B. W. **DirectStrength Design ofCold-Formed Steel members with perforations**: Research Report RP 09-1. Washington: American Iron and Steel Institute – Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Strutuctural Members, 540 p., 2009.
- NEIVA, L. H. A., **Análise da influência da variação de perfurações no comportamento e capacidade de carga de perfis formados a frio de seção tipo rack**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Pret, Ouro Preto, 2017.

NEIVA, L. H. A., SALES, A. E. C. A., ELIAS, G. C., SARMANHO, A. M. C., SOUZA, F. T. Análise do modo distorcional de elementos perfurados segundo Método da Resistência Direta. **Revista da estrutura de aço – CBCA**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 15-36, abr. 2018.

OLIVEIRA, A. M. **Análise Teórico-Experimental de Sistemas Estruturais de Armazenamento (Rack`s)**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000.

KARMAN, V., SECHLER, E. E., DONNELL, L. H. 1932). The Strength of Thin Walled Plates in Compression. *Transactions of ASME* v. 54, MP 54-5, 1932.

SALES, A. E. C. A. **Análise da aplicação do método da resistência direta a perfis formados a frio com perfurações submetidos à compressão**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

SALMON E JOHNSON. **STEEL STRUCTURES: Design and Behavior. Emphasizing Load and Resistance Factor Design**, Third Edition, p.45-46, 1990.

SCHAFFER, B. W., ÁDÁNY, S. Buckling analysis of cold formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. **Eighteenth International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures**. Orlando, USA, v.1, n. 1, p.38-54, 2006.

SCHAFFER, B. W., PEKÖZ, T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfection and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, v.47, p.193-210, January, 1998.

SILVA, G. G. DA. **Análise teórico-experimental de colunas curtas perfuradas**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

SOUZA, F. T. **Análise teórico-experimental da estabilidade de colunas perfuradas em perfis de aço formados a frio de seções tipo rack**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 209 p, 2013.

SOUZA, F. T. DE. **Análise teórico-experimental de sistemas apertados com elementos perfurados em perfis formados a frio - Racks**. Dissertação de Mestrado – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 104 f., 2005.

YAO, Z., RASMUSSEN, K. J. R. **Material and Geometric Non-Linear Isoparametric Spline Finite Strip Analysis of Perforated Thin-Walled Steel Structures**. Relatório de pesquisa R910. Escola de Engenharia Civil. Universidade de Sydney. Sydney, 2010.

WINTER, G., "Strength of Thin Steel Compression Flanges," *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol. 112, pp. 527-554, 1947.

APÊNDICE A

APDL SEM FUROS

```

finish
/clear

/FILNAME, INTRO-IMP, 1 !NOME DO ARQUIVO DE SAÍDA

/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO

/VIEW,1,0.3,0.50,-1

!PARÂMETROS

/PREP7

BW=50 !LARGURA DA ALMA
BF=45 !LARGURA DO FLAMGE
BS=10 !LARGURA DO ENRRIGECEDOR
ESP=1.2 !ESPESSURA
L=400 !COMPRIMENTO DO MODELO
DM=5 !DIMENSÃO DA MALHA %10 DE BW

!ELEMENTO E MATERIAL

MOD_EST=200000 !MODULO ELASTICIDADE PERFIL
FY=400 !TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)
FU=500 !TENSÃO ÚLTIMA (MPa)
EY=(0.7*FY)/MOD_EST !DEFORMAÇÃO NO ESCOAMENTO

ET,1,SHELL181

KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,2

```

KEYOPT,1,8,2
 KEYOPT,1,9,0
 KEYOPT,1,10,0

R,1,ESP, , , , ,

MPTEMP, 1, , , , ,
 MPDATA,EX,1,,MOD_EST
 MPDATA,PRXY,1,,0.3

!GERACAO DAS AREAS

K,1,,,
 K,2,BW,,
 K,3,BW,,BF,
 K,4,BW-BS,,BF,
 K,5,BS,,BF,
 K,6,0,,BF,

KGEN,2,1,6,1, ,L, , ,0

A,4,3,9,10
 A,3,2,8,9
 A,1,2,8,7
 A,6,1,7,12
 A,6,5,11,12

!GERACAO DA MALHA

AATT, 1, 1, 1, 0
 AESIZE, ALL, DM,
 MSHKEY, 0
 AMESH, ALL,,
 EPLOT

!APLICACAO DAS RESTRICOES

NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
 D, ALL, UX, 0, , , , UZ,ROTY, , ,
 ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
 !D, ALL, UX, 0, , , , UZ, , , ,
 D, ALL, UX, 0, , , , UZ,ROTY, , ,
 ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,(L/2)-DM/2,(L/2)+DM/2
 NSEL,R,LOC,X,(BW/2)-DM/2,(BW/2)+DM/2
 D, ALL, UY, 0, , , , , , ,
 ALLSEL,ALL

!APLICACAO DAS CARGAS

NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
 *GET,NOS,NODE,0,COUNT

F,ALL,FY,1/(NOS-1)

NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
 F, ALL, FY, -1/(NOS-1),
 ALLSEL,ALL

!

 !RETIRANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5
 NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
 NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
 NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4
 NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
 NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
 NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11
 NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
 NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
 NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
 FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10
 NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
 NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
 NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

FDELE,ALL

!

 !COLOCANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5
 NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
 NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
 NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

F,ALL,FY,1/(2*(NOS-1))

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4

NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1

NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1

NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

F,ALL,FY,1/(2*(NOS-1))

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11

NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1

NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1

NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

F,ALL,FY,-1/(2*(NOS-1))

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10

NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1

NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1

NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

F,ALL,FY,-1/(2*(NOS-1))

ALLSEL,ALL

EPLLOT

SAVE

!SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FLAMBAGEM ELASTICA

/SOLU

ANTYPE,0

PSTRES,1

SOLVE

FINISH

/SOLU

ANTYPE,1

BUCOPT,LANB,20,0,0

MXPAND,20,0,0,0,0.001,

SOLVE

FINISH

EPLLOT

!ATUALIZAÇÃO DA GEOMETRIA (INTRODUÇÃO DE IMPERFEIÇÕES)

/PREP7

UPGEOM,-ESP/2,1,1,'INTRO-IMP','rst',''

!INTRODUÇÃO DO DIAGRAMA TENSAO-DEFORMAÇÃO BILINEAR

```
TB,MISO,1,1,4,0
TBTEMP,0
TBPT,,EY,0.7*FY
TBPT,,3*EY,FY
TBPT,,10*EY,1.01*FY
TBPT,,100*EY,FU
```

!SOLUÇÃO DO PROBLEMA NÃO LINEAR COM APLICAÇÃO DE
DESLOCAMENTOS

$$P=(BW+2*BF+2*BS)*ESP*FY$$

```
/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,50,0,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
TIME,P
ARCLEN,1,0,0
ARCTRM,U,15,0,UX
AUTOTS,-1.0
```

```
FDELE,ALL
```

```
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
F, ALL, FY, P/(NOS-1),
ALLSEL,ALL
```

```
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
F, ALL, FY,-P/(NOS-1),
ALLSEL,ALL
```

```
!
!_____
!RETIRANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA
```

```
!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
```

```
FDELE,ALL
```

```
!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
```

```
FDELE,ALL
```

```

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

```

```
FDELE,ALL
```

```

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

```

```
FDELE,ALL
```

```

!COLOCANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA

```

```

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

```

```
F,ALL,FY,P/(2*(NOS-1))
```

```

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

```

```
F,ALL,FY,P/(2*(NOS-1))
```

```

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

```

```
F,ALL,FY,-P/(2*(NOS-1))
```

```

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

```

```
F,ALL,FY,-P/(2*(NOS-1))
```

```

ALLSEL,ALL
SOLVE

```

APÊNDICE B

APDL COM FUROS

```

finish
/clear

/FILNAME, INTRO-IMP, 1    !NOME DO ARQUIVO DE SAÍDA

/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO

/VIEW,1,0.3,0.50,-1

!PARÂMETROS

/PREP7

BW=50    !LARGURA DA ALMA
BF=45    !LARGURA DO FLAMGE
BS=10    !LARGURA DO ENRRIGECEDOR
ESP=1.2  !ESPESSURA
!L=400   !COMPRIMENTO DO MODELO
DM=5     !DIMENSSÃO DA MALHA %10 DE BW

!


---


REL=0.4  !RELAÇÃO ENTRE O COMPRIMENTO DO FURO E A LARGURA DA
ALMA

DIF=0    !DIFERENCA NA ABERTURA
h=REL*BW    !ALTURA DO FURO
B_FURO=0.1*BW    !LARGURA DO FURO
LI=400    !COMPRIMENTO INICIAL DO PROTOTIPO
!DESCONSIDERANDO A COMPATIBILIDADE COM O NUMERO DE FUROS
N=(LI-MOD(LI,h))/h    !NÚMERO INTEIRO DE INTERVALO
RESTO=MOD(N,2)    !N É PAR/IMPARG?. SE RESTO DA DIV N/2=0, PAR
*IF,RESTO,EQ,0,THEN

```

```

L=N*h !COMPR. NEC. DO PROTOTIPO QDO N É PAR
*ELSE
L=(N+1)*h ! COMPR. NEC. DO PROTOTIPO QDO N É IMPAR
*ENDIF

```

```

!_____
!ELEMENTO E MATERIAL

```

```

MOD_EST=200000          !MODULO ELASTICIDADE PERFIL
FY=400                 !TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)
FU=500                 !TENSÃO ÚLTIMA (MPa)
EY=(0.7*FY)/MOD_EST   !DEFORMAÇÃO NO ESCOAMENTO

```

```

ET,1,SHELL181

```

```

KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,2
KEYOPT,1,8,2
KEYOPT,1,9,0
KEYOPT,1,10,0

```

```

R,1,ESP, , , , ,

```

```

MPTEMP, 1, , , , ,
MPDATA,EX,1,,MOD_EST
MPDATA,PRXY,1,,0.3

```

```

!GERACAO DAS AREAS

```

```

K,1,,,
K,2,BW,,,
K,3,BW,,BF,
K,4,BW-BS,,BF,
K,5,BS,,BF,
K,6,0,,BF,

```

```

KGEN,2,1,6,1, ,L, , ,0

```

```

A,4,3,9,10
A,3,2,8,9
A,1,2,8,7
A,6,1,7,12
A,6,5,11,12

```

```

!_____
!INCERÇÃO DOS FUROS

```

```

*DO, Y, REL*BW/2, L-REL*BW/2,2*REL*BW
BLC4,2*BW/10,Y,BW/10,REL*BW

```

BLC4,(BW-(3*BW/10)),Y,BW/10,REL*BW

*ENDDO

ASEL,S,LOC,Z,0

ASBA,3,ALL

ALLSEL, ALL

!

!GERACAO DA MALHA

AATT, 1, 1, 1, 0

AESIZE, ALL, DM,

MSHKEY, 0

AMESH, ALL,,

EPLOT

!APLICACAO DAS RESTRICOES

NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1

D, ALL, UX, 0, , , , UZ,ROTY, , ,

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1

!D, ALL, UX, 0, , , , UZ, , , ,

D, ALL, UX, 0, , , , UZ,ROTY, , ,

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,(L/2)-DM/2,(L/2)+DM/2

NSEL,R,LOC,X,(BW/2)-DM/2,(BW/2)+DM/2

D, ALL, UY, 0, , , , , , , ,

ALLSEL,ALL

!APLICACAO DAS CARGAS

NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1

*GET,NOS,NODE,0,COUNT

F,ALL,FY,1/(NOS-1)

NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1

F, ALL, FY, -1/(NOS-1),

ALLSEL,ALL

!

!RETIRANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5

NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1

NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1

NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4

NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1

NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1

NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11

NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1

NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1

NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10

NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1

NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1

NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

FDELE,ALL

!

!COLOCANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5

NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1

NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1

NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

F,ALL,FY,1/(2*(NOS-1))

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4

NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1

NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1

NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

F,ALL,FY,1/(2*(NOS-1))

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11

NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1

NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1

NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

F,ALL,FY,-1/(2*(NOS-1))

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10

```

NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

```

```
F,ALL,FY,-1/(2*(NOS-1))
```

```

ALLSEL,ALL
EPLT
SAVE

```

!SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FLAMBAGEM ELASTICA

```

/SOLU
ANTYPE,0
PSTRES,1
SOLVE

```

```

FINISH
/SOLU
ANTYPE,1
BUOPT,LANB,20,0,0
MXPAND,20,0,0,0,0.001,
SOLVE

```

```
FINISH
```

```
EPLT
```

!ATUALIZACAO DA GEOMETRIA (INTRODUCAO DE IMPERFEIÇÕES)

```

/PREP7
UPGEOM,-ESP/2,1,1,'INTRO-IMP','rst',' '

```

!INTRODUÇÃO DO DIAGRAMA TENSAO-DEFORMAÇÃO BILINEAR

```

TB,MISO,1,1,4,0
TBTEMP,0
TBPT,,EY,0.7*FY
TBPT,,3*EY,FY
TBPT,,10*EY,1.01*FY
TBPT,,100*EY,FU

```

! SOLUÇÃO DO PROBLEMA NÃO LINEAR COM APLICAÇÃO DE DESLOCAMENTOS

```
P=(BW+2*BF+2*BS)*ESP*FY
```

```

/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1

```

NSUBST,50,0,0
 NSUBST,100,0,0
 OUTRES,ERASE
 OUTRES,ALL,ALL
 TIME,P
 ARCLN,1,0,0
 ARCTRM,U,15,0,UX
 AUTOTS,-1.0

FDELE,ALL

NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
 F, ALL, FY, P/(NOS-1),
 ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
 F, ALL, FY,-P/(NOS-1),
 ALLSEL,ALL

!

 !RETIRANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5
 NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
 NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
 NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4
 NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
 NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
 NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11
 NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
 NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
 NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10
 NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
 NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
 NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

FDELE,ALL

!
!COLOCANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

F,ALL,FY,P/(2*(NOS-1))

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

F,ALL,FY,P/(2*(NOS-1))

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

F,ALL,FY,-P/(2*(NOS-1))

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

F,ALL,FY,-P/(2*(NOS-1))

ALLSEL,ALL

SOLVE

APÊNDICE C

RESULTADOS PARA SEÇÕES SEM FUROS

**Tabela C.1 - Resultado Carga Resistentes pela análise numérica de perfis sem furos, $f_y = 400$ MPa.
Fonte: Autor**

Seção Estudada	N_{dist}	Ag	Py	λ_{dist}	$N_{c,Rdist,MRD}$	$N_{c,Rdist,ANSYS}$	Dispersão
	GBTul						
Ue 50x45x10x1,2	68,36	1,92	76,80	1,060	54,92	48,93	12,26
Ue 50x45x10x1,4	95,36	2,24	89,60	0,969	68,87	59,38	15,99
Ue 50x45x10x1,6	126,89	2,56	102,40	0,898	83,35	75,53	10,35
Ue 50x45x10x1,8	164,03	2,88	115,20	0,838	98,40	83,21	18,25
Ue 50x45x10x2,0	206,94	3,20	128,00	0,786	113,81	97,31	16,96
Ue 75x65x15x1,4	93,25	3,29	131,60	1,188	85,27	74,32	14,73
Ue 75x65x15x1,6	123,92	3,76	150,40	1,102	104,10	100,66	3,41
Ue 75x65x15x1,8	158,74	4,23	169,20	1,032	123,66	97,81	26,43
Ue 75x65x15x2,0	199,69	4,70	188,00	0,970	144,40	125,33	15,21
Ue 75x65x15x2,2	244,29	5,17	206,80	0,920	165,40	141,67	16,75
Ue 100x100x20x1,6	105,45	5,44	217,6	1,437	118,08	102,19	15,55
Ue 100x100x20x1,8	134,93	6,12	244,8	1,347	141,29	125,78	12,33
Ue 100x100x20x2,0	168,45	6,80	272	1,271	165,77	144,26	14,91
Ue 100x100x20x2,2	206,14	7,48	299,2	1,205	191,43	171,21	11,81
Ue 100x100x20x2,4	247,97	8,16	326,4	1,147	218,11	193,72	12,59
Ue 125x125x25x2,0	164,78	8,50	340	1,436	184,52	159,51	15,68
Ue 125x125x25x2,2	201,16	9,35	374	1,364	213,37	186,54	14,39
Ue 125x125x25x2,4	241,60	10,20	408	1,300	243,54	222,59	9,41
Ue 125x125x25x2,6	286,21	11,05	442	1,243	274,95	245,90	11,82
Ue 125x125x25x2,8	334,61	11,90	476	1,193	307,31	273,55	12,34

Tabela C.2 - Resultado Carga Resistentes pela análise numérica de perfis sem furos, $f_y = 220$ MPa. Fonte: Autor

Seção Estudada	N_{dist}	Ag	Py	λ_{dist}	$N_{c,Rdist,MRD}$	$N_{c,Rdist,ANSYS}$	Dispersão
	kN	cm ²	kN		kN	kN	%
Ue 50x45x10x1,2	68,36	1,92	42,24	0,786	37,57	35,18	6,8
Ue 50x45x10x1,4	95,36	2,24	49,28	0,719	46,03	44,65	3,1
Ue50x45x10x1,6	126,89	2,56	56,32	0,666	54,37	53,13	2,3
Ue 50x45x10x1,8	164,03	2,88	63,36	0,622	62,52	54,99	13,7
Ue 50x45x10x2,0	206,94	3,20	70,40	0,583	70,26	55,74	26,0
Ue 75x65x15x1,6	123,92	3,76	82,72	0,817	71,83	70,63	1,7
Ue 75x65x15x1,8	158,74	4,23	93,06	0,766	84,05	64,84	29,6
Ue 75x65x15x2,0	199,69	4,70	103,40	0,720	96,52	84,80	13,8
Ue 75x65x15x2,2	244,29	5,17	113,74	0,682	108,77	96,27	13,0
Ue 75x65x15x2,4	295,86	5,64	124,08	0,648	120,99	91,54	32,2
Ue 100x100x20x1,6	105,45	5,44	119,68	1,065	85,22	68,99	23,5
Ue 100x100x20x1,8	134,93	6,12	134,64	0,999	101,07	83,21	21,5
Ue 100x100x20x2,0	168,45	6,80	149,6	0,942	117,52	93,79	25,3
Ue 100x100x20x2,2	206,14	7,48	164,56	0,893	134,47	106,46	26,3
Ue 100x100x20x2,4	247,97	8,16	179,52	0,851	151,78	132,78	14,3
Ue 125x125x25x2,0	164,78	8,50	187	1,065	133,17	107,80	23,5
Ue 125x125x25x2,2	201,16	9,35	205,7	1,011	152,90	125,56	21,8
Ue 125x125x25x2,4	241,60	10,20	224,4	0,964	173,27	155,56	11,4
Ue 125x125x25x2,6	286,21	11,05	243,1	0,922	194,19	171,33	13,3
Ue 125x125x25x2,8	334,61	11,90	261,8	0,885	215,47	189,15	13,9

APÊNDICE D

RESULTADOS PARA SEÇÕES COM FUROS – MOEN 2

Tabela D.1 - Resultados numéricos para método MOEN 2, $f_y = 400$ MPa. Fonte: Autor

Seção Estudada	$t_{web,hole}$	A_{net}	P_{ynet}	λ_{dnet}	P_{crt}	$P_{nd,MOEN2}$	$P_{nd,ANSYS}$	Dispersão
	mm	cm ²	kN		kN	kN	kN	%
Ue 50x45x10x1,2	1,177	1,80	72,00	1,040	66,61	52,32	40,73	28,45
Ue 50x45x10x1,4	1,368	2,10	84,00	0,952	92,75	65,49	53,50	22,42
Ue 50x45x10x1,6	1,564	2,40	96,00	0,883	123,22	79,13	66,78	18,49
Ue 50x45x10x1,8	1,756	2,70	108,00	0,824	158,99	93,26	80,90	15,27
Ue 50x45x10x2,0	1,947	3,00	120,00	0,774	200,29	107,71	91,85	17,27
Ue 75x65x15x1,4	1,374	3,08	123,20	1,163	91,03	81,32	62,59	29,92
Ue 75x65x15x1,6	1,570	3,52	140,80	1,080	120,70	99,11	84,82	16,85
Ue 75x65x15x1,8	1,763	3,96	158,40	1,013	154,46	117,60	102,56	14,67
Ue 75x65x15x2,0	1,955	4,40	176,00	0,952	194,21	137,19	119,26	15,04
Ue 75x65x15x2,2	2,150	4,84	193,60	0,903	237,17	156,93	134,16	16,97
Ue 100x100x20x1,6	1,576	5,12	204,80	1,407	103,40	113,36	88,11	28,66
Ue 100x100x20x1,8	1,771	5,76	230,40	1,320	132,17	135,51	107,57	25,97
Ue 100x100x20x2,0	1,966	6,40	256,00	1,246	164,82	158,83	141,60	12,17
Ue 100x100x20x2,2	2,160	7,04	281,60	1,182	201,52	183,26	135,00	35,75
Ue 100x100x20x2,4	2,355	7,68	307,20	1,126	242,15	208,61	180,19	15,77
Ue 125x125x25x2,0	1,969	8,00	320,00	1,407	161,56	177,12	137,79	28,54
Ue 125x125x25x2,2	2,165	8,80	352,00	1,336	197,15	204,70	161,48	26,77
Ue 125x125x25x2,4	2,359	9,60	384,00	1,274	236,49	233,43	187,84	24,27
Ue 125x125x25x2,6	2,556	10,40	416,00	1,219	279,94	263,35	235,01	12,06
Ue 125x125x25x2,8	2,750	11,20	448,00	1,170	327,04	294,14	256,41	14,72

Tabela D. 2 - Resultados numéricos para método MOEN 2, $f_y = 220$ MPa. Fonte: Autor

Seção Estudada	$t_{web,hole}$	A_{net}	P_{ynet}	λ_{dnet}	P_{crt}	P_{MOEN2}^{nd}	P_{ANSYS}^{nd}	Dispersão
	mm	cm ²	kN		kN	kN	kN	%
Ue 50x45x10x1,2	1,177	1,80	39,60	0,771	66,61	35,62	28,63	24,43
Ue 50x45x10x1,4	1,368	2,10	46,20	0,706	92,75	43,53	36,52	19,18
Ue 50x45x10x1,6	1,564	2,40	52,80	0,655	123,22	51,30	44,50	15,28
Ue 50x45x10x1,8	1,756	2,70	59,40	0,611	158,99	58,84	51,82	13,54
Ue 50x45x10x2,0	1,947	3,00	66,00	0,574	200,29	65,95	59,52	10,81
Ue 75x65x15x1,4	1,570	3,52	77,44	0,801	120,70	68,09	58,22	16,95
Ue 75x65x15x1,6	1,763	3,96	87,12	0,751	154,46	79,54	69,77	14,01
Ue 75x65x15x1,8	1,955	4,40	96,80	0,706	194,21	91,19	80,62	13,12
Ue 75x65x15x2,0	2,150	4,84	106,48	0,670	237,17	102,57	91,93	11,57
Ue 75x65x15x2,2	2,345	5,28	116,16	0,636	286,78	113,88	102,00	11,65
Ue 100x100x20x1,6	1,576	5,12	112,64	1,044	103,40	81,59	58,73	38,91
Ue 100x100x20x1,8	1,771	5,76	126,72	0,979	132,17	96,64	71,05	36,01
Ue 100x100x20x2,0	1,966	6,40	140,80	0,924	164,82	112,23	101,05	11,07
Ue 100x100x20x2,2	2,160	7,04	154,88	0,877	201,52	128,28	100,38	27,79
Ue 100x100x20x2,4	2,355	7,68	168,96	0,835	242,15	144,63	126,96	13,92
Ue 125x125x25x2,0	1,969	8,00	176,00	1,044	161,56	127,48	91,964	38,62
Ue 125x125x25x2,2	2,165	8,80	193,60	0,991	197,15	146,25	107,291	36,32
Ue 125x125x25x2,4	2,359	9,60	211,20	0,945	236,49	165,55	123,238	34,34
Ue 125x125x25x2,6	2,556	10,40	228,80	0,904	279,94	185,37	165,308	12,14
Ue 125x125x25x2,8	2,750	11,20	246,40	0,868	327,04	205,50	181,562	13,18

APÊNDICE E

RESULTADOS PARA SEÇÕES COM FUROS – MOEN 4

Tabela E. 1 - - Resultados numéricos para método MOEN 4, $f_y = 400$ MPa. Fonte: Autor

Seção Estudada	A_g	P_y	P_{crt}	λ_d	λ_{d1}	λ_{d2}	P_{d2}	P_{MOEN4}^{nd}	P_{ANSYS}^{nd}	Dispersão
	cm ²	kN	kN					kN	kN	
Ue 50x45x10x1,2	1,92	76,80	66,61	1,074	0,526	0,766	69,33	54,33	40,73	33,38
Ue 50x45x10x1,4	2,24	89,60	92,75	0,983	0,526	0,766	80,88	68,13	53,50	27,35
Ue 50x45x10x1,6	2,56	102,40	123,22	0,912	0,526	0,766	92,44	82,46	66,78	23,48
Ue 50x45x10x1,8	2,88	115,20	158,99	0,851	0,526	0,766	103,99	97,37	80,90	20,36
Ue 50x45x10x2,0	3,20	128,00	200,29	0,799	0,526	0,766	115,54	112,68	91,85	22,69
									0,00	0,00
Ue 75x65x15x1,4	3,29	131,60	91,03	1,202	0,525	0,771	118,39	84,35	62,59	34,76
Ue 75x65x15x1,6	3,76	150,40	120,70	1,116	0,525	0,771	135,30	102,92	84,82	21,35
Ue 75x65x15x1,8	4,23	169,20	154,46	1,047	0,525	0,771	152,21	122,28	102,56	19,23
Ue 75x65x15x2,0	4,70	188,00	194,21	0,984	0,525	0,771	169,13	142,83	119,26	19,77
Ue 75x65x15x2,2	5,17	206,80	237,17	0,934	0,525	0,771	186,04	163,58	134,16	21,93
Ue 100x100x20x1,6	5,44	217,60	103,40	1,451	0,528	0,754	198,26	116,97	88,11	32,76
Ue 100x100x20x1,8	6,12	244,80	132,17	1,361	0,528	0,754	223,05	139,91	107,57	30,07
Ue 100x100x20x2,0	6,80	272,00	164,82	1,285	0,528	0,754	247,83	164,11	141,60	15,90
Ue 100x100x20x2,2	7,48	299,20	201,52	1,218	0,528	0,754	272,61	189,48	135,00	40,36
Ue 100x100x20x2,4	8,16	326,40	242,15	1,161	0,528	0,754	297,39	215,84	180,19	19,78
									0,00	0,00
Ue 125x125x25x2,0	8,50	340	161,56	1,451	0,528	0,754	309,79	182,76	137,79	32,63
Ue 125x125x25x2,2	9,35	374	197,15	1,377	0,528	0,754	340,76	211,33	161,48	30,87
Ue 125x125x25x2,4	10,20	408	236,49	1,313	0,528	0,754	371,74	241,12	187,84	28,37
Ue 125x125x25x2,6	11,05	442	279,94	1,257	0,528	0,754	402,72	272,18	235,01	15,82
Ue 125x125x25x2,8	11,90	476	327,04	1,206	0,528	0,754	433,70	304,17	256,41	18,63

Tabela E. 2 - Resultados numéricos para método MOEN 4, $f_y = 220$ MPa. Fonte: Autor

Seção Estudada	A_g	P_y	P_{crt}	λ_d	λ_{d1}	λ_{d2}	P_{d2}	P_{MOEN4}^{nd}	P_{ANSYS}^{nd}	Dispersão
	cm ²	kN	kN				kN	kN	kN	%
Ue 50x45x10x1,2	1,92	42,24	66,61	0,796	0,526	0,766	38,13	37,27	28,63	30,19
Ue 50x45x10x1,4	2,24	49,28	92,75	0,729	0,526	0,766	44,48	41,00	36,52	12,26
Ue 50x45x10x1,6	2,56	56,32	123,22	0,676	0,526	0,766	50,84	47,29	44,50	6,27
Ue 50x45x10x1,8	2,88	63,36	158,99	0,631	0,526	0,766	57,19	53,61	51,82	3,45
Ue 50x45x10x2,0	3,20	70,40	200,29	0,593	0,526	0,766	63,55	59,96	59,52	0,74
Ue 75x65x15x1,4	3,76	82,72	120,70	0,828	0,525	0,771	74,42	71,22	58,22	22,34
Ue 75x65x15x1,6	4,23	93,06	154,46	0,776	0,525	0,771	83,72	83,39	69,77	19,53
Ue 75x65x15x1,8	4,70	103,40	194,21	0,730	0,525	0,771	93,02	85,58	80,62	6,16
Ue 75x65x15x2,0	5,17	113,74	237,17	0,693	0,525	0,771	102,32	94,76	91,93	3,08
Ue 75x65x15x2,2	5,64	124,08	286,78	0,658	0,525	0,771	111,62	104,02	102,00	1,98
Ue 100x100x20x1,6	5,44	119,68	103,40	1,076	0,528	0,754	109,04	84,52	58,73	43,91
Ue 100x100x20x1,8	6,12	134,64	132,17	1,009	0,528	0,754	122,67	100,23	71,05	41,06
Ue 100x100x20x2,0	6,80	149,60	164,82	0,953	0,528	0,754	136,31	116,54	101,05	15,33
Ue 100x100x20x2,2	7,48	164,56	201,52	0,904	0,528	0,754	149,94	133,37	100,38	32,86
Ue 100x100x20x2,4	8,16	179,52	242,15	0,861	0,528	0,754	163,57	150,56	126,96	18,59
Ue 125x125x25x2,0	8,50	187,00	161,56	1,076	0,528	0,754	170,38	132,07	91,96	43,61
Ue 125x125x25x2,2	9,35	205,70	197,15	1,021	0,528	0,754	187,42	151,65	107,29	41,35
Ue 125x125x25x2,4	10,20	224,40	236,49	0,974	0,528	0,754	204,46	171,83	123,24	39,43
Ue 125x125x25x2,6	11,05	243,10	279,94	0,932	0,528	0,754	221,50	192,59	165,31	16,50
Ue 125x125x25x2,8	11,90	261,80	327,04	0,895	0,528	0,754	238,53	213,71	181,56	17,71

APÊNDICE F

RESULTADOS PARA SEÇÕES COM FUROS – SALES

Tabela F. 1 - Resultados numéricos para método SALES, $f_y = 400$ MPa. Fonte: Autor

Seção Estudada	t_{fic}	A_{net}	P_{ynet}	$\lambda_{dnet, SALES}$	$P_{crt, SALES}$	$P_{nd, SALES}$	$P_{nd, ANSYS}$	Dispersão
	mm	cm ²	Kn		kN	kN	kN	%
Ue 50x45x10x1,2	0,960	1,80	72,00	1,184	51,34	46,78	40,73	14,86
Ue 50x45x10x1,4	1,120	2,10	84,00	1,066	73,96	59,80	53,50	11,78
Ue 50x45x10x1,6	1,280	2,40	96,00	0,998	96,37	72,11	66,78	7,98
Ue 50x45x10x1,8	1,440	2,70	108,00	0,928	125,46	85,84	80,90	6,10
Ue 50x45x10x2,0	1,600	3,00	120,00	0,866	159,96	100,23	91,85	9,13
Ue 75x65x15x1,4	1,120	3,08	123,20	1,317	71,04	72,63	62,59	16,04
Ue 75x65x15x1,6	1,280	3,52	140,80	1,236	92,16	88,02	84,82	3,77
Ue 75x65x15x1,8	1,440	3,96	158,40	1,078	136,36	111,70	102,56	8,91
Ue 75x65x15x2,0	1,600	4,40	176,00	1,068	154,39	125,10	119,26	4,89
Ue 75x65x15x2,2	1,760	4,84	193,60	1,020	185,99	142,87	134,16	6,49
Ue 100x100x20x1,6	1,280	5,12	204,80	1,602	79,77	99,80	88,11	13,27
Ue 100x100x20x1,8	1,440	5,76	230,40	1,498	102,66	120,02	107,57	11,57
Ue 100x100x20x2,0	1,600	6,40	256,00	1,413	128,21	141,15	141,60	0,32
Ue 100x100x20x2,2	1,760	7,04	281,60	1,334	158,17	163,98	135,00	21,47
Ue 100x100x20x2,4	1,920	7,68	307,20	1,273	189,43	186,85	180,19	3,70
Ue 125x125x25x2,0	1,600	8,00	320,00	1,595	125,735	156,62	137,79	13,66
Ue 125x125x25x2,2	1,760	8,80	352,00	1,514	153,655	181,52	161,48	12,41
Ue 125x125x25x2,4	1,920	9,60	384,00	1,440	185,175	207,89	187,84	10,68
Ue 125x125x25x2,6	2,080	10,40	416,00	1,387	216,367	233,57	235,01	0,61
Ue 125x125x25x2,8	2,240	11,20	448,00	1,326	254,701	262,37	256,41	2,33

Tabela F. 2 - Resultados numéricos para método SALES, $f_y = 220$ MPa. Fonte: Autor

Seção Estudada	t_{fic}	A_{net}	P_{ynet}	$\lambda_{dnet, SALES}$	$P_{crt, SALES}$	$P_{nd, SALES}$	$P_{nd, ANSYS}$	Dispersão
	mm	cm ²	kN		kN	kN	kN	%
Ue 50x45x10x1,2	0,960	1,80	39,60	0,878	51,34	32,76	28,63	14,42
Ue 50x45x10x1,4	1,120	2,10	46,20	0,790	73,96	40,96	36,52	12,14
Ue 50x45x10x1,6	1,280	2,40	52,80	0,740	96,37	48,58	44,50	9,18
Ue 50x45x10x1,8	1,440	2,70	59,40	0,688	125,46	56,60	51,82	9,23
Ue 50x45x10x2,0	1,600	3,00	66,00	0,642	159,96	64,52	59,52	8,41
Ue 75x65x15x1,4	1,280	3,52	77,44	0,917	92,16	62,11	58,22	6,67
Ue 75x65x15x1,6	1,440	3,96	87,12	0,799	136,36	76,70	69,77	9,94
Ue 75x65x15x1,8	1,600	4,40	96,80	0,792	154,39	85,72	80,62	6,33
Ue 75x65x15x2,0	1,760	4,84	106,48	0,757	185,99	96,81	91,93	5,31
Ue 75x65x15x2,2	1,920	5,28	116,16	0,723	222,15	108,17	102,00	6,05
Ue 100x100x20x1,6	1,280	5,12	112,64	1,188	79,77	72,96	58,73	24,22
Ue 100x100x20x1,8	1,440	5,76	126,72	1,111	102,66	87,07	71,05	22,55
Ue 100x100x20x2,0	1,600	6,40	140,80	1,048	128,21	101,65	101,05	0,59
Ue 100x100x20x2,2	1,760	7,04	154,88	0,990	158,17	117,14	100,38	16,69
Ue 100x100x20x2,4	1,920	7,68	168,96	0,944	189,43	132,51	126,96	4,37
Ue 125x125x25x2,0	1,600	8,00	176,00	1,183	125,74	114,45	91,96	24,45
Ue 125x125x25x2,2	1,760	8,80	193,60	1,122	153,66	131,86	107,29	22,90
Ue 125x125x25x2,4	1,920	9,60	211,20	1,068	185,18	150,08	123,24	21,78
Ue 125x125x25x2,6	2,080	10,40	228,80	1,028	216,37	167,77	165,31	1,49
Ue 125x125x25x2,8	2,240	11,20	246,40	0,984	254,70	187,25	181,56	3,13

APÊNDICE G

RESULTADOS PARA SEÇÕES COM FUROS – ALTERNATIVO

Tabela G. 1 - Resultados numéricos para método ALTERNATIVO, $f_y = 400$ MPa. Fonte: Autor

Seção Estudada	A_g	A_{net}	A_{net}/A_g	P_{ynet}	$\lambda_{dnet, SALES}$	$P_{crt, SALES}$	$P_{nd, ALTERN.}$	$P_{nd, ANSYS}$	Dispersão
	cm ²	cm ²		kN		kN	kN	kN	%
Ue 50x45x10x1,2	1,92	1,80	0,938	72,00	1,184	51,34	43,86	40,73	7,68
Ue 50x45x10x1,4	2,24	2,10	0,938	84,00	1,066	73,96	56,06	53,50	4,79
Ue 50x45x10x1,6	2,56	2,40	0,938	96,00	0,998	96,37	67,60	66,78	1,23
Ue 50x45x10x1,8	2,88	2,70	0,938	108,00	0,928	125,46	80,48	80,90	0,53
Ue 50x45x10x2,0	3,20	3,00	0,938	120,00	0,866	159,96	93,97	91,85	2,31
Ue 75x65x15x1,4	3,29	3,08	0,936	123,20	1,317	71,04	68,00	62,59	8,63
Ue 75x65x15x1,6	3,76	3,52	0,936	140,80	1,236	92,16	82,40	84,82	2,85
Ue 75x65x15x1,8	4,23	3,96	0,936	158,40	1,078	136,36	104,57	102,56	1,96
Ue 75x65x15x2,0	4,70	4,40	0,936	176,00	1,068	154,39	117,11	119,26	1,80
Ue 75x65x15x2,2	5,17	4,84	0,936	193,60	1,020	185,99	133,75	134,16	0,30
Ue 100x100x20x1,6	5,44	5,12	0,941	204,80	1,602	79,77	93,93	88,11	6,61
Ue 100x100x20x1,8	6,12	5,76	0,941	230,40	1,498	102,66	112,96	107,57	5,01
Ue 100x100x20x2,0	6,80	6,40	0,941	256,00	1,413	128,21	132,85	141,60	6,18
Ue 100x100x20x2,2	7,48	7,04	0,941	281,60	1,334	158,17	154,34	135,00	14,33
Ue 100x100x20x2,4	8,16	7,68	0,941	307,20	1,273	189,43	175,86	180,19	2,40
Ue 125x125x25x2,0	8,50	8,00	0,941	320,00	1,595	125,74	147,41	137,79	6,98
Ue 125x125x25x2,2	9,35	8,80	0,941	352,00	1,514	153,66	170,84	161,48	5,80
Ue 125x125x25x2,4	10,20	9,60	0,941	384,00	1,440	185,18	195,66	187,84	4,17
Ue 125x125x25x2,6	11,05	10,40	0,941	416,00	1,387	216,37	219,83	235,01	6,46
Ue 125x125x25x2,8	11,90	11,20	0,941	448,00	1,326	254,70	246,94	256,41	3,69

Tabela G. 2 - Resultados numéricos para método ALTERNATIVO, $f_y = 220$ MPa. Fonte: Autor

Seção Estudada	A_g	A_{net}	A_{net}/A_g	P_{ynet}	$\lambda_{dnet, SALES}$	$P_{crt, SALES}$	$P_{nd, ALTERN.}$	$P_{nd, ANSYS}$	Dispersão
	cm ²	cm ²		kN		kN		kN	%
Ue 50x45x10x1,2	1,92	1,80	0,938	39,60	0,878	51,34	30,71	28,63	7,26
Ue 50x45x10x1,4	2,24	2,10	0,938	46,20	0,790	73,96	38,40	36,52	5,13
Ue 50x45x10x1,6	2,56	2,40	0,938	52,80	0,740	96,37	45,55	44,50	2,36
Ue 50x45x10x1,8	2,88	2,70	0,938	59,40	0,688	125,46	53,07	51,82	2,40
Ue 50x45x10x2,0	3,20	3,00	0,938	66,00	0,642	159,96	60,49	59,52	1,63
Ue 75x65x15x1,4	3,76	3,52	0,936	77,44	0,917	92,16	58,14	58,22	0,13
Ue 75x65x15x1,6	4,23	3,96	0,936	87,12	0,799	136,36	71,81	69,77	2,92
Ue 75x65x15x1,8	4,70	4,40	0,936	96,80	0,792	154,39	80,25	80,62	0,46
Ue 75x65x15x2,0	5,17	4,84	0,936	106,48	0,757	185,99	90,64	91,93	1,41
Ue 75x65x15x2,2	5,64	5,28	0,936	116,16	0,723	222,15	101,27	102,00	0,72
Ue 100x100x20x1,6	5,44	5,12	0,941	112,64	1,188	79,77	68,67	58,73	16,92
Ue 100x100x20x1,8	6,12	5,76	0,941	126,72	1,111	102,66	81,95	71,05	15,34
Ue 100x100x20x2,0	6,80	6,40	0,941	140,80	1,048	128,21	95,67	101,05	5,33
Ue 100x100x20x2,2	7,48	7,04	0,941	154,88	0,990	158,17	110,25	100,38	9,83
Ue 100x100x20x2,4	8,16	7,68	0,941	168,96	0,944	189,43	124,71	126,96	1,77
Ue 125x125x25x2,0	8,50	8,00	0,941	176,00	1,183	125,74	107,72	91,96	17,13
Ue 125x125x25x2,2	9,35	8,80	0,941	193,60	1,122	153,66	124,10	107,29	15,67
Ue 125x125x25x2,4	10,20	9,60	0,941	211,20	1,068	185,18	141,26	123,24	14,62
Ue 125x125x25x2,6	11,05	10,40	0,941	228,80	1,028	216,37	157,90	165,31	4,48
Ue 125x125x25x2,8	11,90	11,20	0,941	246,40	0,984	254,70	176,23	181,56	2,93