

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DAS CONSTRUÇÕES
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DAS CONSTRUÇÕES – MECON**

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE PERFIS FORMADOS A FRIO
COM PERFURAÇÕES ENRIJECIDAS**

IGOR AMARAL NEVES DE NICOLAU

OURO PRETO-MG

2022

IGOR AMARAL NEVES DE NICOLAU

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE PERFIS FORMADOS A FRIO
COM PERFURAÇÕES ENRIJECIDAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia das Construções.

Orientadores: Flávio Teixeira de Souza, D. Sc.
Arlene Maria Cunha Sarmanho, D. Sc.

OURO PRETO-MG

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

N639a Nicolau, Igor Amaral Neves de.
Análise numérica do comportamento de perfis formados a frio com perfurações enrijecidas. [manuscrito] / Igor Amaral Neves de Nicolau. - 2022.
77 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Flávio Teixeira de Souza.
Coorientadora: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho.
Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções.
Área de Concentração: Engenharia das Construções.

1. Chapas de aço - Processo a frio. 2. Ligações parafusadas - Furos com bordas enrijecidas. 3. Flambagem (Mecânica). 4. Método dos Elementos Finitos. I. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. II. Souza, Flávio Teixeira de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



FOLHA DE APROVAÇÃO

Igor Amaral Neves de Nicolau

Análise numérica do comportamento de perfis formados a frio com perfurações enrijecidas

Dissertação apresentada ao Programa de Engenharia das Construções da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de mestre

Aprovada em 10 de janeiro de 2022

Membros da banca

Doutor - Flávio Teixeira de Souza - Orientador - Instituto Federal de Minas Gerais
Doutora - Arlene Maria Cunha Sarmanho - Universidade federal de Ouro Preto
Doutor - Geraldo Donizetti de Paula - Universidade federal de Ouro Preto
Doutor - Gabriel Vieira Nunes - Instituto Federal de Minas Gerais

Flávio Teixeira de Souza, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 04/03/2022



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Donizetti de Paula, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DAS CONSTRUÇÕES**, em 04/03/2022, às 19:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0287562** e o código CRC **9CC29244**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.002418/2022-62

SEI nº 0287562

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: 3135591546 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por tudo.

Agradeço a minha mãe pelo apoio durante toda a trajetória.

Quero agradecer ao meu orientador que foi fundamental durante toda a jornada.

Agradeço aos meus colegas de trabalho do IFMG – Ouro Preto.

Também gostaria de agradecer a UFOP, aos meus colegas de curso e a todo corpo docente e funcionários da UFOP.

E a todos que participaram de alguma forma na produção deste trabalho.

RESUMO

O uso dos Perfis Formados a Frio (PFF) é bastante amplo, podendo ser utilizado na indústria automobilística e aeronáutica, na construção civil, em sistemas de armazenagem, etc. Os furos podem estar presentes nos elementos estruturais com o intuito de compatibilização com os projetos de instalações prediais ou para encaixes das ligações nos sistemas de armazenagem. Os estudos apontam que furos nas barras ocasionam diminuição da capacidade de carga assim como influencia os modos de flambagem. Com o objetivo de minimizar a queda de resistência das barras com furos, a indústria vem desenvolvendo uma nova geração de barras de Perfis Formados a Frio com furos com bordas enrijecidas. Os estudos apontam para um aumento da capacidade de carga, podendo restaurar ou até mesmo superar os níveis apresentados em Perfis Formados a Frio sem furos. O estudo de Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos nas bordas é importante visto que as diversas normas como ABNT NBR 14762:2010 (ABNT, 2010), AISI S100-16, 2016 (AISI, 2016) e AS/NZS 4600:2018 (AS/NZS, 2018) que tratam dos Perfis Formados a Frio ainda não fornecem uma orientação direta sobre colunas com furos enrijecidos nas bordas. Neste trabalho, um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos e implementado por meio do *software* ANSYS foi usado para avaliar o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local e distorcional, de forma isolada. O modelo numérico proposto foi validado por comparação com resultados experimentais presentes na literatura. A Teoria Generalizada de Vigas (GBT) auxiliou na escolha das seções transversais e comprimento da coluna no modelo de elementos finitos. A partir das seções selecionadas foi realizado um conjunto de 300 simulações com o modelo numérico proposto validado, avaliando dois modos de flambagem: local e distorcional e três aços com tensões de escoamento diferentes: CF-30, ZAR 250 e ZAR 400. Foram avaliados perfis sem furo (SF), perfis com um furo não enrijecido (FNE) e perfis com um furo enrijecido (FE). Foram adotados três diâmetros para o furo e adotados dois comprimentos do enrijecedor da borda do furo. Os resultados indicaram que os furos enrijecidos podem aumentar a capacidade resistente e reduzir tensões e deslocamentos em relação aos perfis com furos não enrijecidos e mesmo aos perfis formados a frio sem perfurações.

Palavra-chave: Perfis Formados a Frio; Furos com bordas enrijecidas; Flambagem; Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

The use of Cold-formed Steel (CFS) is quite wide and can be used in the automobile and aeronautical industry, in civil construction, in storage systems racks, etc. The holes may be present in the structural members in order to make them compatible with the projects of building installations or for fitting connections in the storage systems. Studies show that holes in columns and beams cause a decrease in load capacity as well as influence buckling modes. In order to minimize the strength reduction of bars with holes, the industry has been developing a new generation of Cold-formed Steel channel sections with edge-stiffened holes. The studies point to an increase in the load capacity, being able to restore or even surpass the levels presented in Cold-formed Steel channel sections without holes. The study of Cold-formed Steel with edge-stiffened holes is important since the various standards such as ABNT NBR 14762:2010 (ABNT, 2010), AISI S100-16, 2016 (AISI, 2016) and AS/NZS 4600:2018 (AS/NZS, 2018) that deal Cold-formed Steel does not yet provide direct guidance about columns with edge-stiffened holes. In this work, a numerical model, based on the Finite Element Method and implemented using the ANSYS software, was used to evaluate the characteristic value of the axial compressive strength, associated with local and distortional buckling, in isolation. The proposed numerical model was validated by comparison with experimental results present in the literature. The Generalized Beam Theory (GBT) helped in the choice of cross sections and column length in the finite element model. From the selected sections, a set of 300 simulations was performed with the validated proposed numerical model, evaluating two buckling modes: local and distortional and three steels with different yield stresses: CF-30, ZAR 250 and ZAR 400. Cold-formed Steel channel sections with no hole (SF), unstiffened hole (FNE) and edge-stiffened hole (FE) were evaluated. Three hole diameters were adopted and two hole edge stiffener lengths were adopted. The results indicated that the edge-stiffened holes can increase the resistance capacity and reduce stresses and displacements in relation to the profiles with un stiffened holes and even to the cold-formed sections without perforations.

Keyword: Cold-formed Steel; Edge-stiffened holes; Buckling; Finite Element Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de armazenagem.	14
Figura 2 - Vigas de piso com furos enrijecidos na alma.	15
Figura 3 - Ilustração dos modos fundamentais de flambagem elástica em uma seção U enrijecido em compressão.	20
Figura 4 - Configuração de perfuração dos PFFs.	25
Figura 5 - Posição das perfurações.	26
Figura 6 - Configurações 1, 2, 3 e 4.	27
Figura 7 - Comportamento das curvas carga x deslocamento axial para amostras com aberturas (enrijecidas ou não enrijecidas) e sem aberturas.	35
Figura 8 - Curvas carga x deslocamento axial para amostras com diferentes espaçamentos das aberturas (enrijecidas ou não enrijecidas).	36
Figura 9 - Configuração de perfuração dos PFFs compostos.	40
Figura 10 - Configurações de perfuração das seções estudadas.	44
Figura 11 - Modelo de elemento finito da Seção Ue 100x50x20x1,6 SF.	48
Figura 12 - Modelo de elemento finito da Seção Ue 100x50x20x1,6 D40BW C10BW.	49
Figura 13 - Modelo de elemento finito com condições de contorno e carregamento.	50
Figura 14 - Diagrama Tensão X Deformação bilinear Aço CF-30.	51
Figura 15 - Resistência à compressão associada à flambagem local.	54
Figura 16 - Tensão de von Mises seção Ue 100x50x20x1,6 Aço CF-30 (MPa).	58
Figura 17 - Componente Z do deslocamento da seção Ue 100x50x20x1,6 Aço CF-30 (mm).	60
Figura 18 - Resistência à compressão associada à flambagem distorcional.	61
Figura 19 - Tensão de von Mises seção Ue 50x45x10x1,6 Aço CF-30 (Mpa).	64
Figura 20 - Componente X do deslocamento seção Ue 50x45x10x1,6 Aço CF-30 (mm).	67
Figura 21 - Resistência à compressão associada à flambagem local ZAR 250.	74
Figura 22 - Resistência à compressão associada à flambagem local ZAR 400.	75
Figura 23 - Resistência à compressão associada à flambagem distorcional ZAR 250.	76

Figura 24 - Resistência à compressão associada à flambagem distorcional ZAR 400.
.....77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Seção transversal estudada para flambagem local.....	45
Tabela 2 - Seção transversal estudada para flambagem distorcional.	45
Tabela 3 – Força axial de flambagem e comprimento de meia onda das seções estudadas.....	46
Tabela 4 - Comprimento no modelo numérico.	46
Tabela 5 - Resultados numéricos X Resultados experimentais.	52
Tabela 6 - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos.....	55
Tabela 7 - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos.....	62
Tabela 8 - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos.....	74
Tabela 9 - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos.....	75
Tabela 10 - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos.....	76
Tabela 11 - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos.....	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo	14
1.2 Justificativa.....	15
1.3 Metodologia.....	16
1.4 Estrutura do Trabalho.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Processos de fabricação	18
2.2 Aplicações	19
2.3 Comportamento estrutural.....	19
2.3.1 Flambagem global.....	21
2.3.2 Flambagem local	21
2.3.3 Flambagem distorcional	21
2.4 Normas e especificações	22
2.5 Métodos de dimensionamento e verificação	22
2.5.1 Método da Largura Efetiva (MLE) e Método da Seção Efetiva (MSE)	23
2.5.2 Método da Resistência Direta (MRD)	24
2.6 Perfis com furos não enrijecidos e perfis com furos enrijecidos	24
3 MODELO NUMÉRICO E VALIDAÇÃO	43
3.1 Seção transversal.....	43
3.2 Análise via Teoria Generalizada de Vigas.....	45
3.3 Análise via Método dos Elementos Finitos	47
3.3.1 Tipo de elemento.....	47
3.3.2 Refinamento da malha	47
3.3.3 Condições de contorno e carregamento.....	49
3.3.4 Propriedades mecânicas dos materiais.....	50
3.3.5 Solução do problema não linear.....	51
3.4 Validação do modelo numérico	52
4 RESULTADOS	54
4.1 Flambagem Local	54
4.2 Flambagem Distorcional.....	61

5 CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS	71
APÊNDICE	74
A - Flambagem Local	74
B - Flambagem Distorcional	76

1 INTRODUÇÃO

Os Perfis Formados a Frio possuem uma grande variedade de aplicações e são amplamente utilizados em sistemas de armazenagem e na construção civil em geral. Em diversas situações há a necessidade da presença de furos nos elementos constituintes da sua seção transversal para permitir, por exemplo, o encaixe das ligações entre as barras de um sistema de armazenamento, conforme a Figura 1 ou na alma de vigas visando à compatibilização entre projetos de instalações prediais, conforme a Figura 2. O entendimento da influência dos furos é bastante relevante pois eles alteram a capacidade resistente e o comportamento das estruturas.

Desta forma, busca-se atenuar a influência das perfurações nos Perfis Formados a Frio. Uma alternativa recentemente proposta é a adição de enrijecedores nas bordas das perfurações, a fim de que a placa que as contém seja enrijecida, e assim seja compensado o efeito da perda de seção decorrente da inserção das perfurações. No entanto, adoção desta técnica é recente e demanda estudos que comprovem sua eficiência e a aprimorem.

Figura 1 - Sistema de armazenagem.



Fonte: Cai e Moen (2016).

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar, de forma numérica, a influência dos enrijecedores presentes nas bordas dos furos de colunas de seção U enrijecido de Perfis Formados a Frio no valor característico da força axial de compressão

resistente, associado aos modos de flambagem local e distorcional (de forma isolada) em comparação com as colunas que possuem furos não enrijecidos e as colunas que não possuem qualquer tipo de furo. Também é estudada a distribuição de tensões nas colunas e o valor de deslocamento máximo. Avalia-se a influência do modo de flambagem, das propriedades mecânicas do aço, da configuração da perfuração, do diâmetro do furo e do comprimento do enrijecedor da borda do furo.

1.2 Justificativa

Os Perfis Formados a Frio possuem uma vasta gama de aplicações, sendo frequente a presença de perfurações nos elementos constituintes de sua seção transversal em diversas situações, como por exemplo: para compatibilização entre os vários projetos (instalações elétricas, hidráulicas, etc.) (Figura 1) e no encaixe das ligações de um sistema de armazenagem (Figura 2). Estudos apontam que os furos podem modificar o comportamento estrutural dos Perfis Formados a Frio, reduzindo sua capacidade resistente e induzindo os modos de instabilidade. Diante disso, surgiu uma nova geração de Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos (Figura 2). Apesar de poucos, os estudos apontam para uma melhora da capacidade de carga, sendo bastante relevante a compreensão e entendimento dos Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos. As normas ABNT NBR 14762:2010 (ABNT, 2010), AISI S100-16, 2016 (AISI, 2016) e AS/NZS 4600:2018 (AS/NZS, 2018) tratam dos Perfis Formados a Frio, porém nenhuma delas fornece uma orientação direta sobre colunas com furos enrijecidos nas bordas.

Figura 2 - Vigas de piso com furos enrijecidos na alma.



Fonte: Yu (2012).

1.3 Metodologia

Inicialmente as seções U enrijecido dos Perfis Formados a Frio selecionadas foram avaliadas por meio da Teoria Generalizada de Vigas para obter a carga crítica de flambagem e o respectivo comprimento de meia onda, e com isso verificar a ocorrência dos modos de flambagem local e distorcional de forma isolada.

Um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) implementado por meio do *software* ANSYS foi proposto e validado por comparação com resultados experimentais presentes na literatura.

A partir das seções selecionadas foi realizado um conjunto de 300 simulações com o modelo numérico validado, avaliando dois modos de flambagem: local e distorcional e três aços com tensões de escoamento diferentes: CF-30, ZAR 250 e ZAR 400. Foram avaliados perfis sem furo (SF), perfis com um furo não enrijecido (FNE) e perfis com um furo enrijecido (FE). Foram adotados três diâmetros para o furo e adotados dois comprimentos do enrijecedor da borda do furo. Posteriormente foram relatados e discutidos os resultados numéricos obtidos, avaliando a capacidade resistente, distribuição de tensões e deslocamentos máximos das seções estudadas.

1.4 Estrutura do Trabalho

A sequência deste trabalho se deu na seguinte ordem:

- No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica com os estudos sobre Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos e com furos não enrijecidos em que este trabalho se baseia.
- No capítulo 3 é apresentada toda a modelagem numérica e, a partir de resultados experimentais presentes na literatura, é realizada a validação do modelo numérico proposto neste trabalho.
- No capítulo 4 são apresentados os resultados numéricos obtidos: valor característico da força axial de compressão resistente, distribuição de tensões nas colunas e o valor máximo do deslocamento apresentado em cada seção estudada.
- No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os Perfis Formados a Frio (PFF) são perfis formados a partir da conformação ou dobramento de chapas, tiras, placas ou barras planas de aço, em geral de pequena espessura, e recebem este nome devido a este processo de fabricação, no qual o aço permanece em temperatura ambiente. As seções são conformadas a frio em máquinas perfiladeiras ou por prensa dobradeira ou operações de dobra. As espessuras das chapas ou tiras de aço geralmente utilizadas para membros estruturais de aço formados a frio variam de 0,373 mm a 6,35 mm (AISI, 2016).

Há algumas diferenças significativas entre os Perfis Formados a Frio e os tradicionais perfis laminados a quente que são importantes e devem ser destacadas. A norma norte-americana AISI S100-16 (AISI, 2016) menciona:

- ausência das tensões residuais causadas pelo resfriamento desigual devido à laminação a quente;
- presença de aumento da tensão de escoamento com diminuição do limite proporcionalidade e ductilidade resultante da conformação a frio;
- presença de tensões residuais oriundas do processo de conformação a frio;
- predomínio de elementos com grandes razões largura/espessura;
- cantos arredondados;
- características diferentes de diagramas tensão-deformação que podem ser do tipo com escoamento acentuado ou escoamento gradual.

Os Perfis Formados a Frio podem oferecer várias vantagens como material para construção civil (AISI, 2016): elementos leves podem ser fabricados para cargas relativamente leves e/ou vãos curtos; uma grande variedade de seções transversais pode ser produzida de forma econômica com uma favorável relação entre resistência e peso; painéis e plataformas de transporte de carga podem servir de superfícies para construção de piso, telhado e parede e, em alguns casos, também podem servir de células fechadas para conduítes elétricos e outros e painéis e plataformas que suportam não apenas cargas normais à suas superfícies, mas também podem atuar como diafragmas de cisalhamento para resistir às forças

em seus próprios planos, se estiverem adequadamente interconectados uns aos outros e aos membros de apoio.

Os Perfis Formados a Frio também apresentam como característica a simplicidade nos processos de fabricação, perfis mais leves que atendam a uma mesma solicitação, possuem grande variedade de seções transversais e, além disso, há a possibilidade de criação de seções que se adequem a situações específicas. A menor espessura dos elementos constituintes das seções dos Perfis Formados a Frio tem como principal vantagem tornar as seções mais leves, porém isto proporciona uma maior esbeltez às estruturas. Isso torna o perfil mais propenso a diferentes modos de instabilidade, o que requer uma atenção especial.

2.1 Processos de fabricação

Independente dos diferentes processos de fabricação dos Perfis Formados a Frio, eles tendem a ser mais simples do que os de outros grupos de perfis. Os Perfis Formados a Frio podem ser produzidos de duas formas: a partir de conformação contínua em conjuntos de matrizes rotativas ou por dobramento em mesa dobradeira. O primeiro modo de produção é um processo industrializado em que as chapas são passadas por uma sequência de cilindros, onde cada um realiza uma dobra de um elemento da seção. O segundo modo de produção se resume a pressionar as tiras cortadas de chapas ou bobinas em uma mesa através de punção. Este processo se repete para cada vértice da seção até assumir a forma final desejada.

Os diferentes modos de produção conferem aos Perfis Formados a Frio algumas particularidades em diversos aspectos, sejam eles construtivos ou no comportamento estrutural. Isto é importante, tanto no papel de fornecedor como no papel de consumidor, pois cada produto pode ter vantagens ou desvantagens, como por exemplo, a necessidade de uma viga de grande vão, o custo de equipamento ou necessidade de diferentes seções transversais para uma obra de grande porte. Nesse sentido, Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014) apresentam um comparativo entre os perfis produzidos a partir de dobramento em mesa dobradeira e conformação contínua em matrizes rotativas, conforme segue no Quadro 1.

Quadro 1.

Prensa-dobradeira	Perfiladeira
Muita flexibilidade para produzir diversas formas de perfis;	Pouca flexibilidade para produzir diversas formas de perfis;
Com poucas ferramentas se produz uma série grande de perfiz;	Cada tipo de perfil necessita de um trem de perfilação;
Baixo custo de equipamento;	Alto custo do equipamento;
Regulagem simples do equipamento;	Regulagem do equipamento requer cuidados;
Tensões residuais menores;	Tensões residuais maiores que na dobradeira;
Produção pequena;	Produção grande;
Perfis curtos (máx. 6 m);	Perfis com comprimento ilimitado;
Razoável mão de obra envolvida;	Pouca mão de obra envolvida.

Fonte: Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014).

2.2 Aplicações

Os Perfis Formados a Frio são amplamente utilizados nos mais variados tipos de estruturas metálicas, o que torna muito relevante seu estudo e entendimento. Conforme Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014) listaram, é possível encontrar o emprego nas seguintes áreas:

- Indústria automobilística: carros, caminhões leves e ônibus;
- Indústria aeronáutica: estrutura dos aviões;
- Transportes pesados: carretas rodoviárias, construção naval e carroceria de vagões;
- Agroindústria: máquinas e implementos agrícolas e silos;
- Sistemas de armazenagem e estocagem (SOUZA, 2005; SOUZA, 2013; SALES, 2017; JARDIM JR., 2018): prateleiras, *racks* e mezaninos;
- Construção civil: prédios residenciais, comerciais e industriais, painéis de fechamento, estruturas de pontes, reservatórios.

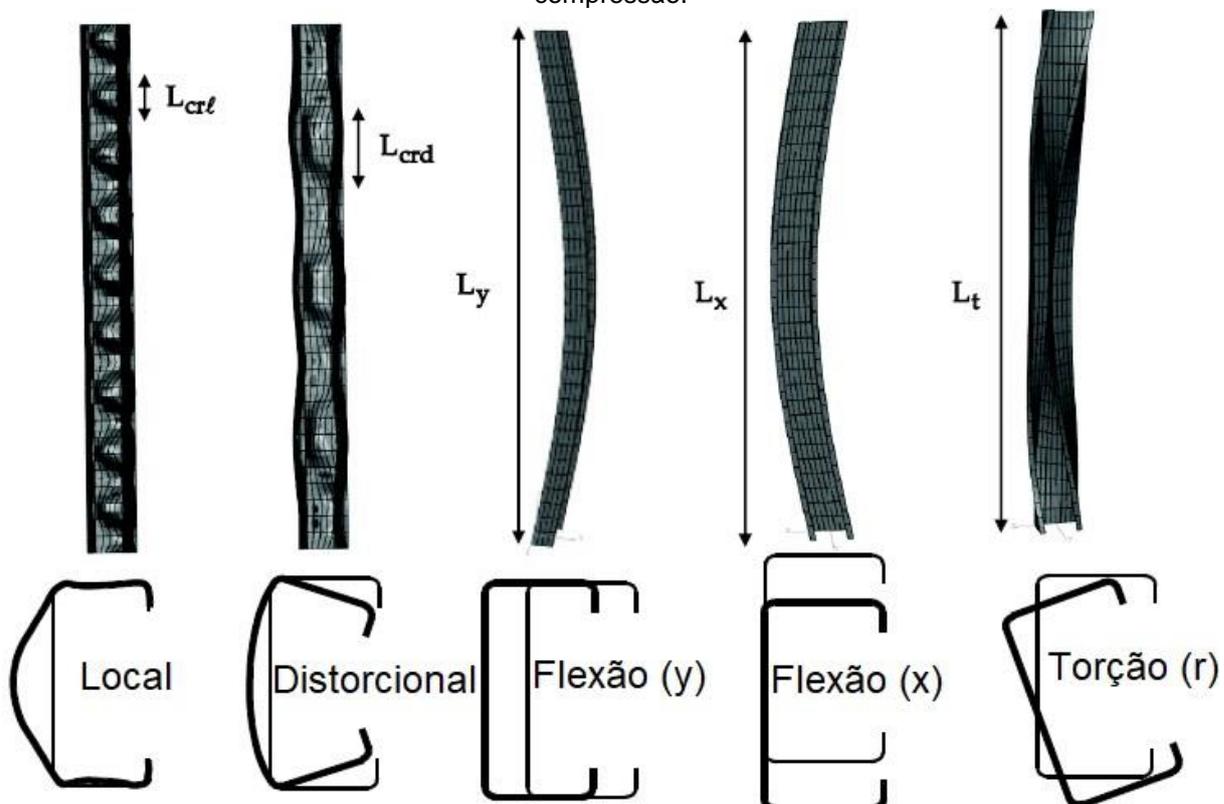
2.3 Comportamento estrutural

Os Perfis Formados a Frio possuem algumas particularidades no que diz respeito ao seu comportamento estrutural. Isto se deve principalmente à menor espessura das chapas formadoras dos elementos de sua seção transversal. Como consequência, isto confere uma maior esbeltez de seus elementos e, portanto, um maior potencial para problemas de instabilidade, que é um estado limite atingido no

carregamento de um componente estrutural, quadro ou estrutura, no qual uma leve perturbação nas cargas ou geometria produz grandes deslocamentos (AISI, 2016).

Sendo assim, é bastante comum a ocorrência de flambagem nos Perfis Formados a Frio, podendo ocorrer de forma isolada: global, local ou distorcional, bem como de forma interativa entre eles: global-local, global-distorcional, local-distorcional ou global-local-distorcional.(SOUZA, 2013) A flambagem pode ser definida como o estado limite de mudança repentina da geometria de uma estrutura ou qualquer um de seus elementos, sob uma condição de carregamento crítica. A flambagem elástica ocorre com uma carga em que o equilíbrio do membro (aproximado com material elástico linear) é neutro entre dois estados alternativos: o flambado e o reto. (AISI, 2016). É de fundamental importância a compreensão destes fenômenos de instabilidades. Neste trabalho o foco serão as barras de Perfis Formados a Frio submetidas à compressão centrada sujeitas a flambagem distorcional e local, de forma isolada. Os modos fundamentais de flambagem elástica em uma seção U enrijecido em compressão são ilustrados na Figura 3.

Figura 3 - Ilustração dos modos fundamentais de flambagem elástica em uma seção U enrijecido em compressão.



Fonte: Adaptado de AISI (2016).

2.3.1 Flambagem global

A flambagem global, também conhecida como flambagem de Euler, define a flambagem do membro completo em comprimentos de meia onda longos, incluindo efeitos de flexão e flexão-torção (e efeitos de torção lateral em vigas). As colunas carregadas concentricamente podem flambar no modo de flambagem por flexão, por torção; ou ainda por flexo-torção (Figura 3). A flambagem por flexão é o modo de flambagem em que um membro de compressão deflete lateralmente sem torção ou mudança na forma da seção transversal (AISI, 2016). A flambagem por flexo-torção é o modo de flambagem no qual um membro comprimido se flexiona e torce simultaneamente, sem alterar a forma da seção transversal (AISI, 2016). A flambagem lateral por torção é o modo de flambagem de um membro de flexão envolvendo a deflexão fora do plano de flexão ocorrendo simultaneamente com a torção em torno do centro de cisalhamento (corte) da seção transversal (AISI, 2016).

2.3.2 Flambagem local

A flambagem local (Figura 3) é o estado limite de flambagem de um membro comprimido, onde as linhas de junção entre os elementos permanecem retas e os ângulos entre os elementos não se alteram (AISI, 2016). A flambagem local ocorre como flambagem de placa dos elementos esbeltos individuais em uma seção transversal.

1.3.3 Flambagem distorcional

Pode ser definido como um modo de flambagem que envolve mudança na forma da seção transversal, excluindo a flambagem local (AISI, 2016). A flambagem distorcional (Figura 3) existe apenas para seções transversais abertas, em que os flanges comprimidos flambam para dentro ou para fora ao longo do comprimento de um membro.

O comprimento de meia onda de flambagem na flambagem distorcional é consideravelmente mais longo do que a da flambagem local e mais curto do que na da flambagem por flexão ou flexo-torção (AISI, 2016).

A flambagem distorcional tem a capacidade de controlar o mecanismo de ruptura final e, além disso, tem uma menor reserva de resistência pós-flambagem em relação à flambagem local (SCHAFER, 2019) e uma maior sensibilidade às

imperfeições, portanto é necessária uma atenção especial para este modo de flambagem (KULATUNGA *et al.*, 2014).

2.4 Normas e especificações

O dimensionamento em Perfis Formados a Frio é regido pelas seguintes normas.

- ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio (ABNT, 2010);
- ABNT NBR 6355:2012 - Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização (ABNT, 2012);
- AISI S100-16 – *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* (AISI, 2016);
- AS/NZS 4600:2018 – *Australian/New Zealand Standard Cold-Formed Steel Structures*;
- BS EN 1993-1-3:2006 - *Eurocode 3. Design of steel structures. General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*.

Neste trabalho, sempre que possível, será adotada a terminologia adotada na norma ABNT NBR 14762:2010 (ABNT, 2010), porém verificou-se que esta ainda não fornece orientações para verificação de Perfis Formados a Frio com perfurações, que é um dos objetos do presente trabalho. Diante disso, foi realizada uma busca por normas que contemplem esta demanda. Portanto, também serão adotadas algumas prescrições da norma AISI (2016). Esta foi revisada e atualizada em 2004, 2007, 2010, 2012 e 2016 à medida em que novas tecnologias foram adotadas. Além disso, fornece prescrições para a verificação de barras submetidas à compressão considerando a influência de perfurações, podendo esta serem discretas ou padronizadas ao longo do perfil.

2.5 Métodos de dimensionamento e verificação

O dimensionamento de barras de Perfis Formados a Frio é feito considerando os seguintes métodos:

- Método da Largura Efetiva (MLE);
- Método da Seção Efetiva (MSE);
- Método da Resistência Direta (MRD).

Também é importante ressaltar os diferentes métodos numéricos que auxiliam na análise estrutural dos Perfis Formados a frio, como por exemplo:

- Teoria Generalizada de Vigas (GBT);
- Método das Faixas Finitas (MFF);
- Método dos Elementos Finitos (MEF).

Neste trabalho serão utilizados a Teoria Generalizada de Vigas (GBT) e o Método dos Elementos Finitos (MEF).

2.5.1 Método da Largura Efetiva (MLE) e Método da Seção Efetiva (MSE)

O Método da Largura Efetiva (MLE) é um método que considera a flambagem local de elementos de aço formados a frio, reduzindo a seção transversal bruta sob uma distribuição de tensão não linear para uma seção transversal efetiva sob uma distribuição de tensão linear simplificada (AISI, 2016).

O Método da Largura Efetiva (WINTER, 1947) se baseia no conceito de Largura Efetiva de uma placa, proposto por von Kármán (1932), considerando propriedades geométricas efetivas (reduzidas) dos elementos constituintes da seção transversal do perfil. Este conceito se baseia no fato de que quando uma placa de bordas enrijecidas, que está sob tensões uniformes, ultrapassa a tensão crítica de flambagem local, ocorre uma redistribuição não uniforme de tensão. Isso é caracterizado pelo progressivo aumento de tensões nas bordas apoiadas da placa e uma redução de tensões na parte central da placa. O colapso ocorre somente quando a tensão nas bordas da placa atinge a tensão de escoamento. A diferença entre a carga última da placa e a carga crítica de flambagem local é conhecida como reserva de resistência pós-flambagem. Para a determinação da capacidade de carga do perfil como um todo é necessário calcular as propriedades geométricas efetivas (reduzidas) de cada elemento isolado como se fosse uma placa, levando em consideração sua condição de contorno. O Método da Seção Efetiva (BATISTA, 2009) também considera as propriedades geométricas efetivas (reduzidas) dos elementos constituintes da seção transversal do perfil.

2.5.2 Método da Resistência Direta (MRD)

Apesar da fundamentação teórica bem elaborada do Método da Largura Efetiva, este método possui algumas desvantagens, como uma grande quantidade de cálculos, tornando trabalhosa a determinação da capacidade de carga e a impossibilidade de incluir no cálculo o modo de flambagem distorcional, em seções com flanges enrijecidos, como: U enrijecido, Z enrijecido e seções *Rack*.

O Método da Resistência Direta (MRD) pode ser visto como um método de projeto que fornece previsões da resistência da barra sem o uso de larguras efetivas (AISI, 2016). O Método da Resistência Direta foi introduzido em 2004 na norma norte-americana AISI S100-16 como um método de projeto alternativo, e está previsto na norma ABNT NBR 14762:2010 (ABNT, 2010), em seu apêndice C.

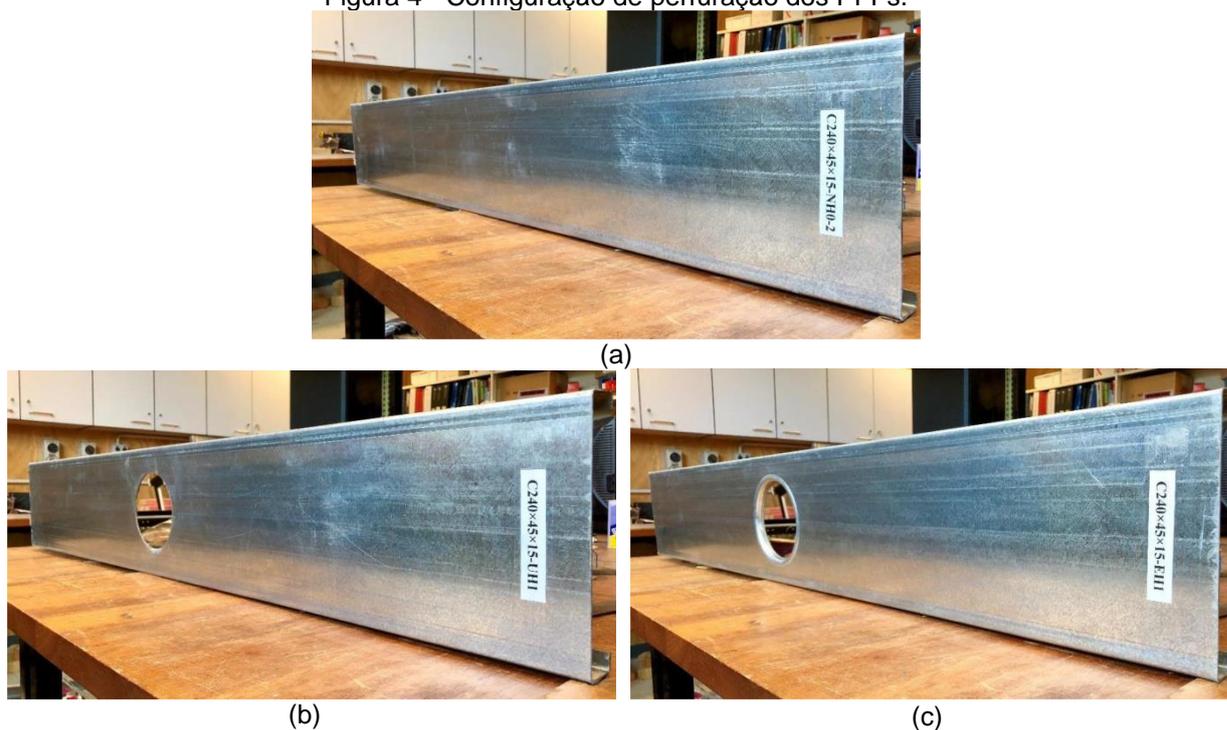
Schafer (2019) menciona que na norma AISI S100 (2016) todas as expressões do Método da Resistência Direta foram movidas do Apêndice e integradas ao corpo da norma. Ao mesmo tempo todas as expressões de flambagem elásticas foram movidas do corpo principal da norma para o Apêndice 2. Este apêndice da norma AISI S100 (2016) fornece orientação significativa sobre o cálculo da flambagem elástica local, distorcional e global por métodos analíticos e numéricos.

Schafer (2019) descreve os avanços no Método da Resistência Direta (MRD) ao longo de 20 anos, ressaltando que a amplitude de pesquisas relacionadas ao método cresceram substancialmente nos últimos 10 anos e, e ele vem, paulatinamente, substituindo o Método da Largura Efetiva.

2.6 Perfis com furos não enrijecidos e perfis com furos enrijecidos

Os furos em Perfis Formados a Frio são utilizados para o encaixe das ligações entre as barras de um sistema de armazenamento ou na alma de vigas visando à compatibilização de projetos, por exemplo, entre os vários tipos de instalações prediais. Na Figura 4 é possível visualizar os Perfis Formados a Frio com as três configurações de perfuração utilizadas neste trabalho: (a) sem furo (SF), (b) com furo de borda não enrijecida (FNE) e (c) com furo de borda enrijecida (FE).

Figura 4 - Configuração de perfuração dos PFFs.



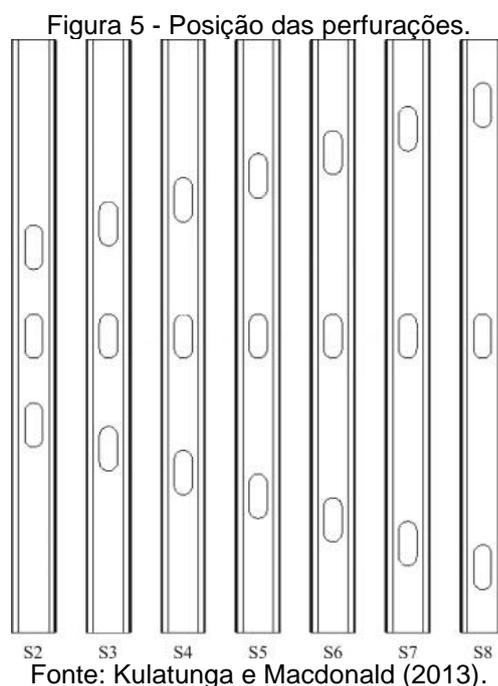
Fonte: Chen *et al.* (2020a).

Apesar dos furos serem necessários, sua presença pode modificar o comportamento estrutural destes perfis, podendo diminuir sua capacidade resistente, ou induzir os modos de instabilidade.

Diversos estudos foram realizados com intuito de compreender a influência das perfurações nos Perfis Formados a Frio. Dentre os principais encontram-se os estudos realizados por Moen e Schafer (2009) e Moen e Schafer (2011). O desenvolvimento e calibração das disposições do Método de Resistência Direta para colunas com furos foram realizados com bancos de dados experimentais e de simulação numérica, sendo que ambos os bancos de dados contêm apenas seções transversais U enrijecido com furos discretos na alma, pois isso era o que estava disponível na literatura de pesquisa na época (AISI, 2016). No entanto, a filosofia de empregar parâmetros de flambagem elástica (cargas crítica associadas aos modos global, local e distorcional) para prever a resistência final de colunas de Perfis Formados a Frio com furos foi completamente validada em Moen e Schafer (2009), e é considerada verdadeira para outras formas de seção transversal e para barras com furos com bordas enrijecidas (AISI, 2016).

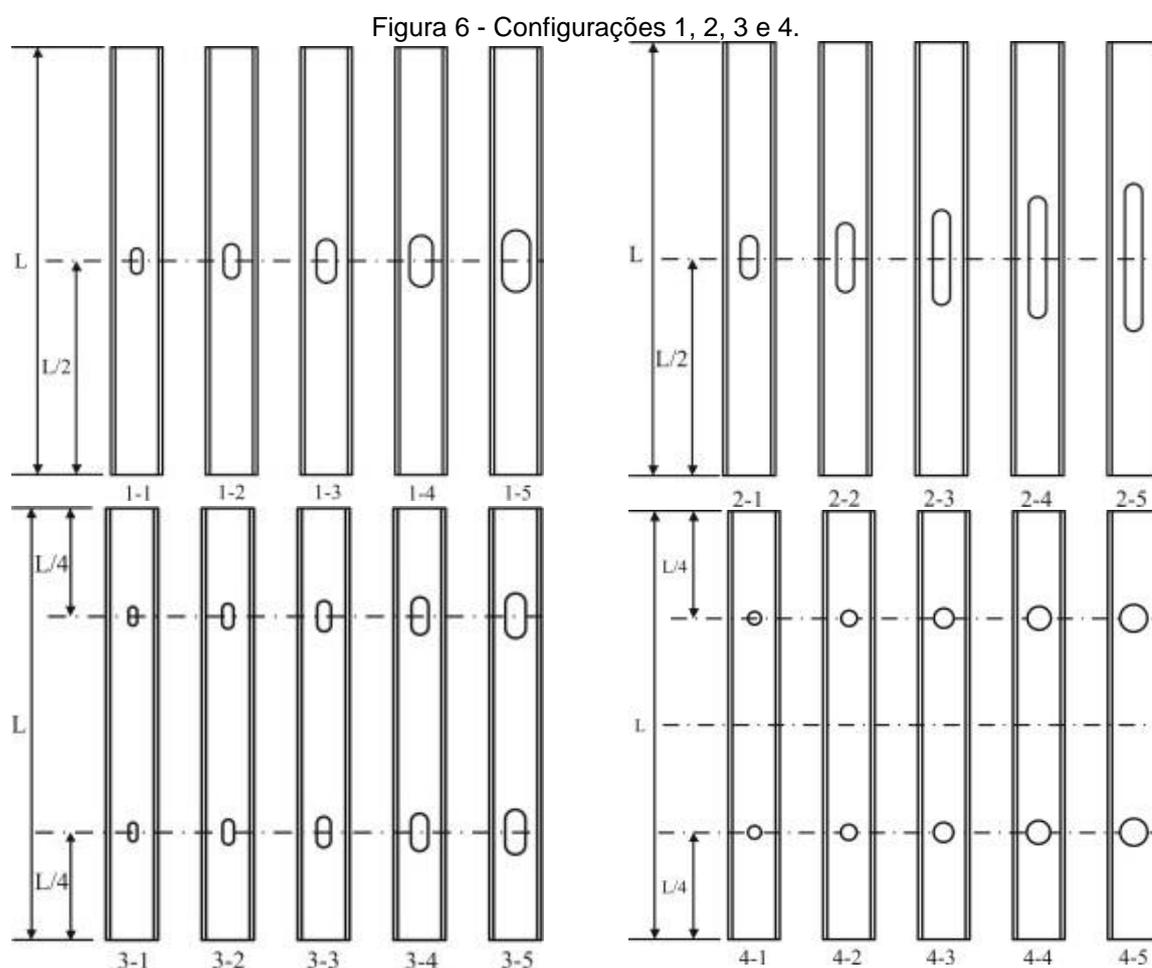
Kulatunga e Macdonald (2013) realizaram um estudo com Perfis Formados a Frio comparando resultados normativos, numéricos e experimentais. Os

resultados numéricos foram obtidos por meio de simulações numéricas realizadas por meio do *software* ANSYS e os resultados normativos foram obtidos de acordo com as prescrições das normas: *British Standards* - BS 5950 parte 5:1998 e *European Recommendations* - Eurocode 3: Parte 1.3. Os perfis U enrijecido sem perfurações e com perfurações ao longo da alma foram submetidos à compressão, variando apenas a posição do furo conforme mostra a Figura 5. Ao comparar os resultados experimentais e numéricos foi possível validar o modelo numérico, este sendo capaz de prever o comportamento tanto dos perfis com perfurações como os que não possuíam perfurações e, ambos ainda foram capazes de detectar a queda na capacidade resistente dos perfis com perfurações. Além disso, os resultados experimentais e numéricos mostraram que no caso de seções transversais esbeltas, que são substancialmente afetadas pela flambagem local, a incorporação de perfurações nas regiões próximas às extremidades tem um efeito de enfraquecimento maior do que as mesmas perfurações em outros locais.



Kulatunga *et al.* (2014) realizaram um estudo avaliando a influência de perfurações de diferentes formas em colunas de seção U enrijecido de Perfis Formados a Frio. Para o estudo foram obtidos resultados experimentais, numéricos e normativos da capacidade de carga dos perfis. Com os resultados experimentais foi possível validar o modelo numérico realizado no *software* ANSYS e avaliar as

previsões das normas: AISI S100-2012, *British Standards* - BS 5950 parte 5:1998 e *European Recommendations* - Eurocode 3: Parte 1.3. Neste estudo a amostragem teve a mesma seção transversal e mesmo comprimento do perfil, variando apenas a configuração das perfurações conforme pode ser visto na Figura 6. Para as Configurações 1 e 2 os furos com diferentes áreas foram inseridos à meia altura da coluna, para as Configurações 3 e 4 os furos com diferentes tamanhos e formatos foram inseridos à distância de um quarto da extremidade da barra. A capacidade de carga para a Configuração 1 apresentou uma diminuição de 13,55% com o aumento da perfuração, Configuração 2 também, em geral, apresentou uma queda na resistência máxima com o aumento do tamanho das perfurações, a Configuração 3 apresentou uma queda da carga final de 20,7% devido ao aumento da área de perfuração. Os resultados da carga máxima nas Configurações 3 e 4 mostraram que a redução da rigidez associada às seções com perfurações circulares foi maior do que para as perfurações alongadas com a mesma área da seção transversal.



Fonte: Kulatunga *et al.* (2014).

Sales (2017) realizou um estudo avaliando o uso do Método da Resistência Direta em Perfis Formados a Frio de seções *rack*, com e sem perfurações, submetidos à compressão centrada. O valor característico da força axial de compressão resistente associada ao modo distorcional das colunas foi determinado de forma analítica por meio do Método da Resistência Direta, prescrito na ABNT NBR 14762:2010 (ABNT, 2010) para colunas sem perfurações, e de forma numérica por meio do Método dos Elementos Finitos utilizando o *software* ANSYS. O Método da Resistência Direta necessita, como dado de entrada, da força axial de flambagem distorcional elástica. Para isto o autor utilizou o *software* GBTul baseado na Teoria Generalizada de Vigas. Inicialmente, os resultados analíticos e numéricos das colunas sem perfurações foram comparados entre si, através de relações entre os mesmos, com o objetivo de avaliar e verificar o modelo numérico. O modelo numérico implementado através do *software* ANSYS se baseou em procedimentos utilizados em estudo anterior (SOUZA, 2013). Os comprimentos dos modelos numéricos sem furos foram obtidos da análise por meio do GBTul, adotando o comprimento em que ocorreu a força axial de flambagem distorcional elástica crítica. O elemento de casca *Shell* 181 foi utilizado no perfil e o *Solid* 45 foi utilizado nas placas de extremidade. A dimensão da malha foi de 10% da largura da alma. Os furos adotados, presentes nas almas das colunas, tinham comprimento e largura iguais a 40% e 10% da largura da alma, respectivamente. O espaço adotado entre os furos foi igual a 40% da largura da alma. A coluna foi considerada simplesmente apoiada com restrições translacionais nas duas direções ortogonais ao eixo da coluna nas extremidades e uma restrição de translação na direção do eixo da coluna localizado à meia altura na alma. Os graus de liberdade dos nós extremos coincidentes entre a extremidade do perfil e as placas de extremidades foram acoplados. O carregamento foi aplicado por meio de placas de extremidade. Os aços utilizados tinham um módulo de elasticidade de 200 GPa e dois aços com tensão de escoamento de 400 MPa e 220 MPa.

No estudo de Sales (2017), os valores médios da razão entre os resultados analíticos e numéricos das colunas sem perfurações foram: 1,119 e 1,202 com desvio padrão: 0,067 e 0,071 para as tensões de escoamento de 400 MPa e 220 MPa, respectivamente, sendo considerados viáveis. Com o modelo de elemento finito verificado, a análise prosseguiu com as colunas com perfurações. Os resultados numéricos foram comparados com os resultados analíticos por meio

Método da Resistência Direta para colunas com perfurações. Foram adotadas as prescrições de Moen e Schafer (2009) para colunas com perfurações denominadas: MOEN 2 e MOEN 4. Sales (2017) observou que MOEN 2 levou a uma melhor correlação com os resultados numéricos obtidos do modelo verificado e propôs, a partir de uma modificação de MOEN 2, um método alternativo por meio da alteração no cálculo da espessura fictícia da alma com perfurações. Ao fim, com os resultados do método alternativo proposto, Sales (2017) observou que este levou a resultados com melhor correlação do que MOEN 2 e MOEN 4 com os valores médios da razão entre os resultados analíticos do método alternativo proposto e numéricos das colunas com perfurações de: 1,019 e 1,093 e desvio padrão: 0,090 e 0,079 para as tensões de escoamento de 400 MPa e 220 MPa, respectivamente.

Jardim Jr. (2018) realizou um estudo numérico para avaliar a viabilidade do Método da Resistência Direta em Perfis Formados a Frio com seção U enrijecido com e sem perfurações. Inicialmente, com os perfis sem perfurações, determinou-se o valor característico da força axial de compressão resistente associada ao modo distorcional através do Método da Resistência Direta. Para determinação da força axial de flambagem distorcional elástica o autor utilizou o *software* GBTul baseado na Teoria Generalizada de Vigas. O modelo numérico implementado por meio do *software* ANSYS se baseou em procedimentos utilizados em estudos anteriores (SOUZA, 2013 e SALES, 2017). Os comprimentos críticos associados à flambagem distorcional foram obtidos pela análise de autovalor no *software* GBTul e adotados nos modelos numéricos. O elemento de casca *Shell* 181 foi utilizado nas paredes do perfil. A dimensão da malha foi de 10% da largura da alma. Os furos adotados, presentes nas almas das colunas, tinham comprimento e largura iguais a 40% e 10% da largura da alma, respectivamente. O espaço adotado entre os furos foi igual a 40% da largura da alma. As condições de contorno das colunas foram adotadas de forma a simular as extremidades rotuladas. Todos os nós das extremidades da coluna foram restringidos aos deslocamentos no plano ortogonal ao eixo da coluna e a rotação em relação eixo longitudinal, este último com o objetivo de simular o vínculo de “garfo” adotado no *software* GBTul. Para impedir o deslocamento de corpo rígido na direção longitudinal da coluna, um nó à meia altura nesta direção teve sua translação restringida. O carregamento foi aplicado de forma distribuída ao longo das arestas das extremidades das colunas. Os aços utilizados tinham um

módulo de elasticidade de 200 GPa e dois aços com tensão de escoamento de 400 MPa e 220 MPa.

No estudo de Jardim Jr. (2018), os valores médios dos resultados analíticos, determinados por meio do Método da Resistência Direta, foram 14,06% e 16,86% maiores, para tensão de escoamento igual a 400 MPa e 220 MPa respectivamente, do que os resultados numéricos, determinados por meio do Método dos Elementos Finitos, para colunas sem perfurações. O autor observou boa correlação entre os resultados, indicando a viabilidade do método. Com o modelo de elemento finito verificado, a análise prosseguiu com as colunas com perfurações. Os resultados analíticos dos Perfis Formados a Frio com perfurações foram obtidos através das prescrições de Moen e Schafer (2009): MOEN 2 e MOEN 4, e Sales (2017), sendo que esta última apresentou melhores resultados, tendo uma dispersão entre seus resultados e os resultados numéricos de 9,00% e 11,49% para aços com a tensão de escoamento de 400 MPa e 220 MPa, respectivamente. Posteriormente Jardim Jr. (2018) propõe uma modificação do método de Sales (2017), denominado ALTERNATIVO, considerando que a perda de resistência de um perfil com perfurações é proporcional a relação entre a área líquida e a área bruta do mesmo. O método proposto por Jardim Jr. (2018) apresentou resultados mais próximos da análise numérica do que MOEN 2, MOEN 4 e Sales (2017), com uma dispersão entre eles seus valores de 4,69% e 6,42% para aços com a tensão de escoamento de 400 MPa e 220 MPa, respectivamente, indicando a viabilidade do método.

Souza, Santos e Sarmanho (2020) realizaram um estudo avaliando o comportamento estrutural de Perfis Formados a Frio de seção do tipo *rack* submetidos à compressão centrada. Neste estudo, foi apresentada uma extensão das análises de Sales (2017) e Jardim Jr. (2018) considerando perfis sem furos e com furos de tamanhos variados em função da largura da alma (20%, 40%, 60% e 80% da largura da alma). Para previsão da capacidade de carga foram adotados o Método da Resistência Direta, para determinação dos resultados analíticos, e o Método dos Elementos Finitos, por meio do *software* ANSYS, para determinação dos resultados numéricos. Para determinação da carga crítica de flambagem associada ao modo distorcional necessária para o Método da Resistência Direta foi utilizado o *software* GBTul.

Nos comentários da norma AISI S100-16 (AISII, 2016) são mencionadas algumas regras gerais sobre a influência dos furos nas barras comprimidas e fletidas:

- furos retangulares ou alongados normalmente reduzem a resistência à flambagem local mais do que furos quadrados e circulares;
- os furos da alma sempre diminuem a resistência à flambagem distorcional;
- os furos sempre reduzem a resistência à flambagem global (Euler);
- quanto mais furos ao longo de um membro, menor sua resistência;
- furos padronizados, como aqueles normalmente presentes em colunas de seção rack de sistemas de armazenamento (ver Figura 1), podem reduzir a resistência tanto quanto furos discretos;
- a adição de enrijecedores nas bordas dos furos (ver Figura 2 e Figura 4) aumenta a resistência à flambagem local mais do que a resistência à flambagem distorcional e à flambagem global.

De acordo com Yu (2012), os furos tradicionais presentes nos Perfis Formados a Frio são não enrijecidos (Figura 4) e os tamanhos dos furos e a distância entre os mesmos são muito restritos devido ao enfraquecimento da resistência à flexão. Com o objetivo de superar essas restrições, uma nova geração de perfis com furos na alma foi desenvolvida pela indústria (Figura 2 e Figura 4).

Chen *et al.* (2019) mencionam que uma nova geração de Perfis Formados a Frio de seção U enrijecido com aberturas circulares com bordas enrijecidas na alma, desenvolvido por Howick Ltda. (HOWICK, 2020), são amplamente utilizados na Nova Zelândia. A Figura 2 e a Figura 4 apresentam um perfil com esta configuração. Além disso, Chen *et al.* (2019) destacam que no momento da realização da pesquisa as orientações de projeto (*i.e.* normas como: AISI S100-16 e AS/NZS 4600:2018) não incluem uma orientação direta para Perfis Formados a Frio de seção U com aberturas enrijecidas na alma submetidos a compressão.

Yu (2012) menciona que os enrijecedores nas bordas dos furos presentes na alma dos Perfis Formados a Frio alteram as condições de contorno do elemento da alma assim como a distribuição de tensões resultante. Assim, o comportamento elástico e de pós-flambagem serão, potencialmente, alterados também.

Grey e Moen (2011) apresentam um conjunto de métodos de previsão para aproximar as propriedades de flambagem elástica de colunas e vigas de Perfis

Formadas a Frio com furos enrijecidos. Os autores afirmam que os métodos simplificados de previsão de flambagem elástica, recentemente desenvolvidos para barras de Perfis Formados a Frio de paredes finas com furos, também são viáveis para membros com furos enrijecidos nas bordas. As cargas de flambagem globais (momentos) de colunas e vigas de seção U enrijecido com furos de bordas enrijecidas foram previstas com precisão ao inserir uma média ponderada das propriedades de seção transversal nas expressões de engenharia classicamente derivadas para flambagem por flexão e torção. Para flambagem local, os métodos simplificados baseados em faixas finitas, incluindo uma análise de flambagem local da seção transversal líquida, previram com precisão que os enrijecedores minimizaram a flambagem em um furo, causando a formação de meias ondas de flambagem entre os furos. Uma equação de espessura efetiva da alma foi derivada e validada para flambagem distorcional de perfis de seção U com furos de bordas enrijecidas. Uma análise de faixas finitas pode ser realizada para simular a remoção do material da alma e o aumento na restrição rotacional do flange fornecido pelos enrijecedores nas bordas dos furos na alma ao longo de uma meia onda de flambagem distorcional. Segundo Grey e Moen (2011), a presença de furos não enrijecidos em membros de seção aberta interrompe a restrição rotacional da alma no flange, reduzindo a carga crítica de flambagem elástica distorcional.

Yu (2012) realizou um estudo baseado no Método dos Elementos Finitos para avaliar a capacidade de carga de Perfis Formados a Frio de seção U enrijecido e placas com furos enrijecidos. Também estabeleceu recomendações de perfis otimizados e desenvolveu equações da resistência de projeto a flexão da nova geração de seções U com furos circulares enrijecidos otimizados. A análise de flambagem elástica de placas de aço formados a frio e seções U enrijecido de Perfis Formados a Frio submetidos à flexão com furos enrijecidos são analisados pelo Método dos Elementos Finitos por meio do *software* ABAQUS. Os resultados mostraram que os furos enrijecidos podem aumentar a carga crítica deste material. Um estudo paramétrico foi realizado para obter dimensões otimizadas dos furos dos perfis e o comportamento pós-flambagem. Os resultados indicaram que um aumento médio de 12,9% na resistência à flexão pôde ser alcançado através da introdução de furos enrijecidos otimizados na alma das vigas. Além disso, foi desenvolvido um método de projeto baseado no Método da Resistência Direta para Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos otimizados submetidos à flexão. Este novo método

apresentou boa concordância com o modelo baseado no Método dos Elementos Finitos e o mesmo nível de confiabilidade do Método da Resistência Direta.

Uzzaman *et al.* (2017) realizaram um estudo experimental e numérico por meio do Método dos Elementos Finitos para avaliar a influência de furos enrijecidos, presentes na alma dos Perfis Formados a Frio de seção U enrijecido, na resistência ao enrugamento da alma. Foram verificados perfis sem furos e com furos enrijecidos e não enrijecidos para duas condições de carregamento, forças internas e forças de extremidades, totalizando 36 amostras. No programa experimental foram adotadas seções nomeadas C240 e C290 com 240 mm e 290 mm de altura respectivamente. Todos os furos tinham diâmetro nominal (**a**) de 140 mm e o comprimento do enrijecedor (**q**) de 13mm. O raio entre a alma e o enrijecedor (**r**) foi de 3 mm. Os corpos-de-prova foram compostos por dois tamanhos de seção, com espessura nominal (**t**) variando de 2,0 mm a 2,5 mm; a altura nominal das almas (**d**) variou de 240 mm a 290 mm; a largura nominal dos flanges (**b_f**) para ambos os tamanhos foi de 45 mm. Os comprimentos dos corpos-de-prova (**L**) usados estavam de acordo com a especificação norte-americana e a especificação do AISI. As placas de apoio foram fabricadas com aço de alta resistência, tendo espessura de 25 mm. Três larguras (N) foram adotadas para as placas de base: 50 mm, 75 mm e 100 mm. Neste estudo foi utilizado o *software* ABAQUS para simular a seção U enrijecido com furos e sem furos. O valor do módulo de *Young* foi 205 MPa e o coeficiente de *Poisson* foi 0,3. Uma análise de sensibilidade da malha foi usada para investigar o efeito de diferentes tamanhos dos elementos na seção transversal de seções U. Com o intuito de validar o modelo de elemento finito, as cargas de ruptura experimentais foram comparadas com as cargas de ruptura prevista pela análise de elemento finito. O objetivo desta comparação foi verificar a precisão do modelo de elemento finito. Foi observado que houve uma boa concordância entre ambos os resultados obtidos para todas as amostras. Para as duas condições de carregamento adotadas neste estudo o valor médio da razão entre resultados experimentais e numéricos foi 0,99 e 0,98, com um coeficiente de variação de 0,02 e 0,01. Com isso foi apresentada uma boa concordância entre os resultados experimentais e dos resultados por meio do Método dos Elementos Finitos tanto para resistência ao enrugamento da alma quanto para o modo de ruptura. O modelo de elemento finito que incorporou a não linearidade física e geométrica, as quais foram desenvolvidas e verificadas com resultados experimentais. Com o modelo

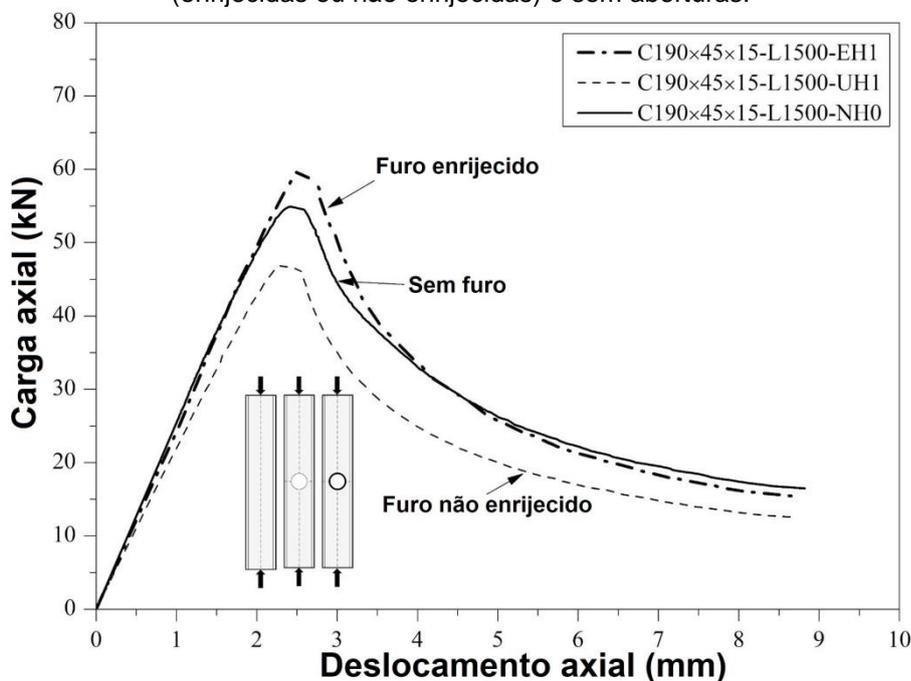
numérico válido, um estudo paramétrico com um total de 60 amostras foi realizado para avaliar os efeitos do tamanho dos furos na alma, localização dos furos e comprimento do enrijecedor das bordas dos furos na resistência ao enrugamento da alma de seções U enrijecido. A previsão da resistência de enrugamento da alma foi influenciada, primariamente, pela relação entre o diâmetro do furo e largura plana da alma (a/h), pela localização do furo definida com a relação entre a distância da extremidade da placa até o furo e a largura plana da alma (x/h) e pela relação entre o comprimento do enrijecedor do furo e a largura plana da alma (q/h). As taxas do diâmetro do furo pela largura da parte plana da alma (a/h) foram: 0,4; 0,6 e 0,8. As taxas da distância dos furos pela largura da parte plana da alma (x/h) foram 0,2; 0,4 e 0,6. As taxas do comprimento do enrijecedor pela largura da parte plana da alma (q/h) foram 0,04; 0,06 e 0,08. Os resultados mostram que os furos circulares com bordas enrijecidas podem melhorar significativamente a resistência do enrugamento da alma de seções U enrijecido de Perfis Formados a Frio.

Chen *et al.* (2019) realizaram um estudo experimental e numérico na resistência a compressão de Perfis Formados a Frio de seção U enrijecido com aberturas circulares enrijecidas na alma. Os efeitos do comprimento das colunas e o espaçamento das aberturas foram considerados na investigação experimental. As propriedades do material foram determinadas a partir de ensaios de tração e as imperfeições iniciais foram medidas usando um *scanner* a laser. Foram relatados os resultados de deslocamento axial e lateral, relação de tensão-deformação e modos de ruptura. O *software* ABAQUS foi utilizado para desenvolver um modelo de elemento finito elasto-plástico não linear, o qual incluiu imperfeições iniciais. O modelo numérico foi validado com os resultados experimentais e utilizado em um estudo paramétrico para avaliar os efeitos do comprimento da coluna e do espaçamento das aberturas na resistência à compressão. Um total de 75 resultados compreendendo 26 testes e 49 resultados de análise de elementos finitos foi relatado. O valor médio da razão entre resultados experimentais e numéricos foi 0,99 com o coeficiente de variação correspondente de 0,02.

No estudo de Chen *et al.* (2019) os resultados experimentais apresentados na Figura 7 mostraram que, para seções U enrijecido de Perfis Formados a Frio de mesmo comprimento, a resistência a compressão dos perfis com furos de bordas enrijecidas na alma foi maior do que para seções U sem furos e

estes, por sua vez, tiveram a resistência a compressão maior do que os perfis com furos não enrijecidos.

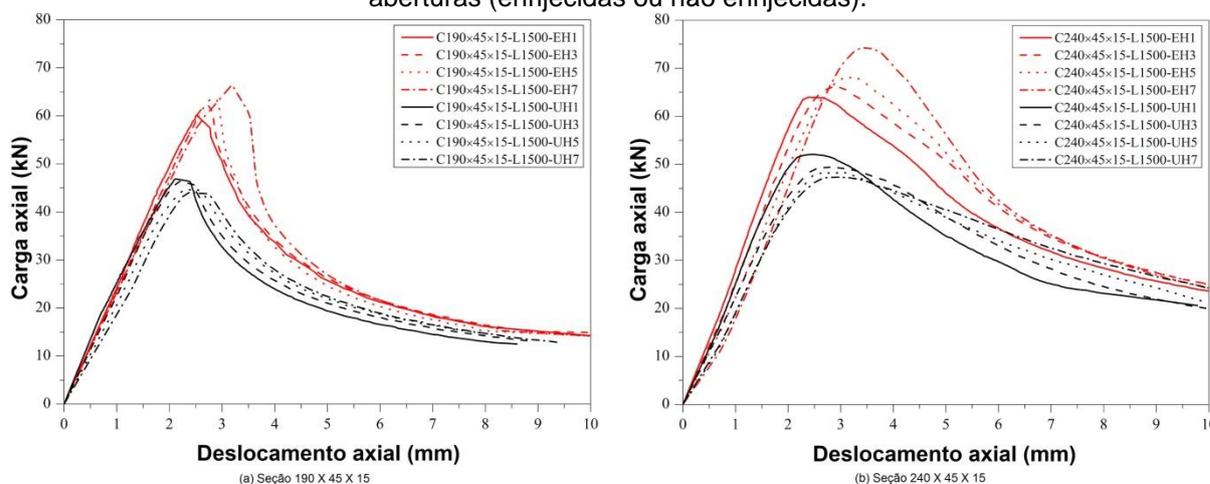
Figura 7 - Comportamento das curvas carga x deslocamento axial para amostras com aberturas (enrijecidas ou não enrijecidas) e sem aberturas.



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2019).

Além disso, para as colunas de mesmo comprimento, os resultados mostraram que quanto maior a quantidade de furos enrijecidos presentes na alma do perfil maior foi a capacidade resistente, e quanto maior a quantidade de furos não enrijecidos presentes na alma do perfil, menor foi a capacidade resistente, como pode ser visto na Figura 8. Para o caso dos perfis com sete aberturas enrijecidas na alma, a resistência à compressão foi aumentada em até 21% quando comparada com os perfis sem qualquer tipo de abertura na alma e para o caso dos perfis com sete aberturas não enrijecidas na alma a resistência à compressão foi reduzida em até 20% quando comparada com os perfis sem qualquer tipo de abertura na alma. Com o modelo numérico validado a resistência à compressão foi avaliada pelo Método dos Elementos Finitos e comparada com a mesma obtida pelo Método da Resistência Direta. Verificou-se que este último foi conservador em torno de 34,5% para seções U sem furos na alma, os quais romperam por meio de flambagem global ou combinação de flambagem global e local.

Figura 8 - Curvas carga x deslocamento axial para amostras com diferentes espaçamentos das aberturas (enrijecidas ou não enrijecidas).



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2019).

Chen *et al.* (2020a) realizaram um extenso estudo paramétrico envolvendo 348 modelos de elementos finitos sobre a capacidade axial de seções U de Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos. Investigou-se os efeitos da esbeltez da coluna, comprimento do enrijecedor, raio de concordância, tamanho do furo, localização do furo e espaçamento do furo na capacidade axial. Equações de projeto para determinar a capacidade axial de seções U de Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos foram propostas, as quais foram desenvolvidas usando análise de regressão linear bivariada aplicada à resistência de seções U enrijecido de Perfis Formados a Frio com furos não enrijecidos. O *software* ABAQUS foi utilizado para desenvolver um modelo numérico de seções U enrijecido de Perfis Formados a Frio sem furos e com furos (enrijecidos e não enrijecidos) submetidos a compressão e este modelo numérico foi validado com resultados experimentais relatados por Chen *et al.* (2019). O modelo foi capaz de prever de forma precisa os resultados experimentais tanto a capacidade de carga quanto a forma deformada.

Com o modelo numérico válido, um estudo paramétrico foi realizado por Chen *et al.* (2020a) com duas seções, denominadas Seção U 190 e Seção U 240, avaliando a influência das variáveis mencionadas anteriormente na capacidade de carga dos Perfis Formados a Frio. Seguem algumas observações relatadas no estudo:

- Influência da esbeltez da coluna (λ) na capacidade de carga: foi possível verificar a influência do comprimento da coluna no modo de flambagem, sendo nas colunas curtas o modo local, nas colunas intermediárias o modo distorcional e nas

colunas longas o modo global. Conforme a esbeltez da coluna (λ) aumentou, a capacidade de carga dos Perfis Formados a Frios com furos enrijecidos foi reduzida, em média 7,8% para as colunas curtas, 12,3% para as colunas intermediárias e 19,1% para as colunas longas;

– Influência da razão entre o espaçamento dos furos e a largura da alma (s/d) na capacidade de carga: houve uma redução na capacidade de carga em média de 12% quando a razão (s/d) variou de 0,52 até 1,57 para Seção U 190 com furos enrijecidos;

– Influência da razão entre o comprimento do enrijecedor e a largura da alma (q/d) na capacidade de carga: para a Seção U 190 a capacidade axial aumentou em 16,8% quando a razão (q/d) variou de 0,02 para 0,12. Para Seção U 240 a capacidade axial aumentou em 17,9% a razão (q/d) aumentou de 0,02 para 0,12;

– Influência da razão entre o raio de concordância do enrijecedor e a espessura da alma (r_q/t) na capacidade de carga: quando a razão (r_q/t) variou de 2,0 para 8,0 a capacidade de carga aumentou em média 7,4% para a Seção U 190 e 5,1% para a Seção U 240;

– Influência da razão entre o diâmetro do furo e a largura da alma (a/d) na capacidade de carga: para a Seção U 190 quando a razão (a/d) variou de 0,2 para 0,6 a capacidade de carga dos perfis com furos enrijecidos diminuiu apenas 3 % enquanto nos perfis com furos não enrijecidos diminuiu 18,9%. Para a Seção U 240 quando a razão (a/d) variou de 0,2 para 0,6 a capacidade de carga dos perfis com furos enrijecidos diminuiu apenas 2,3 % enquanto nos perfis com furos não enrijecidos diminuiu 17%;

– Influência da razão entre a localização do furo e o comprimento da coluna (x/L) na capacidade de carga: verificou-se que a influência da localização do furo na capacidade axial de tais seções é desprezível;

– Influência da razão entre o comprimento do enrijecedor e o espaçamento do furo (q/s) na capacidade de carga: para a Seção U 190 quando a razão (q/s) variou de 0,01 para 0,08 a capacidade de carga aumentou em 18,2%, enquanto que para a Seção U 240 quando a razão (q/s) variou de 0,02 para 0,10 a capacidade de carga aumentou em 14,4%;

– Influência da razão entre a concordância do enrijecedor e o espaçamento do furo (r_q/s) na capacidade de carga: para a Seção U 190 quando a razão (r_q/s) variou

de 0,03 para 0,12 a capacidade de carga aumentou em média 7%, enquanto que para a Seção U 240 quando a razão (r_q/s) variou de 0,01 para 0,05 a capacidade de carga diminuiu em média 6,1%.

Com os resultados do estudo paramétrico, Chen *et al.* (2020a) observaram que as razões (a/d), s , (q/d) e (r_q/t) são os parâmetros de influência principais que afetam a capacidade axial das seções na compressão. As equações de projeto de Moen e Schafer para Perfis Formados a Frio com furos não enrijecidos foram modificadas para melhorar a previsão da capacidade axial dos Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos pela multiplicação de um fator de melhoramento o qual foi obtido por meio de uma análise de regressão linear bivariada. Chen *et al.* (2020a) ressaltam que os efeitos do diâmetro do furo (a), largura da alma (d) e espessura (t) já foram considerados nas equações de Moen e Schafer para previsão de capacidade de carga axial de Perfis Formados a Frio com furos não enrijecidos, então somente os parâmetros de influência principais como espaçamento dos furos (s), comprimento do enrijecedor (q) e raio de concordância do enrijecedor (r_q) que estavam diretamente relacionado aos furos enrijecidos foram considerados nas equações de projeto modificadas para determinar a capacidade de carga axial de Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos. As equações de projeto modificadas para calcular a capacidade axial de Perfis Formados a Frio de seção U enrijecido com furos enrijecidos (P_{prop}) propostas por Chen *et al.* (2020a) são as Equações 1, 2 e 3:

- colunas curtas ($0,28 < \lambda_c < 0,77$):

$$P_{prop} = 1,92 \times \left(\frac{q}{s}\right)^{0,047} \times \left(\frac{r_q}{s}\right)^{0,017} \times P_{MS} \quad (1)$$

- colunas intermediárias ($0,77 < \lambda_c < 1,71$):

$$P_{prop} = 1,95 \times \left(\frac{q}{s}\right)^{0,034} \times \left(\frac{r_q}{s}\right)^{0,022} \times P_{MS} \quad (2)$$

- colunas esbeltas ($1,71 < \lambda_c < 2,68$):

$$P_{prop} = 1,91 \times \left(\frac{q}{s}\right)^{0,038} \times \left(\frac{r_q}{s}\right)^{0,021} \times P_{MS} \quad (3)$$

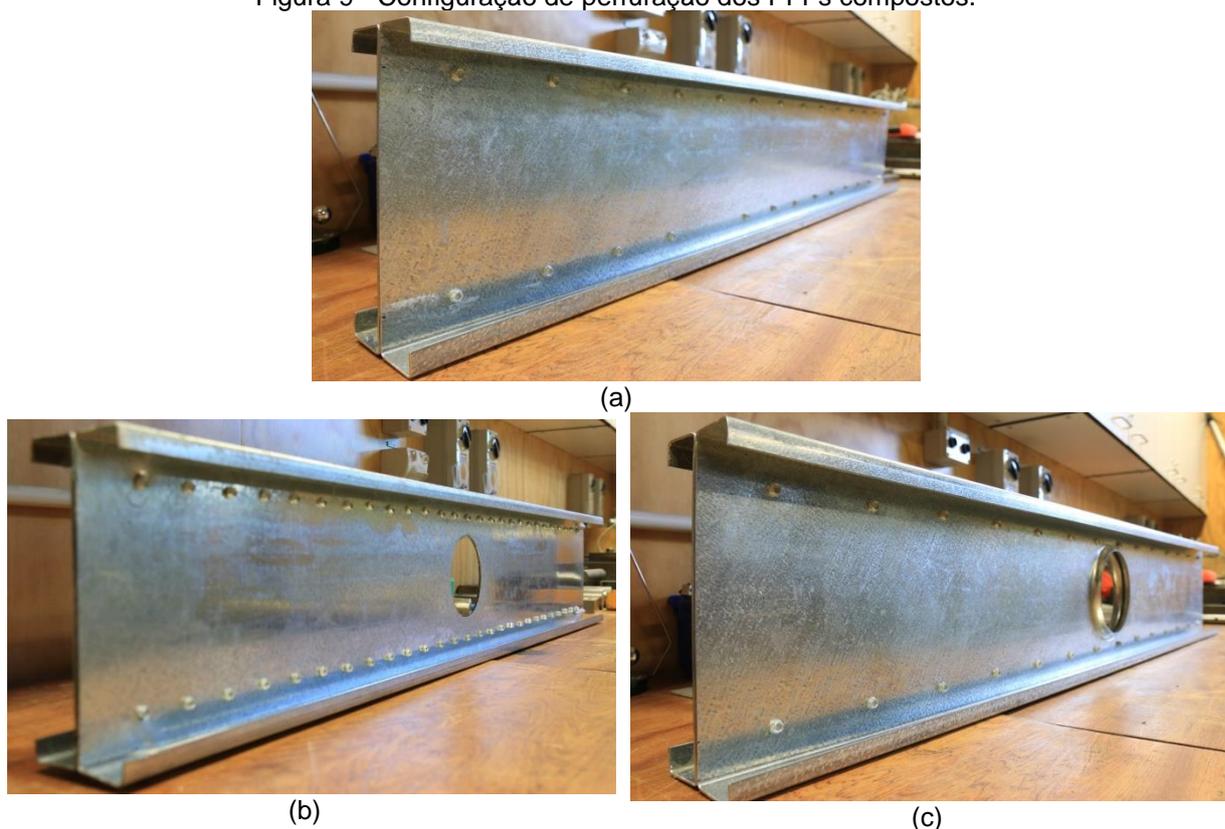
onde q é o comprimento do enrijecedor da borda do furo, s é o espaçamento entre os furos, r_q é o raio do canto entre a alma e o enrijecedor e P_{MS} é a capacidade axial de Perfis Formados a Frio de seção U enrijecido com furos não enrijecidos prevista a partir das equações de Moen e Schafer.

Adicionalmente, com o objetivo de avaliar as equações de determinação da capacidade de carga dos Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos submetidos a compressão, Chen *et al.* (2020a) realizaram uma análise de confiabilidade e foi obtido um índice de confiabilidade de 2,85 para colunas curtas, 2,80 para colunas intermediárias e 2,66 para colunas esbeltas, sendo todos maiores do que o índice de confiabilidade mínimo de 2,5 indicado pela AISI S100-16 (AISI, 2016), indicando que as equações propostas por Chen *et al.* (2020) para determinação da capacidade de carga dos Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos são confiáveis.

Além disso, Chen *et al.* (2020a) concluíram que os resultados obtidos no estudo paramétrico mostraram que a capacidade axial dos Perfis Formados a Frio de seção U com furos enrijecidos melhorou ligeiramente devido ao aumento do comprimento do enrijecedor (q) e do raio de dobramento do enrijecedor (r_q), enquanto o aumento do espaçamento dos furos (s) e do diâmetro dos furos (a) podem reduzir a resistência axial. Os efeitos da localização do furo (x/L) na capacidade axial de tais seções foram considerados insignificantes.

Chen *et al.* (2020b) realizaram um estudo avaliando a resistência a compressão de composições de seção U de Perfis Formados a Frio (Figura 9) com almas sem furos (a), com furos não enrijecidos (b) e com furos com bordas enrijecidas (c).

Figura 9 - Configuração de perfuração dos PFFs compostos.

Fonte: Chen *et al.* (2020b).

Para avaliação experimental, Chen *et al.* (2020b) executaram um total de 27 ensaios de compressão axial compreendendo 9 amostras sem furos, 9 amostras com furos não enrijecidos e 9 amostras com furos enrijecidos. Os perfis compostos de seções U foram montados a partir de seções U individuais com parafusos autobrocantes na alma. Adicionalmente, 18 ensaios foram executados com perfis U individuais para estudar a ação composta compreendendo 6 amostras individuais sem furos, 6 amostras individuais com furos não enrijecidos e 6 amostras individuais com furos enrijecidos.

Os resultados experimentais mostraram que as barras de Perfis Formados a Frio compostos com seção U com furos enrijecidos apresentaram, em média, um aumento de 6,6% na resistência axial comparadas com as mesmas barras que não possuíam furos, enquanto que as barras de Perfis Formados a Frio compostos com seção U com furos não enrijecidos apresentaram, em média, uma redução de 12,4% na resistência axial comparadas com as mesmas barras que não possuíam furos (alma plana).

Para avaliar o efeito da ação de compor perfis na resistência axial, os resultados experimentais dos perfis compostos foram comparados com os

correspondentes resultados experimentais dos perfis individuais. Estes resultados experimentais mostraram que:

- as barras de Perfis Formados a Frio compostos de seção U com furos enrijecidos apresentaram, em média, uma resistência axial 14% maior do que o dobro da resistência axial da mesma barra de Perfil Formado a Frio individual de seção U com furos enrijecidos;
- as barras de Perfis Formados a Frio compostos de seção U com furos não enrijecidos apresentaram, em média, uma resistência axial 13% maior do que o dobro da resistência axial da mesma barra de Perfis Formados a Frio individual de seção U com furos não enrijecidos e;
- as barras de Perfis Formados a Frio compostos com seção U sem furos (alma plana) apresentaram, em média, uma resistência axial 11% maior do que o dobro da resistência axial da mesma barra de Perfil Formado a Frio individual de seção U sem furos (alma plana).

Além disso, a relação $(P_{EXP-B}/(2 \times P_{EXP-S}))$ entre a resistência experimental dos Perfis Formados a Frio compostos com seção U e o dobro da resistência experimental dos Perfis Formados a Frio individuais com seção U apresentaram um valor médio de 1,04; 1,18 e 1,17 com coeficiente de variação de 0,01; 0,01 e 0,03 respectivamente para colunas curtas, intermediárias e esbeltas. Chen *et al.*(2020b) ressaltam que a ação de compor perfis com colunas curtas não apresentou uma melhora significativa no ganho de resistência axial pois romperam por flambagem local. A relação $(P_{EXP-B}/(2 \times P_{EXP-S}))$ cresceu quando o comprimento da coluna aumentou de 420 mm para 1420 mm.

Chen *et al.*(2020b) realizou uma análise numérica por meio do Método dos Elementos Finitos com o *software* ABAQUS para determinar a resistência axial dos Perfis Formados a Frio compostos com seção U com furos enrijecidos, com furos não enrijecidos e sem furos (alma plana). As dimensões das amostras, imperfeições iniciais e propriedades dos materiais (Módulo de Elasticidade e coeficiente de *Poisson*) medidas foram incorporadas no modelo numérico. A primeira etapa foi realizar uma análise de perturbação linear (*eigen-value analysis*) para obter os modos de flambagem (*eigen-modes*), enquanto a segunda etapa foi realizar uma análise de deslocamento-carregamento para obter a resistência axial usando o método “*general-static*”. A maioria dos resultados obtidos na análise numérica apresenta uma boa concordância com os resultados experimentais em termos de

resistência axial e formas deformadas. A relação entre os resultados obtidos da análise numérica e dos ensaios experimentais apresentou um valor médio de 0,99 com o correspondente coeficiente de variação de 0,04.

Com o modelo numérico validado, Chen *et al.*(2020b) realizaram um estudo paramétrico compreendendo 135 modelos de elementos finitos para avaliar a influência da esbeltez das colunas, do diâmetro do furo, do espaçamento dos parafusos, do comprimento do enrijecedor e do raio de concordância do enrijecedor na resistência axial das colunas.

Os resultados do estudo paramétrico mostraram que a resistência axial das colunas de Perfis Formados a Frio compostos de seção U com furos enrijecidos:

- foi reduzida em média 59,6% quando a esbeltez das colunas (λ_c) aumentou de 0,4 até 2,02;
- apresentou uma leve queda de 5% em média quando a relação entre o espaçamento dos parafusos e a largura da alma (s/d) aumentou de 0,2 até 0,8;
- aumentou em média apenas 1,5% quando a relação entre o comprimento do enrijecedor da borda do furo e a largura da alma (q/d) variou de 0,04 para 0,08, indicando que a influência desta relação foi limitada;
- aumentou em média apenas 0,3% quando a relação entre o raio de concordância do enrijecedor da borda do furo e a espessura da chapa (r_q/t) aumentou de 1,14 até 3,42, indicando que o efeito desta relação foi insignificante;
- diminuiu em média apenas 3,4% quando a relação entre o diâmetro do furo e a largura da alma (a/d) aumentou de 0,2 até 0,6.

Os trabalhos indicam a viabilidade e a eficiência da adoção de furos com borda enrijecidas para melhorar o comportamento e a resistência de perfis formados a frio com perfurações. No entanto, este é um campo ainda pouco explorado, o que motivou o desenvolvimento deste trabalho.

3 MODELO NUMÉRICO E VALIDAÇÃO

Neste capítulo será apresentada a modelagem numérica de Perfis Formados a Frio de seção transversal U enrijecido submetidos à compressão centrada. O modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) foi implementado através do *software* ANSYS. Ao todo, foram realizadas 300 simulações numéricas, avaliando dois modos de flambagem: local e distorcional e três aços com tensões de escoamento diferentes: CF-30, ZAR 250 e ZAR 400. Foram avaliados perfis sem furos (SF), perfis com um furo não enrijecido (FNE) e perfis com um furo enrijecido (FE), sendo adotados três diâmetros para o furo: 20% b_w , 40% b_w e 80% b_w e dois comprimentos do enrijecedor da borda do furo: 5% b_w e 10% b_w , sendo b_w a largura da alma. Vale ressaltar que para qualquer perfil com perfuração foi inserido apenas um furo circular localizado à meia altura da coluna. Para efeito de validação do modelo numérico, foram comparados seus resultados com valores experimentais encontrados na literatura (CHEN *et al.* 2019).

3.1 Seção transversal

Neste estudo foi adotada a seção U enrijecido, objeto de estudos anteriores: Grey e Moen (2011), Kulatunga e Macdonald (2013), Kulatunga *et al.* (2014), Jardim Jr.(2018), Chen *et al.*(2019), Chen *et al.*(2020a) e Chen *et al.*(2020b). A Figura 10 apresenta a seção sem furos (a), a seção com furo não enrijecido (b) e a seção com furo enrijecido (c).

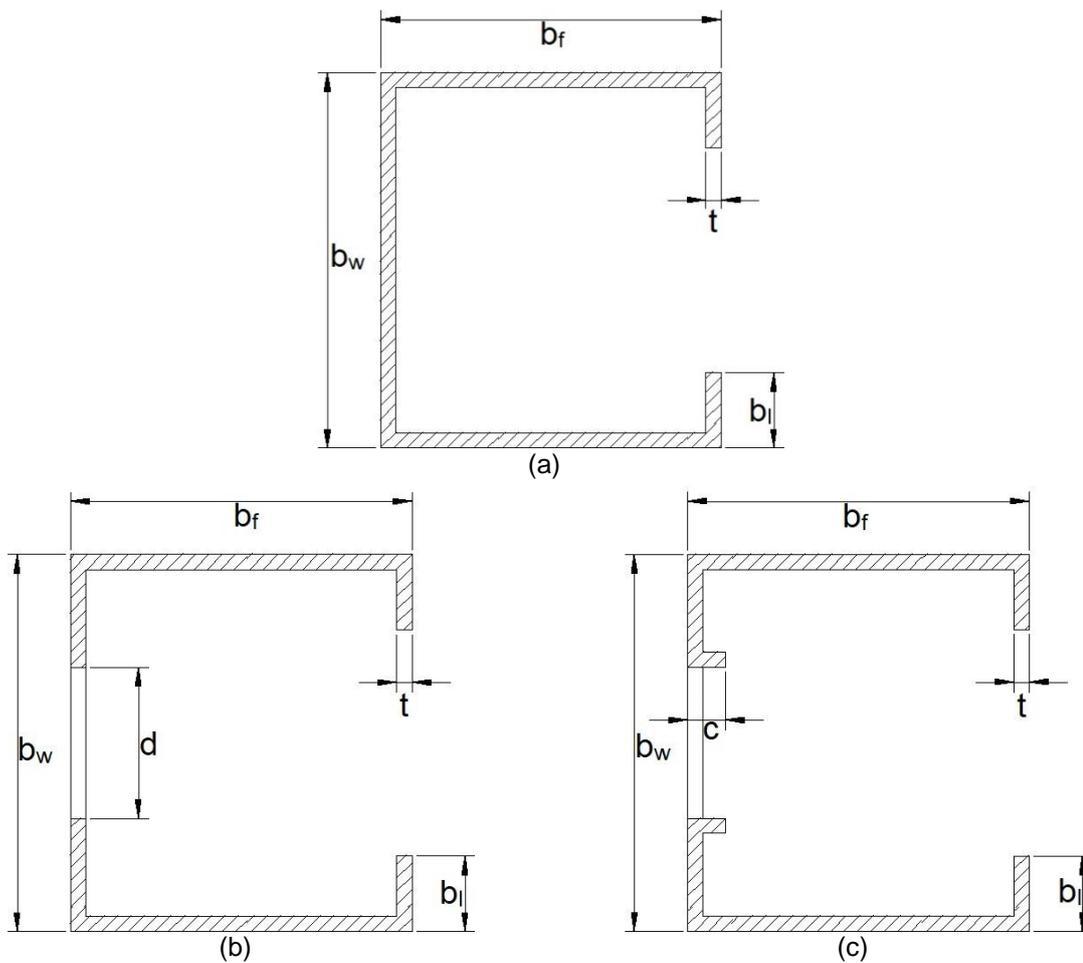
As amostras foram nomeadas de forma a apresentar em sua nomenclatura as dimensões da seção transversal, presença ou não da perfuração na alma, tipo de perfuração, diâmetro da perfuração e comprimento do enrijecedor da borda da perfuração. Por exemplo, para a nomenclatura:

Ue 100x50x20x1,6 FE D20BW C10BW

- o termo Ue designa o tipo de perfil, U enrijecido;
- o termo 100x50x20x1,6 representa respectivamente a largura da alma (b_w), a largura do flange (b_f), a largura do enrijecedor (b_i) e a espessura da chapa (t), todas em milímetros;

- FE indica o perfil com furo enrijecido, FNE indica o perfil com furo não enrijecido e SF indica o perfil sem furo;
- o termo D20BW indica o diâmetro do furo (d) igual a 20% de b_w ;
- o termo C10BW indica o comprimento do enrijecedor da borda do furo (c) igual a 10% de b_w .

Figura 10 - Configurações de perfuração das seções estudadas.



Fonte: O autor.

A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam as dimensões das seções transversais utilizadas neste estudo e a sua área bruta. A Tabela 1 apresenta o grupo de seções transversais adotadas para avaliar os perfis no âmbito da flambagem local e a Tabela 2 apresenta o grupo de seções transversais adotadas para avaliar os perfis no âmbito da flambagem distorcional.

Tabela 1 - Seção transversal estudada para flambagem local.

Seção Estudada	b_w (mm)	b_f (mm)	b_l (mm)	t (mm)	A_g (mm ²)
Ue 100x50x20x1,2	100	50	20	1,2	288
Ue 100x50x20x1,4	100	50	20	1,4	336
Ue 100x50x20x1,6	100	50	20	1,6	384
Ue 100x50x20x1,8	100	50	20	1,8	432
Ue 100x50x20x2,0	100	50	20	2,0	480

Fonte: O autor.

Tabela 2 - Seção transversal estudada para flambagem distorcional.

Seção Estudada	b_w (mm)	b_f (mm)	b_l (mm)	t (mm)	A_g (mm ²)
Ue 50x45x10x1,2	50	45	10	1,2	192
Ue 50x45x10x1,4	50	45	10	1,4	224
Ue 50x45x10x1,6	50	45	10	1,6	256
Ue 50x45x10x1,8	50	45	10	1,8	288
Ue 50x45x10x2,0	50	45	10	2,0	320

Fonte: O autor.

3.2 Análise via Teoria Generalizada de Vigas

Neste estudo a análise por meio da Teoria Generalizada de Vigas, utilizado o *software* GBTul, foi utilizada para a determinação da carga crítica de flambagem e do comprimento de meia onda das seções transversais adotadas. Isto foi necessário para a escolha do comprimento das colunas utilizadas no modelo via elementos finitos. A Tabela 3 apresenta, para cada seção transversal estudada, a força axial de flambagem local elástica (N_l), o comprimento de meia onda associado ao modo local (L_l), a força axial de flambagem distorcional elástica (N_{dist}) e o comprimento de meia onda associado ao modo distorcional (L_{dist}).

Tabela 3 – Força axial de flambagem e comprimento de meia onda das seções estudadas.

Seção Estudada	Flambagem Local		Flambagem Distorcional	
	N_i (kN)	L_i (mm)	N_{dist} (kN)	L_{dist} (mm)
Ue 50x45x10x1,2	92,66	50	68,37	350
Ue 50x45x10x1,4	146,70	50	95,37	300
Ue 50x45x10x1,6	218,21	50	126,91	300
Ue 50x45x10x1,8	309,41	50	165,55	300
Ue 50x45x10x2,0	422,37	50	207,86	250
Ue 100x50x20x1,2	40,80	80	89,22	650
Ue 100x50x20x1,4	64,77	80	123,23	600
Ue 100x50x20x1,6	96,64	80	163,28	600
Ue 100x50x20x1,8	137,55	80	209,21	550
Ue 100x50x20x2,0	188,59	80	262,44	500

Fonte: O autor.

A Tabela 4 apresenta os comprimentos adotados para os modelos numéricos (L_{MEF}). No grupo em que se avalia a flambagem local, foi adotado um comprimento igual a cinco vezes o comprimento de meia onda associado ao modo local (L_i), a fim de evitar a inibição do desenvolvimento do modo pelo efeito de extremidade ocasionado pela ação dos vínculos. Para o grupo em que se avalia a flambagem distorcional, foi adotado o comprimento de meia onda associado ao modo distorcional (L_{dist}).

Tabela 4 - Comprimento no modelo numérico.

Modo Distorcional		Modo Local	
Seção Estudada	L_{MEF} (mm)	Seção Estudada	L_{MEF} (mm)
Ue 50x45x10x1,2	350	Ue 100x50x20x1,2	400
Ue 50x45x10x1,4	300	Ue 100x50x20x1,4	400
Ue 50x45x10x1,6	300	Ue 100x50x20x1,6	400
Ue 50x45x10x1,8	300	Ue 100x50x20x1,8	400
Ue 50x45x10x2,0	250	Ue 100x50x20x2,0	400

Fonte: O autor.

3.3 Análise via Método dos Elementos Finitos

Os Perfis Formados a Frio sem furos e com furos (enrijecidos e não enrijecidos) submetidos à compressão centrada foram analisados pelo Método dos Elementos Finitos por meio do *software* ANSYS. Nesta seção serão apresentados o tipo de elemento, o refinamento da malha, as condições de contorno e de carregamento e as propriedades mecânicas dos aços adotados neste estudo. Estes parâmetros basearam-se em estudos anteriores.

3.3.1 Tipo de elemento

Para escolha do tipo de elemento para análise por meio do Método dos Elementos Finitos, Souza (2013) elencou três tipos de elementos de casca, são eles:

- SHELL63: elemento de casca com quatro nós, adequado para análise elástica;
- SHELL181: elemento de casca com quatro nós, especialmente indicado para análises plásticas, podendo ser utilizado com integração reduzida (IR) ou com integração completa (IC);
- SHELL281: elemento de casca com oito nós, incluindo nós intermediários.

Os modelos construídos tinham em suas extremidades empenamento livre e restrição de deslocamento na direção ortogonal ao eixo da coluna e, à meia altura, uma restrição na direção paralela ao eixo da coluna, impedindo o deslocamento de corpo rígido do perfil. O carregamento foi distribuído ao longo do perímetro das extremidades da coluna. Souza (2013) concluiu que os resultados dos modelos com o elemento SHELL181-IC (com integração completa) possuíam melhor correlação com os resultados de carga crítica obtidos pela Teoria Generalizada de Vigas com o *software* GBTul.

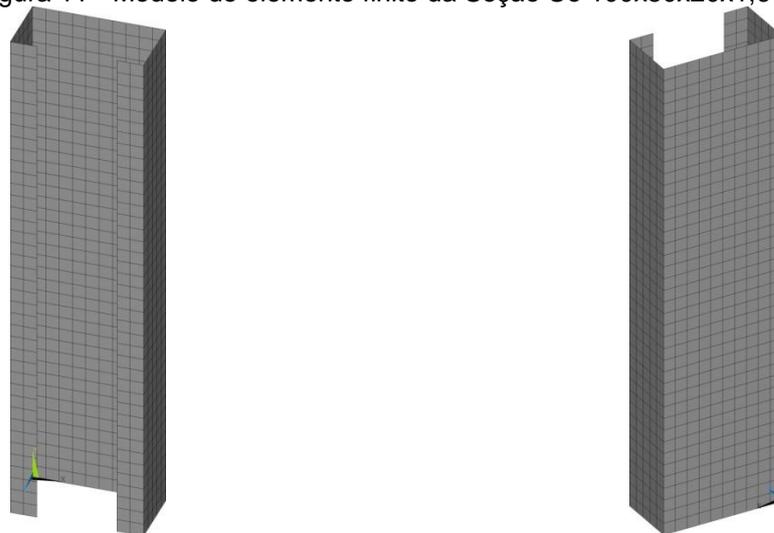
3.3.2 Refinamento da malha

Para a determinação do refinamento da malha deve-se buscar um equilíbrio entre precisão de resultados e esforço computacional. Souza (2013) avaliou uma malha quadrada de dois tamanhos: 5% da largura da alma e 10% da largura da alma. De forma similar ao procedimento realizado para escolha do elemento de casca, os resultados foram comparados com os que foram obtidos pela Teoria Generalizada de Vigas com o *software* GBTul, concluindo que os resultados

dos modelos com a malha quadrada de tamanho equivalente a 10% da largura da alma apresentaram uma melhor correlação entre os resultados.

Na Figura 11 é apresentado o modelo de elemento finito da seção Ue 100x50x20x1,6 SF implementado através do *software* ANSYS com a malha quadrada de dimensão equivalente a 10% da largura da alma.

Figura 11 - Modelo de elemento finito da Seção Ue 100x50x20x1,6 SF.

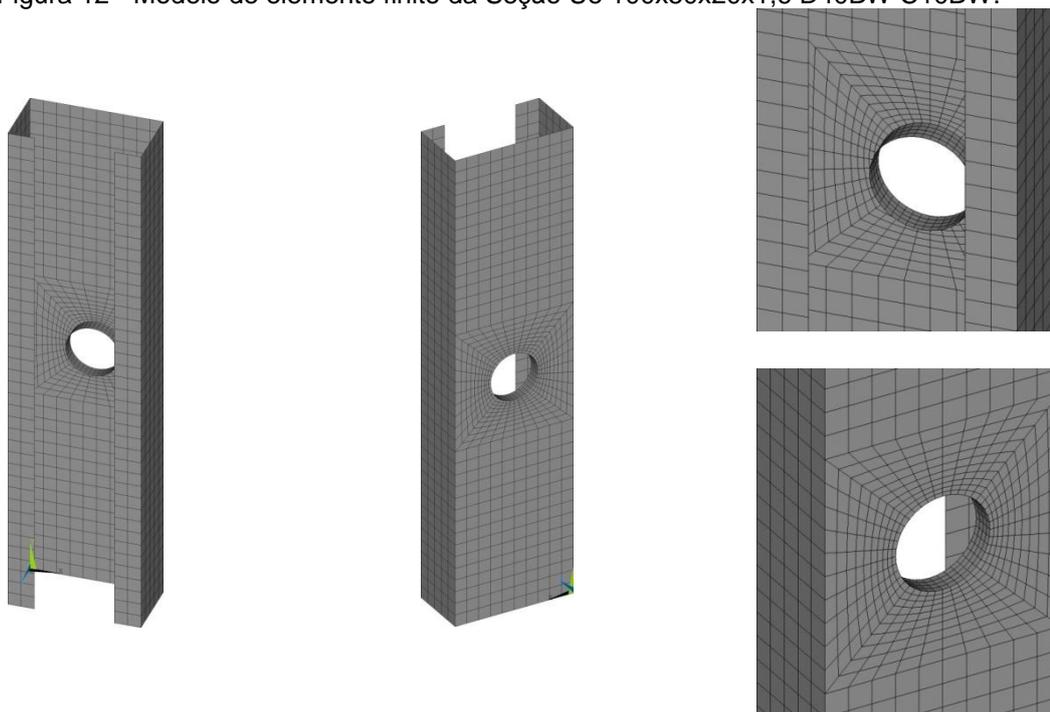


Fonte: O autor.

Nos perfis com perfurações, enrijecidas e não enrijecidas, foi realizado um ajuste adicional da malha devido à inserção da perfuração circular na alma da coluna. Para a região da alma próxima ao furo foi utilizada uma malha mapeada para adequar a malha quadrada, de dimensão igual a 10% da largura da alma utilizada ao longo do perfil, com a perfuração inserida. Para os perfis com furo enrijecido, a dimensão na direção normal ao plano da alma (dimensão na direção do comprimento do enrijecedor da borda do furo) da malha quadrilateral utilizada no enrijecedor da borda do furo foi igual a 2,5% da largura da alma.

Na Figura 12 é apresentado o modelo de elemento finito da seção Ue 100x50x20x1,6 FE D40BW C10BW implementado através do *software* ANSYS com a malha quadrada de dimensão equivalente a 10% da largura da alma. Também é apresentado o ajuste da malha quadrilateral na região da perfuração com a malha mapeada.

Figura 12 - Modelo de elemento finito da Seção Ue 100x50x20x1,6 D40BW C10BW.



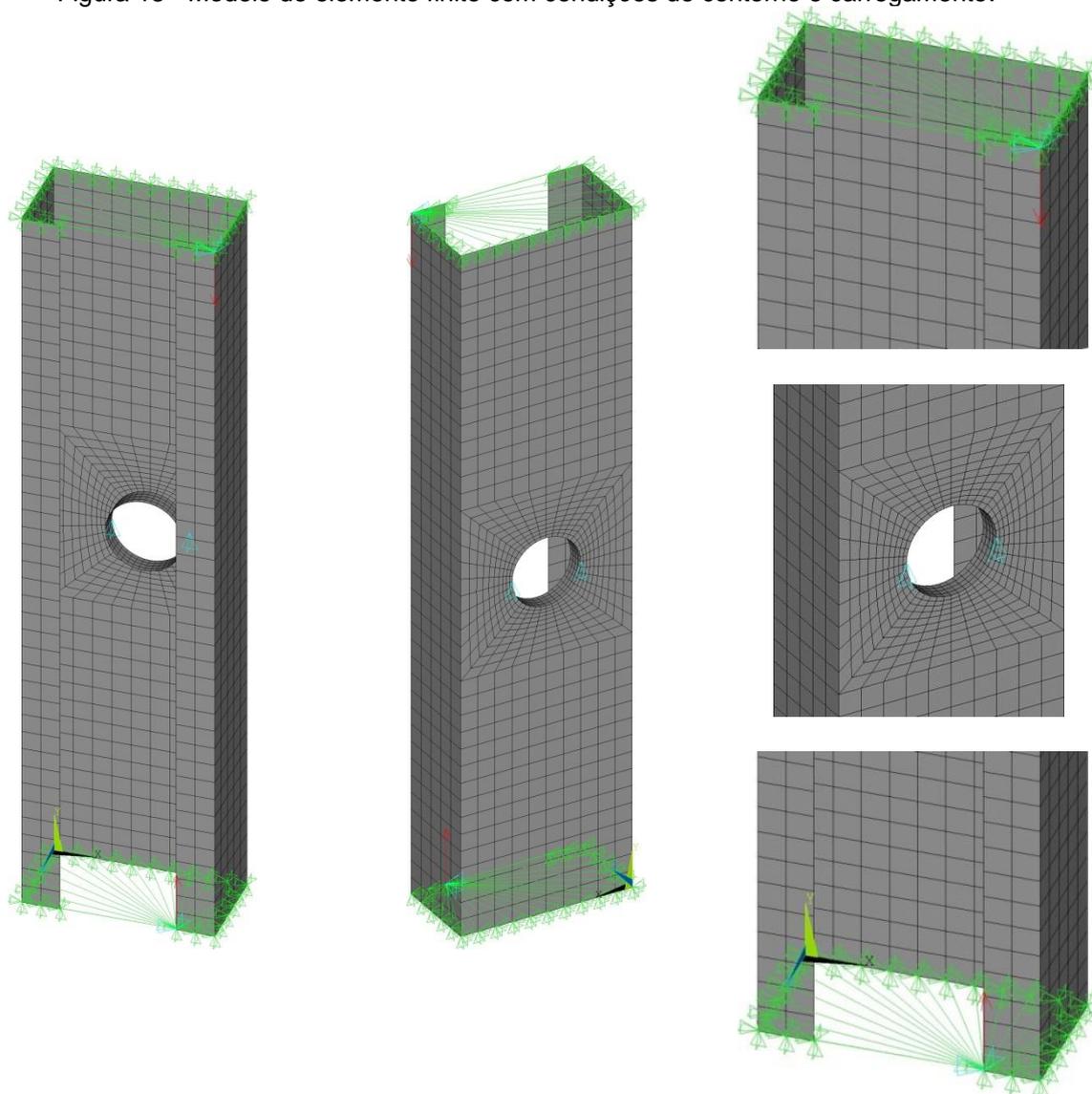
Fonte: O autor.

3.3.3 Condições de contorno e carregamento

Neste estudo os nós localizados em cada uma das extremidades da coluna tiveram todos os seus graus de liberdade acoplados e em um dos nós deste conjunto de nós com os graus de liberdade acoplados, denominado de nó mestre, foram aplicadas as condições de contorno e carregamento (Figura 13).

Neste tipo de análise as condições de contorno simulam uma barra com as extremidades rotuladas (SOUZA, 2013), então, para isto, nos nós mestres localizados nas extremidades da coluna foram aplicadas restrições de deslocamento nas direções ortogonais ao eixo da coluna, ou seja, direção X e direção Z (Figura 13). Nestes mesmos nós mestres foram aplicadas as forças concentradas de compressão (Figura 13). Adicionalmente, para impedir o deslocamento de corpo rígido da coluna, em um nó (ou dois nós, para os perfis com furo) localizado à meia altura da coluna foi aplicada a restrição de deslocamento na direção do eixo da coluna, ou seja, na direção Y (Figura 13).

Figura 13 - Modelo de elemento finito com condições de contorno e carregamento.



Fonte: O autor.

3.3.4 Propriedades mecânicas dos materiais

Neste estudo foram adotados os aços CF-30, ZAR 250 e ZAR 400 especificados pela NBR 14762:2010 (ABNT, 2010) para uso estrutural, com as respectivas resistências ao escoamento (f_y) e resistência última (f_u):

- CF-30:
 $f_y=300$ MPa e $f_u=490$ MPa;
- ZAR 250:
 $f_y=250$ MPa e $f_u=360$ MPa;
- ZAR 400
 $f_y=400$ MPa e $f_u=450$ MPa;

O módulo de elasticidade adotado em todos os modelos foi $E=200$ GPa e o coeficiente de Poisson é $\nu=0,3$. Em todos os modelos foi adotado o diagrama Tensão x Deformação multilinear proposto por Faria (2016), apresentado na Figura 14.

3.3.5 Solução do problema não linear

A solução do problema não linear foi a seguinte:

– Análise de flambagem

Na análise de flambagem elástica procurou-se pelo primeiro modo de flambagem que representasse o modo para a análise desejada: modo local ou modo distorcional.

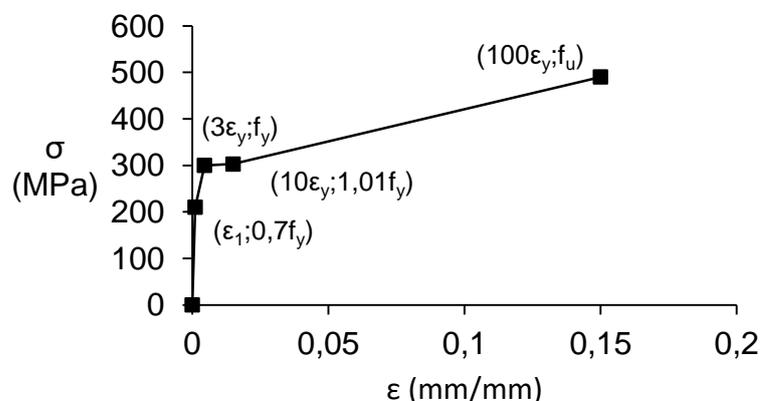
– Introdução da imperfeição

Atualiza a geometria do modelo de elemento finito de acordo com os resultados de deslocamento da análise anterior e cria uma geometria revisada na configuração deformada. Neste estudo foi adotada uma imperfeição geométrica equivalente à metade da espessura da chapa das seções estudadas. Em trabalhos anteriores (Souza, 2013 e Faria, 2016) foi observado que as imperfeições estão, geralmente, abaixo deste valor.

– Introdução do diagrama de tensão-deformação bilinear

Neste estudo foi utilizado um diagrama de tensão-deformação bilinear apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Diagrama Tensão X Deformação bilinear Aço CF-30.



Fonte: Adaptado de Faria (2016).

- Aplicação da carga de escoamento
A carga de compressão que leva o aço ao escoamento foi aplicada nos nós mestres localizados nas extremidades das colunas.
- Estratégia de incremento de carga
Utiliza-se o método do comprimento de arco, adotando-se como critério de parada um limite de deslocamento suficiente para um pleno desenvolvimento do modo analisado.

3.4 Validação do modelo numérico

Com o intuito de validar o modelo de elementos finito proposto, os resultados numéricos foram comparados com resultados experimentais presentes na literatura. Chen *et al.* (2019) realizaram um estudo numérico e experimental avaliando a resistência à compressão de Perfis Formados a Frio de seção U enrijecido sem perfurações e com perfurações circulares enrijecidas e não enrijecidas localizadas na alma das colunas. Dentre as seções analisadas por Chen *et al.* (2019) foram selecionadas para este trabalho as colunas de comprimento igual a 750 mm, pois para este comprimento foi verificado por meio do *software* GBTul a ocorrência de flambagem local sem interação com outro modo.

Na Tabela 5 são apresentadas as seções transversais selecionadas. As dimensões da seção transversal das colunas foram: a largura da alma (b_w) igual a 190 mm, a largura do flange (b_f) igual a 45 mm, a largura do enrijecedor (b_l) igual a 15 mm e a espessura da chapa (t) igual a 1,45 mm. As colunas com perfurações (enrijecidas e não enrijecidas) selecionadas possuíam apenas um furo localizado à meia altura da coluna. O diâmetro da perfuração circular foi igual a 90 mm. Para o perfil com perfuração enrijecida, o comprimento do enrijecedor da borda do furo foi igual a 13 mm.

Tabela 5 - Resultados numéricos X Resultados experimentais.

Seção Estudada	$N_{C,RI-MEF}$ (kN)	$N_{C,RI-EXP}$ (kN)	$N_{C,RI-MEF} /$ $N_{C,RI-EXP}$
Ue 190x45x15x1,45 SF	69,63	75,65	0,92
Ue 190x45x15x1,45 FNE D90	59,07	60,62	0,97
Ue 190x45x15x1,45 FE D90 C13	73,73	78,83	0,94

Fonte: O autor e Chen *et al.* (2019).

A Tabela 5 apresenta o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local numérico ($N_{c,RI-MEF}$) baseado no Método dos Elementos Finitos obtido através do *software* ANSYS e o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local experimental ($N_{c,RI-EXP}$) obtido nos estudos de Chen *et al.* (2019), ambos para a seção sem perfuração (Ue 190x45x15x1,45 SF), para a seção com perfuração não enrijecida (Ue 190x45x15x1,45 FNE D90) e para a seção com perfuração enrijecida (Ue 190x45x15x1,45 FE D90 C13). Também é apresentada a relação entre o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local numérico e o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local experimental ($N_{c,RI-MEF}/N_{c,RI-EXP}$) para as três configurações de perfurações. A partir dos resultados numéricos e experimentais foi possível verificar a tendência de diminuição da capacidade resistente comparado com o perfil sem furo ao inserir o furo não enrijecido. Foi possível verificar a tendência de aumento da capacidade resistente do perfil comparado com o perfil com furo não enrijecido e perfil sem furo ao inserir o enrijecedor na borda da perfuração. As relações $N_{c,RI-MEF}/N_{c,RI-EXP}$ para o perfil sem furo, para o perfil com furo não enrijecido e para o perfil com furo enrijecido foram respectivamente: 0,92; 0,97 e 0,94, mostrando uma boa correlação entre resultados numéricos e experimentais e, portanto, indicando a validação do modelo numérico proposto.

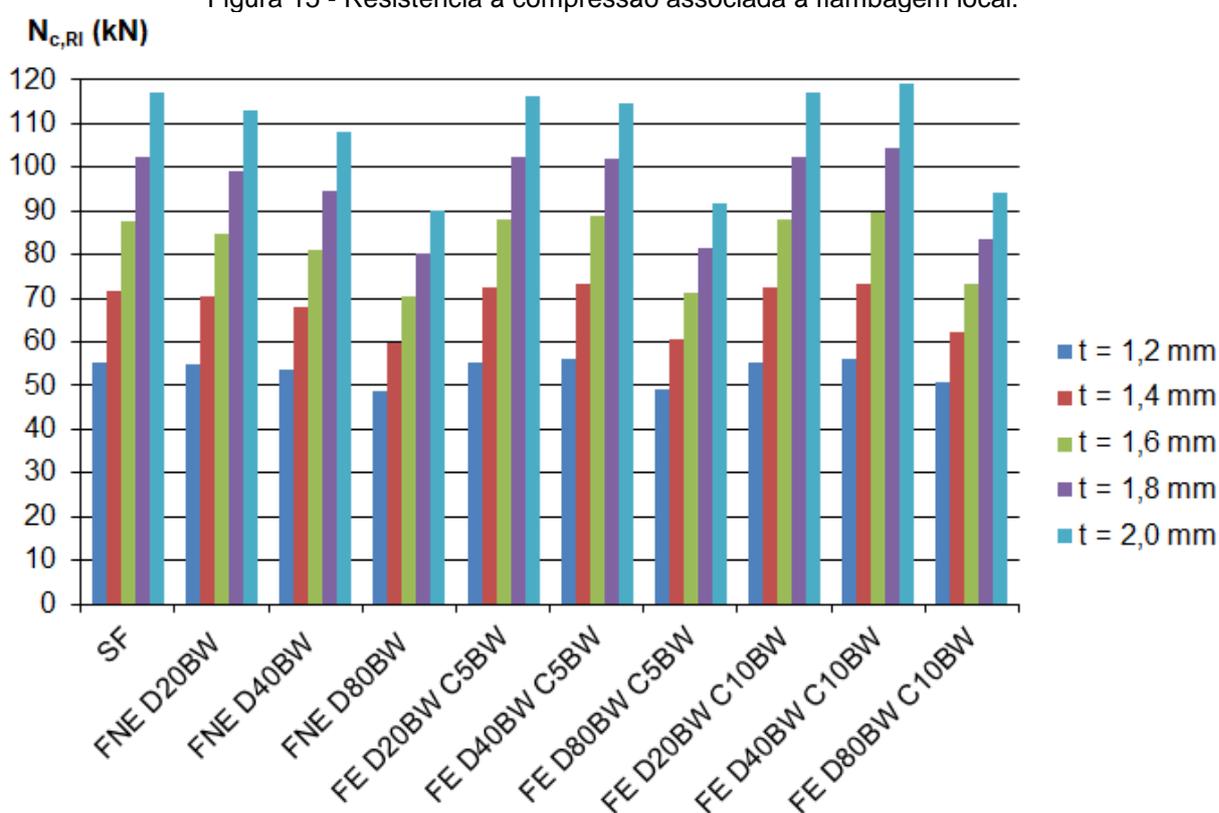
4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através de simulações numéricas baseadas no Método dos Elementos Finitos utilizando o *software* ANSYS. Serão comparadas a influência dos diferentes tipos de perfurações, seus diâmetros e das dimensões dos enrijecedores de borda utilizados no comportamento e na resistência das colunas.

4.1 Flambagem Local

A Figura 15 apresenta os valores característicos da força axial de compressão resistente, associados à flambagem local, em função da configuração da perfuração e da espessura da chapa para a seção Ue 100x50x20 com o aço CF-30.

Figura 15 - Resistência à compressão associada à flambagem local.



Fonte: O autor.

A partir do gráfico apresentado na Figura 15 é possível verificar que quanto maior a espessura da chapa, maior é a resistência do perfil para uma mesma

configuração de perfuração. Para os perfis com furo não enrijecido (FNE) quanto maior o diâmetro do furo, menor é a resistência do perfil para uma mesma espessura de chapa. Ao avaliar os perfis com furo enrijecido (FE) com comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5% b_w e 10% b_w , pode-se verificar um aumento na capacidade resistente em comparação com os perfis com furo não enrijecido (FNE). Em geral, os perfis com furo enrijecido (FE) de comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 10% b_w apresentaram resistência superior aos perfis com comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5% b_w .

A Tabela 6 apresenta a relação entre o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local para os perfis com furos enrijecidos ($N_{c,RI-FE}$) ou não enrijecidos ($N_{c,RI-FNE}$), e o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local para os perfis sem furos ($N_{c,RI-SF}$), sendo: $N_{c,RI-FE} / N_{c,RI-SF}$ ou $N_{c,RI-FNE} / N_{c,RI-SF}$, para a seção Ue 100x50x20 com o aço CF-30.

Tabela 6 - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos.

Seção	t = 1,2 mm	t = 1,4 mm	t = 1,6 mm	t = 1,8 mm	t = 2,0 mm
FNE D20BW	1,00	0,98	0,97	0,97	0,97
FNE D40BW	0,98	0,95	0,93	0,92	0,92
FNE D80BW	0,89	0,83	0,80	0,78	0,77
FE D20BW C5BW	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00
FE D40BW C5BW	1,02	1,02	1,02	1,00	0,98
FE D80BW C5BW	0,89	0,84	0,81	0,80	0,79
FE D20BW C10BW	1,00	1,01	1,01	1,00	1,00
FE D40BW C10BW	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
FE D80BW C10BW	0,92	0,87	0,84	0,82	0,80

Fonte: O autor.

A partir da Tabela 6 é possível verificar que para os perfis com furos não enrijecidos a relação $N_{c,RI-FNE} / N_{c,RI-SF}$ foi menor do que 1 em todos os casos, indicando o efeito deletério da perfuração não enrijecida na resistência dos perfis, e a relação foi tão menor quanto maior foi o diâmetro do furo não enrijecido, chegando a 0,77 para a seção Ue 100x50x20x1,6 FNE D80BW. Dentre os perfis com furo não enrijecido os que possuem furo com diâmetro igual a 80% b_w apresentaram um

comportamento destacado com as menores relações $N_{c,RI-FNE} / N_{c,RI-SF}$, variando entre 0,89 e 0,77.

Os perfis com furos enrijecidos de diâmetros iguais a 20% b_w e 40% b_w , em geral, apresentaram uma relação $N_{c,RI-FE} / N_{c,RI-SF}$ superior a 1, indicando que a inserção do enrijecedor na borda da perfuração leva a uma recuperação significativa de resistência em comparação aos perfis com furos não enrijecidos e até mesmo, ultrapassando a capacidade resistente dos mesmos perfis sem furos. Vale ressaltar que os perfis com furo enrijecido com diâmetro igual a 40% b_w em sua maioria mostraram as maiores relações $N_{c,RI-FE} / N_{c,RI-SF}$ e, portanto, os maiores aumentos na capacidade resistente ao inserir o enrijecedor na borda da perfuração de um perfil com um furo. Os perfis com furo enrijecido com diâmetro igual a 40% b_w e comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 10% b_w apresentaram a relação $N_{c,RI-FE} / N_{c,RI-SF}$ igual a 1,02 para todas as espessuras analisadas, valor um pouco maior do que a mesma relação para os perfis com furo enrijecido com diâmetro igual a 40% b_w e com comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5% b_w que variaram entre 0,98 e 1,02. Isto indica a influência do comprimento do enrijecedor da borda do furo na capacidade resistente do perfil para este diâmetro da perfuração.

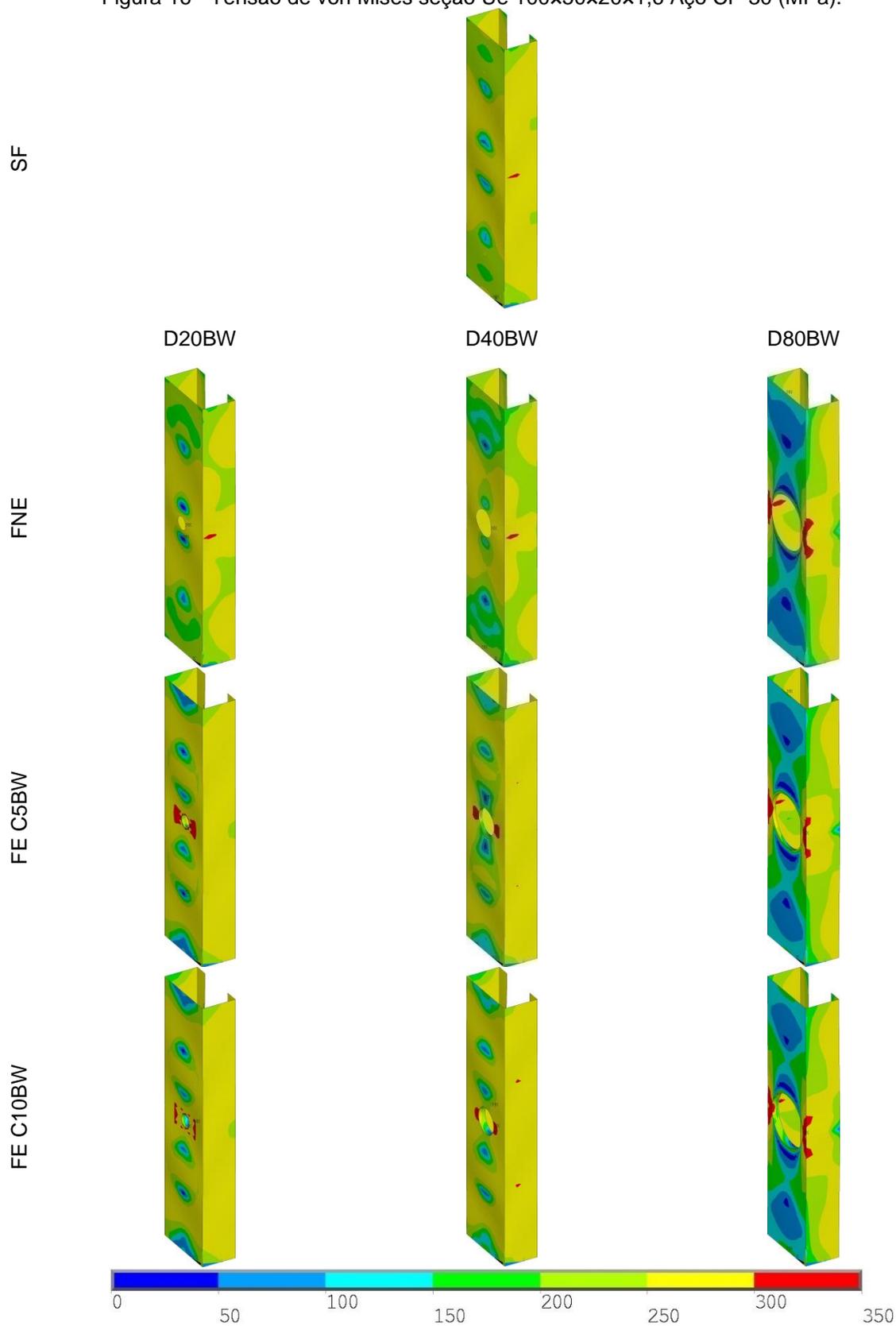
Os perfis com furos enrijecidos (FE) de diâmetro igual a 80% b_w se destacaram pelas menores relações $N_{c,RI-FE} / N_{c,RI-SF}$, sempre menores do que 1, independente do comprimento do enrijecedor da borda do furo. Apesar do pequeno aumento na capacidade resistente ao inserir o enrijecedor na borda da perfuração e ao aumentar o comprimento do mesmo, a relação $N_{c,RI-FE} / N_{c,RI-SF}$ se manteve dentre as menores, variando entre 0,79 e 0,89 para os perfis com furo enrijecido com comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5% b_w e variando entre 0,80 e 0,92 para os perfis com furo enrijecido com comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 10% b_w .

A Figura 16 e a Figura 17 apresentam respectivamente a tensão de von Mises e a componente Z de deslocamento (direção normal ao plano da alma) dos perfis para todas as configurações de perfurações da seção Ue 100x50x20x1,6 com o aço CF-30 de tensão de escoamento f_y igual a 300 MPa. A organização das dez imagens que compõem as Figura 16 e Figura 17 se deu da seguinte forma: as linhas diferenciam a configuração de perfuração e as colunas diferenciam o diâmetro da perfuração. A imagem da primeira linha representa o perfil sem perfuração, as três imagens da segunda linha representam os perfis com perfurações não enrijecidas,

as três imagens da terceira linha representam os perfis com perfurações enrijecidas com o comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5% b_w e as três imagens da quarta linha representam os perfis com perfurações enrijecidas com o comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 10% b_w . As três imagens da primeira coluna representam os perfis perfurações de diâmetro igual a 20% b_w , as três últimas imagens da segunda coluna representam os perfis perfurações de diâmetro igual a 40% b_w e as três imagens da terceira coluna representam os perfis perfurações de diâmetro igual a 80% b_w .

Na Figura 16 as regiões de cor vermelha correspondem às regiões em que as tensões superam a tensão de escoamento, neste caso $f_y=300$ MPa. O perfil sem furo apresenta pequenas regiões, que atingem o escoamento, localizadas no flange, à meia altura. Este comportamento se repete com os perfis com furo não enrijecido de diâmetros iguais a 20% b_w e 40% b_w . Nos perfis com furo enrijecido de diâmetros iguais a 20% b_w e 40% b_w , as regiões que atingem o escoamento estão localizadas na alma, nas extremidades laterais dos furos. Os perfis com furo enrijecido e não enrijecido de diâmetro igual a 80% b_w apresentaram um comportamento similar, porém destacado das outras configurações de perfurações. A alma apresentou menores tensões do que o restante do perfil, indicando o efeito deletério do furo de diâmetro igual 80% b_w , independentemente da presença ou não do enrijecedor na borda do furo, na contribuição da alma na capacidade resistente dos perfis com uma perfuração de diâmetro igual 80% b_w .

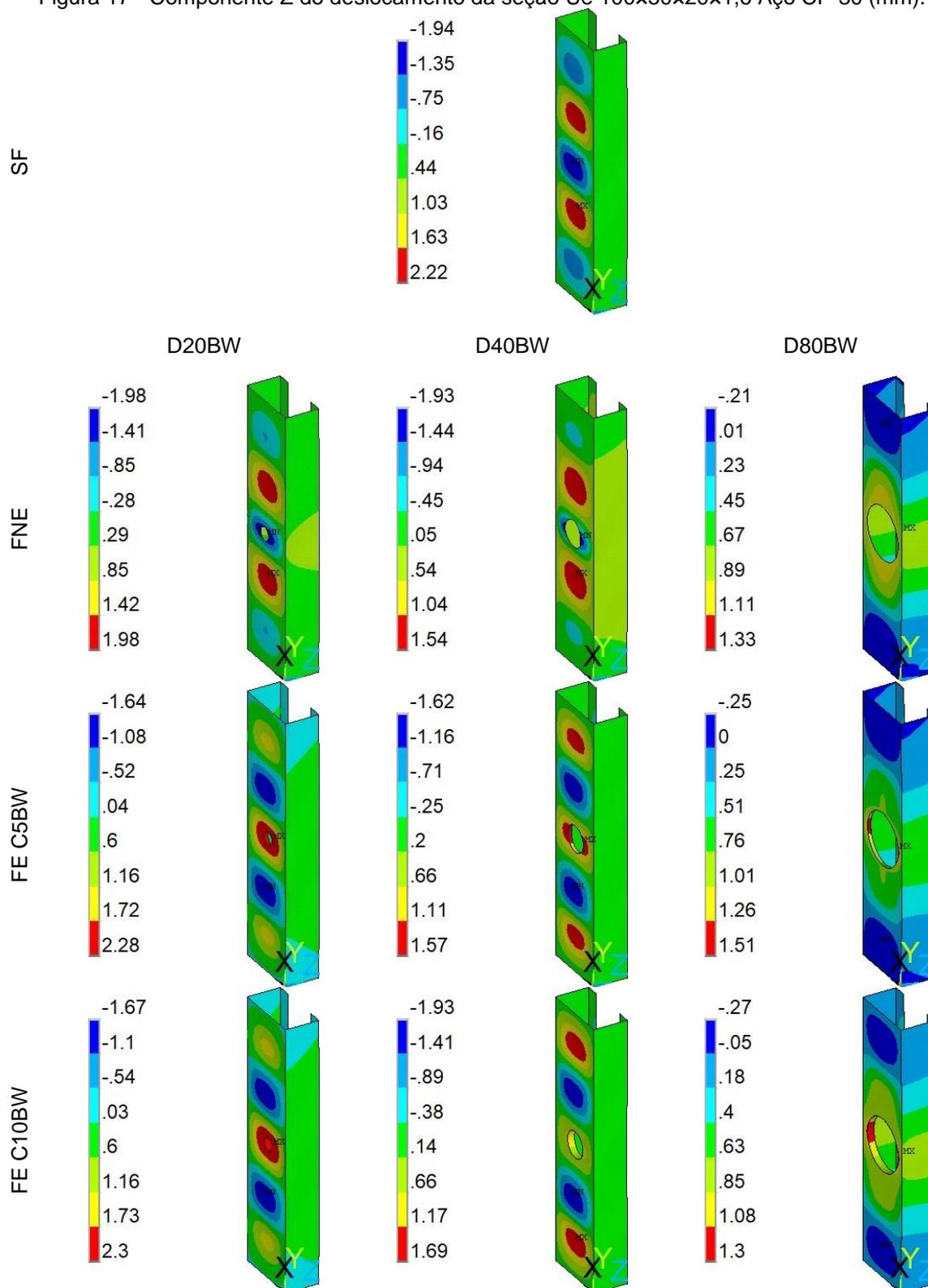
Figura 16 - Tensão de von Mises seção Ue 100x50x20x1,6 Aço CF-30 (MPa).



Fonte: O autor.

A Figura 17 apresenta a componente do deslocamento na direção Z, ou seja, na direção normal ao plano da alma dos perfis. Pode-se verificar no perfil sem furo a formação de cinco meias-ondas na alma. Este comportamento se repetiu de forma aproximada em todas outras configurações de perfuração, variando apenas a região de ocorrência e valor máximo da componente de deslocamento na direção Z, exceto nos perfis com furo enrijecido e não enrijecido de diâmetro igual a 80% b_w que não acompanharam este padrão. O deslocamento máximo para o perfil sem furo foi 2,22 mm, localizado a uma distância de aproximadamente um terço das extremidades do perfil. Nos perfis com furo não enrijecido de diâmetros iguais a 20% b_w e a 40% b_w o deslocamento máximo foi de 1,98 mm e 1,93 mm respectivamente, no entorno do furo, ou seja, à meia altura do perfil. O perfil com furo enrijecido de diâmetro igual a 20% b_w e comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5% b_w apresentou deslocamento máximo de 2,28 mm na região do furo. O perfil com furo enrijecido de diâmetro igual a 40% b_w e comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5% b_w apresentou deslocamento máximo de 1,62 mm a uma distância de aproximadamente um terço das extremidades do perfil. O perfil com furo enrijecido de diâmetro igual a 20% b_w e comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 10% b_w apresentou deslocamento máximo de 2,3 mm na região do furo. O perfil com furo enrijecido de diâmetro igual a 40% b_w e comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 10% b_w apresentou deslocamento máximo de 1,93 mm a uma distância de aproximadamente um terço das extremidades do perfil. O perfil com furo não enrijecido de diâmetro igual a 80% b_w apresentou deslocamento máximo igual 1,33 mm no flange de ligação (enrijecedor longitudinal) a meia altura do perfil. Os perfis com furo enrijecido de diâmetro igual a 80% b_w e comprimento do enrijecedor da borda do furo iguais a 5% b_w e 10% b_w apresentaram deslocamento máximo de 1,51 mm e 1,3 mm, respectivamente, ambos localizado nas extremidades laterais do furo.

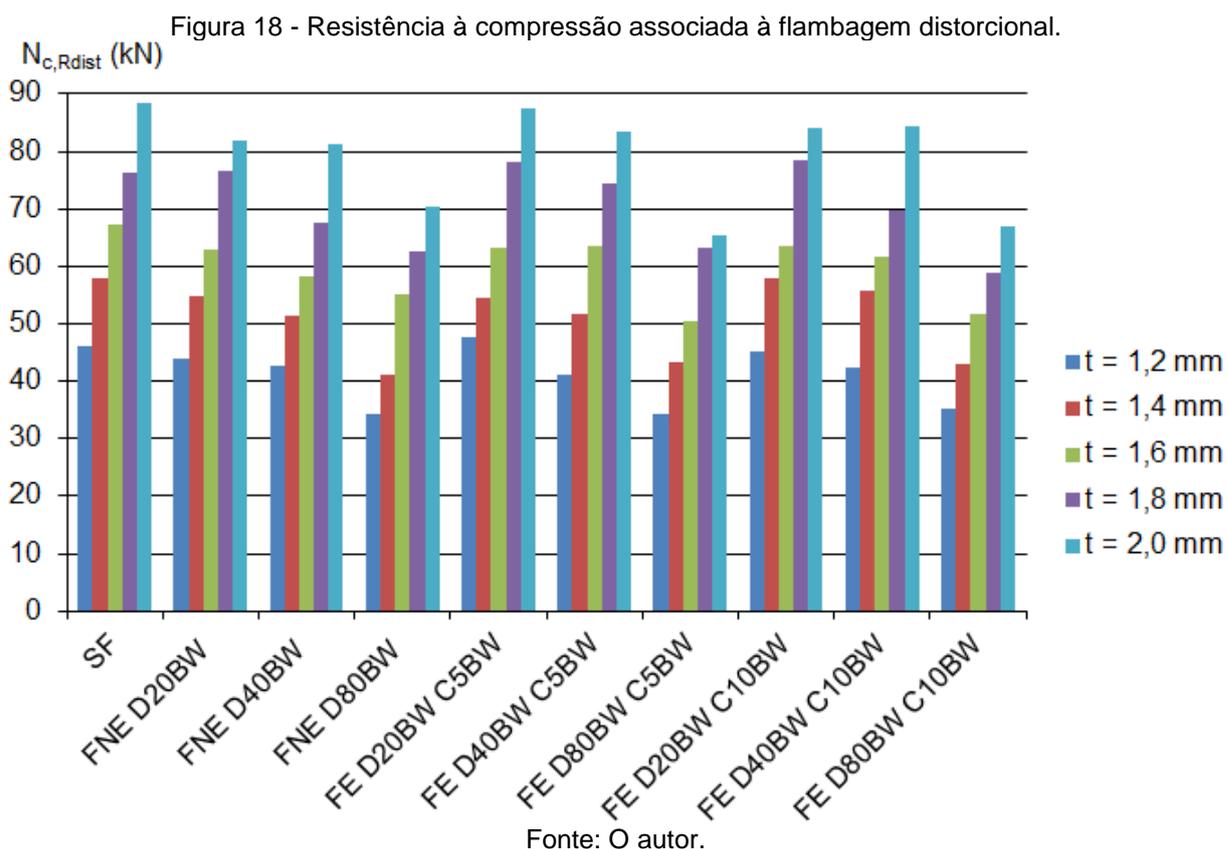
Figura 17 - Componente Z do deslocamento da seção Ue 100x50x20x1,6 Aço CF-30 (mm).



Fonte: O autor.

4.2 Flambagem Distorcional

A Figura 18 apresenta os valores característicos da força axial de compressão resistente, associados à flambagem distorcional, em função da configuração da perfuração e da espessura da chapa para a seção Ue 50x45x10 com o aço CF-30.



A partir do gráfico apresentado na Figura 18 é possível verificar que quanto maior a espessura da chapa, maior é a resistência do perfil para uma mesma configuração de perfuração. Para os perfis com furo não enrijecido (FNE) quanto maior o diâmetro do furo, menor é a resistência do perfil para uma mesma espessura de chapa. Ao avaliar os perfis com furo enrijecido (FE) com comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5% b_w e 10% b_w , pode-se verificar, que em alguns casos, houve um pequeno aumento na capacidade resistente em comparação com os perfis com furo não enrijecido (FNE), porém, em geral não alcançou os patamares dos perfis sem furo (SF). Os perfis com furo enrijecido e não enrijecido com diâmetro igual a 80% b_w apresentaram diminuição da capacidade resistente em comparação aos perfis sem furo.

A Tabela 7 apresenta a relação entre o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional para os perfis com furos enrijecidos ($N_{c,Rdist-FE}$) ou não enrijecidos ($N_{c,Rdist-FNE}$), e o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional para os perfis sem furos ($N_{c,Rdist-SF}$), sendo: $N_{c,Rdist-FE} / N_{c,Rdist-SF}$ ou $N_{c,Rdist-FNE} / N_{c,Rdist-SF}$, para a seção Ue 50x45x10 com o aço CF-30.

Tabela 7 - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos.

Seção	t = 1,2 mm	t = 1,4 mm	t = 1,6 mm	t = 1,8 mm	t = 2,0 mm
FNE D20BW	0,95	0,95	0,94	1,00	0,92
FNE D40BW	0,93	0,89	0,87	0,89	0,92
FNE D80BW	0,74	0,71	0,82	0,82	0,80
FE D20BW C5BW	1,03	0,94	0,94	1,02	0,99
FE D40BW C5BW	0,89	0,89	0,95	0,97	0,94
FE D80BW C5BW	0,74	0,75	0,75	0,83	0,74
FE D20BW C10BW	0,98	1,00	0,95	1,03	0,95
FE D40BW C10BW	0,92	0,96	0,92	0,91	0,95
FE D80BW C10BW	0,76	0,74	0,77	0,77	0,76

Fonte: O autor.

A partir da Tabela 7 é possível verificar que, em geral, no âmbito da flambagem distorcional a relação $N_{c,Rdist-FNE} / N_{c,Rdist-SF}$ e a relação $N_{c,Rdist-FE} / N_{c,Rdist-SF}$ foram menores do que 1. Isto indica que a capacidade resistente, em geral, diminuiu ao inserir uma perfuração na alma do perfil, independente da espessura e da configuração de perfuração.

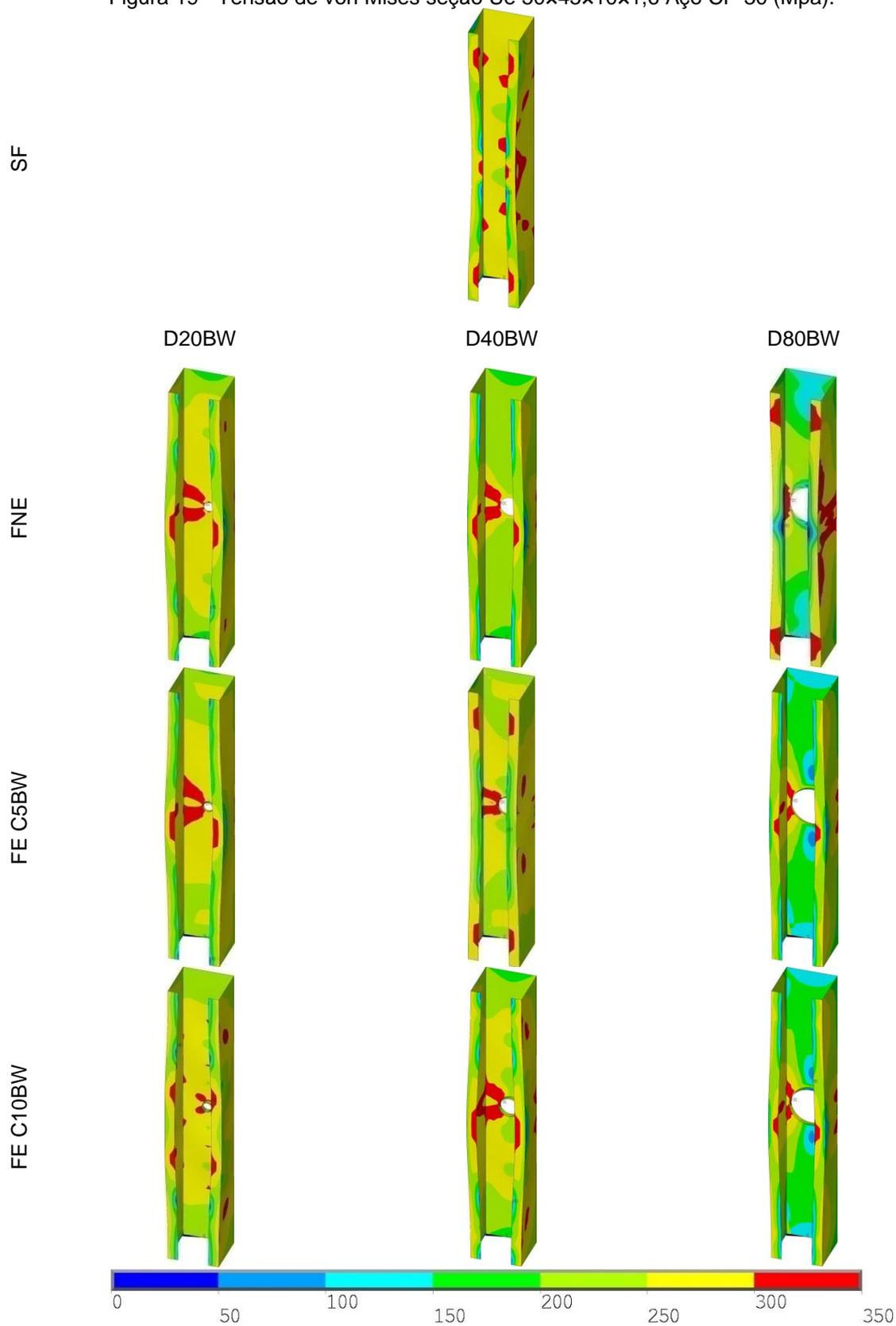
A partir da Tabela 7 é possível verificar que para os perfis com furos não enrijecidos a relação $N_{c,Rdist-FNE} / N_{c,Rdist-SF}$ foi menor do que 1 em todos os casos, indicando o efeito deletério da perfuração não enrijecida na resistência dos perfis, e a relação foi tão menor quanto maior foi o diâmetro do furo não enrijecido, chegando a 0,71 para a seção Ue 50x45x10x1,4 FNE D80BW. Os perfis com furo não enrijecido de diâmetro de 80% b_w apresentaram um comportamento destacado com as menores relações $N_{c,Rdist-FNE} / N_{c,Rdist-SF}$, variando entre 0,82 e 0,71.

Os únicos perfis que apresentaram a relação $N_{c,Rdist-FE} / N_{c,Rdist-SF}$ maior do que 1 foram os perfis com furos enrijecidos de diâmetro igual a 20% b_w e

comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5% b_w com espessura da chapa igual a 1,2 mm e 1,8 mm os quais apresentaram respectivamente a relação $N_{c,Rdist-FE} / N_{c,Rdist-SF}$ iguais a 1,03 e 1,02. Os perfis com furos enrijecidos de diâmetro igual a 20% b_w e comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 10% b_w com espessura da chapa igual a 1,4 mm e 1,8 mm apresentaram respectivamente a relação $N_{c,Rdist-FE} / N_{c,Rdist-SF}$ iguais a 1,00 e 1,03. Os perfis com furos enrijecidos de diâmetro igual a 80% b_w se destacaram pelas relações $N_{c,Rdist-FE} / N_{c,Rdist-SF}$ menores do que 1, independente do comprimento do enrijecedor da borda do furo.

A Figura 19 e a Figura 20 apresentam, respectivamente, a tensão de von Mises e a componente X de deslocamento (direção normal ao plano dos flanges) dos perfis para todas as configurações de perfurações da seção Ue 50x45x10x1,6 com o aço CF-30 de tensão de escoamento f_y igual a 300 MPa. A organização das dez imagens que compõem a Figura 19 e a Figura 20 se deu da seguinte forma: as linhas diferenciam a configuração de perfuração e as colunas diferenciam o diâmetro da perfuração. A imagem da primeira linha representa o perfil sem perfuração, as três imagens da segunda linha representam os perfis com perfurações não enrijecidas, as três imagens da terceira linha representam os perfis com perfurações enrijecidas com o comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5% b_w e as três imagens da quarta linha representam os perfis com perfurações enrijecidas com o comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 10% b_w . As três imagens da primeira coluna representam os perfis perfurações de diâmetro igual a 20% b_w , as três últimas imagens da segunda coluna representam os perfis perfurações de diâmetro igual a 40% b_w e as três imagens da terceira coluna representam os perfis perfurações de diâmetro igual a 80% b_w .

Figura 19 - Tensão de von Mises seção Ue 50x45x10x1,6 Aço CF-30 (Mpa).



Fonte: O autor.

Na Figura 19 as regiões de cor vermelha correspondem às regiões em que as tensões superam a tensão de escoamento, neste caso $f_y=300$ MPa. O perfil sem furo apresenta pequenas regiões, que atingem o escoamento, localizadas nos flanges e na alma. Os perfis com furo não enrijecido de diâmetros iguais a $20\% b_w$ e $40\% b_w$ apresentam regiões, que atingem o escoamento, localizadas à meia altura nos flanges e na alma. O perfil com furo enrijecido de diâmetro igual a $20\% b_w$ e comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a $5\% b_w$ apresentou comportamento similar com regiões que atingem o escoamento localizadas à meia altura nos flanges e na alma. O perfil com furo enrijecido de diâmetro igual a $40\% b_w$ e comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a $5\% b_w$ apresentou regiões, que atingem o escoamento, localizadas à meia altura na alma, pequenas regiões no flange e no flange de ligação (enrijecedor longitudinal) regiões próximas a extremidade do perfil. O perfil com furo enrijecido de diâmetro igual a $20\% b_w$ e comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a $10\% b_w$ apresentou pequenas regiões, que atingem o escoamento, localizadas na alma próxima ao furo em sua maioria e nos flanges próximas às extremidades. O perfil com furo enrijecido de diâmetro igual a $40\% b_w$ e comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a $10\% b_w$ apresentou regiões, que atingem o escoamento, localizadas na alma próxima ao furo e nos flanges à meia altura do perfil.

O perfil com furo não enrijecido de diâmetro igual a $80\% b_w$ apresentou regiões, que atingem o escoamento, localizadas a meia altura na alma surgindo nas extremidades laterais da perfuração e expandindo ao se aproximar da junção da alma com o flange, nos flanges estas regiões estão localizadas a meia altura do perfil e nos flanges de ligação (enrijecedor longitudinal) estas regiões estão localizadas nas extremidades dos perfis.

Os perfis com furo enrijecido de diâmetro igual a $80\% b_w$ e comprimento do enrijecedor da borda do furo iguais a $5\% b_w$ e $10\% b_w$ apresentaram comportamento similar. As regiões que atingem o escoamento estão localizadas a meia altura da alma, surgindo nas extremidades laterais da perfuração e expandindo ao se aproximar e da junção da alma com o flange e ultrapassando-a, nos flanges de ligação (enrijecedor longitudinal), também estão localizados a meia altura dos perfis.

A Figura 20 apresenta a componente do deslocamento na direção X, ou seja, na direção normal ao plano dos flanges dos perfis. Pode-se verificar que todos

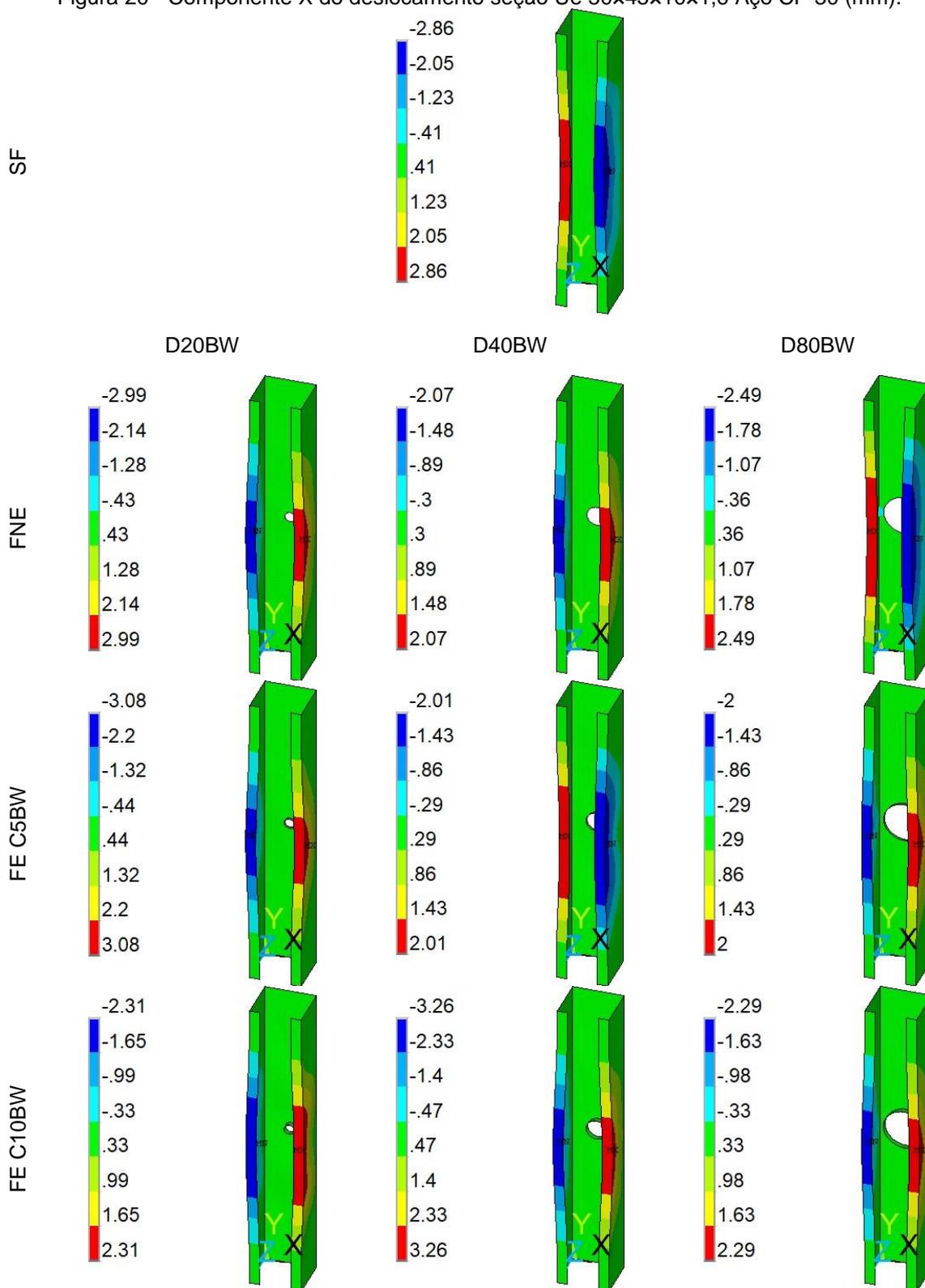
os perfis apresentaram um comportamento similar com relação ao deslocamento independentemente da configuração de perfuração, com afastamento ou aproximação dos flanges de ligação (enrijecedor longitudinal) das seções formando uma meia-onda. O valor máximo da componente X do deslocamento ocorreu na região dos flanges de ligação (enrijecedor longitudinal), à meia altura do perfil, de forma simétrica, ou seja, os flanges se aproximam ou se afastam com mesmo deslocamento formando uma meia onda.

A partir da Figura 20 pode-se verificar que o perfil sem furo apresenta uma aproximação dos flanges de ligação (enrijecedor longitudinal) com deslocamento máximo na direção X de 2,86 mm a meia altura, enquanto os perfis com furo não enrijecido de diâmetros iguais a 20% b_w e 40% b_w apresentam afastamento dos mesmos com deslocamento máximo na direção X de 2,99 mm e 2,07 mm respectivamente. O perfil com furo não enrijecido de diâmetro igual a 80% b_w apresenta uma aproximação dos flanges de ligação (enrijecedor longitudinal) com deslocamento máximo na direção X de 2,49 mm a meia altura.

Os perfis com furo enrijecido de diâmetros iguais a 20% b_w e 80% b_w e comprimento do enrijecedor da borda do furo igual 5% b_w apresentaram um afastamento dos flanges de ligação (enrijecedor longitudinal) com deslocamento máximo na direção X de, respectivamente, 3,08 mm e 2 mm a meia altura, enquanto que para o perfil com furo enrijecido de diâmetro iguais a 40% b_w de mesmo comprimento do enrijecedor da borda do furo apresentou uma aproximação dos flanges de ligação (enrijecedor longitudinal) com deslocamento máximo na direção X de 2,01 mm.

Os perfis com furo enrijecido de diâmetros iguais a 20% b_w , 40% b_w e 80% b_w e comprimento do enrijecedor da borda do furo igual 10% b_w apresentaram comportamento similar com um afastamento dos flanges de ligação (enrijecedor longitudinal) variando apenas o valor do deslocamento máximo na direção X com os respectivos valores de 2,31mm, 3,26mm e 2,29, todos localizados à meia altura do perfil.

Figura 20 - Componente X do deslocamento seção Ue 50×45×10×1,6 Aço CF-30 (mm).



Fonte: O autor.

5 CONCLUSÕES

Os Perfis Formados a Frio possuem uma grande variedade de aplicações e são amplamente utilizados em sistemas de armazenagem e na construção civil em geral. Em diversas situações há a necessidade da presença de furos nos elementos constituintes da sua seção transversal para permitir, por exemplo, o encaixe das ligações entre as barras de um sistema de armazenamento, ou na alma de vigas visando à compatibilização entre projetos de instalações prediais. O entendimento da influência dos mesmos é bastante relevante.

De acordo com Yu (2012), os furos tradicionais presentes nos Perfis Formados a Frio são planos (não enrijecidos) e os tamanhos dos furos e a distância entre os mesmos são muito restritos devido ao enfraquecimento da resistência à flexão. Com o objetivo de superar essas restrições, uma nova geração de perfis com furos na alma foi desenvolvida pela indústria.

Chen *et al.* (2019) mencionam que uma nova geração de Perfis Formados a Frio de seção U enrijecido com aberturas circulares com bordas enrijecidas na alma, desenvolvido por Howick Ltd. (HOWICK, 2020), são amplamente utilizados na Nova Zelândia.

Diversos estudos têm sido realizados visando entender a influência dos furos não enrijecidos através de dados experimentais, métodos numéricos (Método dos Elementos Finitos e Teoria Generalizada de Vigas) e métodos analíticos (Métodos da Resistência Direta), este último em franca evolução com diversas extensões abrangendo colunas com furos não enrijecidos. Porém ainda carece de uma quantidade maior de estudos e, como consequência, orientações diretas normativas para Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos.

Este trabalho visa contribuir com a linha de pesquisas de Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos na alma submetidos à compressão centrada. Para isto, um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) implementado através do *software* ANSYS foi proposto e validado por comparação com resultados experimentais presentes na literatura. Um conjunto de 300 simulações foi realizado utilizando o modelo numérico proposto válido, avaliando dois modos de flambagem: local e distorcional e três aços com tensões de escoamento diferentes: CF-30, ZAR 250 e ZAR 400. Foram avaliados perfis sem

furo (SF), perfis com um furo não enrijecido (FNE) e perfis com um furo enrijecido (FE). Foram adotados três diâmetros para o furo e adotados dois comprimentos do enrijecedor da borda do furo.

Para as condições de geometria estudadas: colunas sem furos, colunas com um furo não enrijecido e colunas com um furo enrijecido localizados à meia altura da coluna os resultados numéricos indicam que a inserção do enrijecedor na borda do furo apresentou um comportamento distinto entre os modos de flambagem. Foi perceptível que, para as condições de geometria estudadas, o modo de flambagem local apresentou maiores ganhos (recuperação) de capacidade resistente do que o modo de flambagem distorcional para as condições.

As colunas com perfurações de diâmetro igual a 80% da largura da alma (b_w) apresentaram um comportamento destacado com as menores capacidade resistente a compressão, apesar do pequeno ganho (recuperação) de capacidade resistente ao inserir o enrijecedor na borda da perfuração comparado com colunas com furos não enrijecido, não foi o suficiente para igualar a configuração sem furo.

Para as seções sujeitas a flambagem distorcional com aço CF-30 a configuração de perfuração com furo não enrijecido de diâmetro igual a 40% da largura da alma (b_w) apresentou uma redução média da capacidade resistente igual a 10,24 % da capacidade resistente a compressão das colunas sem furo. Ao inserir o enrijecedor na borda do furo com comprimento igual a 5% a largura da alma (b_w) essa redução média da capacidade resistente a compressão foi igual a 7,02% da capacidade resistente a compressão das colunas sem furo. E ao inserir o enrijecedor na borda do furo com comprimento igual a 10% a largura da alma (b_w) essa redução média da capacidade resistente a compressão foi igual a 6,73% da capacidade resistente das colunas sem furo.

Para as seções sujeitas a flambagem local com aço CF-30 a configuração de perfuração com furo não enrijecido de diâmetro igual a 40% a largura da alma (b_w) apresentou uma redução média da capacidade resistente a compressão igual a 6,08 % da capacidade resistente a compressão das colunas sem furo. Ao inserir o enrijecedor na borda do furo com comprimento igual a 5% a largura da alma (b_w) houve um aumento médio da capacidade resistente a compressão igual a 0,66 % da capacidade resistente das colunas sem furo. E ao inserir o enrijecedor na borda do furo com comprimento igual a 10% a largura da alma (b_w) houve um aumento médio

da capacidade resistente igual a 2,02 % da capacidade resistente a compressão das colunas sem furo.

Para trabalhos futuros podem ser sugeridos:

- Realizar estudos experimentais com Perfis Formados a Frio com furos enrijecidos;
- Avaliar a capacidade do modelo proposto com mais resultados experimentais para modos de flambagem isolados ou em interação;
- Avaliar a influência da quantidade de perfurações ou conseqüentemente o espaçamento entre as perfurações localizadas na alma na capacidade resistente das colunas;
- Inserir no modelo numérico a curvatura (concordância) entre os elementos constituintes da seção transversal, incluindo a junção entre o enrijecedor da borda do furo e a alma.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **AISI S100-16**: north american specification for the design of cold-formed steel structural members: AISI, 2016.
- 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. **ABNT NBR 14762**: dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6355**: perfis estruturais de aço formados a frio : padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD. **AS/NZS 4600:2018**: cold-formed steel structures: AS/NZS, 2018
- 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**, v. 47, ed. 11, p.1218–1231, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.04.004>.
- 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2016.06.014>.
- CARVALHO, P. R. de; GRICOLETTI, G.; BARBOSA, G. D. **Curso Básico de Perfis Formados a Frio**. 3. ed. Porto Alegre: Ed. Porto Alegre, 2014.
- CHEN, B.; ROY, K.; UZZAMAN, A.; RAFTERY, G.; LIM, J. B. P. Parametric study and simplified design equations for cold-formed steel channels with edge-stiffened holes under axial compression. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 172, p. 1-27, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106161>.
- CHEN, B.; ROY, K.; UZZAMAN, A.; RAFTERY, G.; LIM, J. B. P. Axial strength of back-to-back cold-formed steel channels with edge-stiffened holes, un-stiffened holes and plain webs. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 174, p. 1-22, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106313>.
- CHEN, B.; ROY, K.; UZZAMAN, A.; RAFTERY, G.; NASH, D., CLIFTON, G. C., POULADI, P.; LIM, J. B. P. Effects of edge-stiffened web openings on the behaviour of cold formed steel channel sections under compression. **Thin-Walled Structures**, v. 144, p. 1-21, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106307>.
- EUROPEAN STANDARDS. **BS EN 1993-1-3:2006**: eurocode 3: design of steel structures: general rules: supplementary rules for cold-formed members and sheeting. 2006.

FARIA, V. O. **Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

GREY, C.N.; MOEN, C.D. Elastic buckling simplified methods for cold-formed columns and beams with edge-stiffened holes. **Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council**, Pittsburgh, Pennsylvania, p. 1-12. 2011.

HOWICK, 2020 Disponível em: <https://www.howickltd.com/>. Acesso em: 2 fev. 2021.

JARDIM JR, F. **Estudo da viabilidade do método da resistência direta em perfis U enrijecidos formados a frio com perfurações**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

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

KULATUNGA, M. P.; MACDONALD, M. Investigation of cold-formed steel structural members with perforations of different arrangements subjected to compression loading. **Thin-Walled Structures**, v. 137, p. 78-87, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2013.02.014>.

KULATUNGA, M. P.; MACDONALD, M.; RHODES, J.; HARRISON, D. K. Load capacity of cold-formed column members of lipped channel cross-section with perforations subjected to compression loading – Part I: FE simulation and test results. **Thin-Walled Structures**, v. 80, p. 1-12, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2014.02.017>.

MOEN, C.D.; SCHAFER, B. W. Direct Strength Design for Cold-Formed Steel Members With Holes, Final Report, **American Iron and Steel Institute**, Washington, DC, 2009.

MOEN, C. D.; SCHAFER, B. W. Direct strength method for design of cold-formed steel columns with holes. **Journal of Structural Engineering**, v. 137, ed. 5, p. 559-570, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000310](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000310).

SALES, A. E. C. A. **Análise da aplicação do método da resistência direta a perfis formados a frio com perfurações submetidos à compressão**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SCHAFER, B. W. Advances in the Direct Strength Method of cold-formed steel design. **Thin-Walled Structures**, v. 140, p. 533-541, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.001>.

SOUZA, F. T. de. **Análise teórico-experimental de sistemas apertados com elementos perfurados em perfis formados a frio – rack**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

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

SOUZA, F. T. de; SANTOS, E. T. dos; SARMANHO, A. M. C. Análise numérica da influência das dimensões de perfurações em perfis formados a frio do tipo rack submetidos à compressão. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, Paranaguá, PR, v. 5, n. 5, p. 1-266, 2020. DOI: 10.21575/25254782rmetg2020vol5n51128.

UZZAMAN, A.; LIM, J. B. T.; NASH, D.; YOUNG, B. Effects of edge-stiffened circular holes on the web crippling strength of cold-formed steel channel sections under one-flange loading conditions. **Engineering Structures**, v. 139, p. 96-107, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.042>.

WINTER, G.; Strength of Thin Steel Compression Flanges. **Transactions American Society of Civil Engineers**, v. 112, ed.1, p. 527-554, 1947.

YU, C.; Cold-formed steel flexural member with edge stiffened holes: behavior, optimization, and design. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 71, p. 210-218, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.09.008>.

APÊNDICE

A - Flambagem Local

Aço ZAR 250

Figura 21 - Resistência à compressão associada à flambagem local ZAR 250.

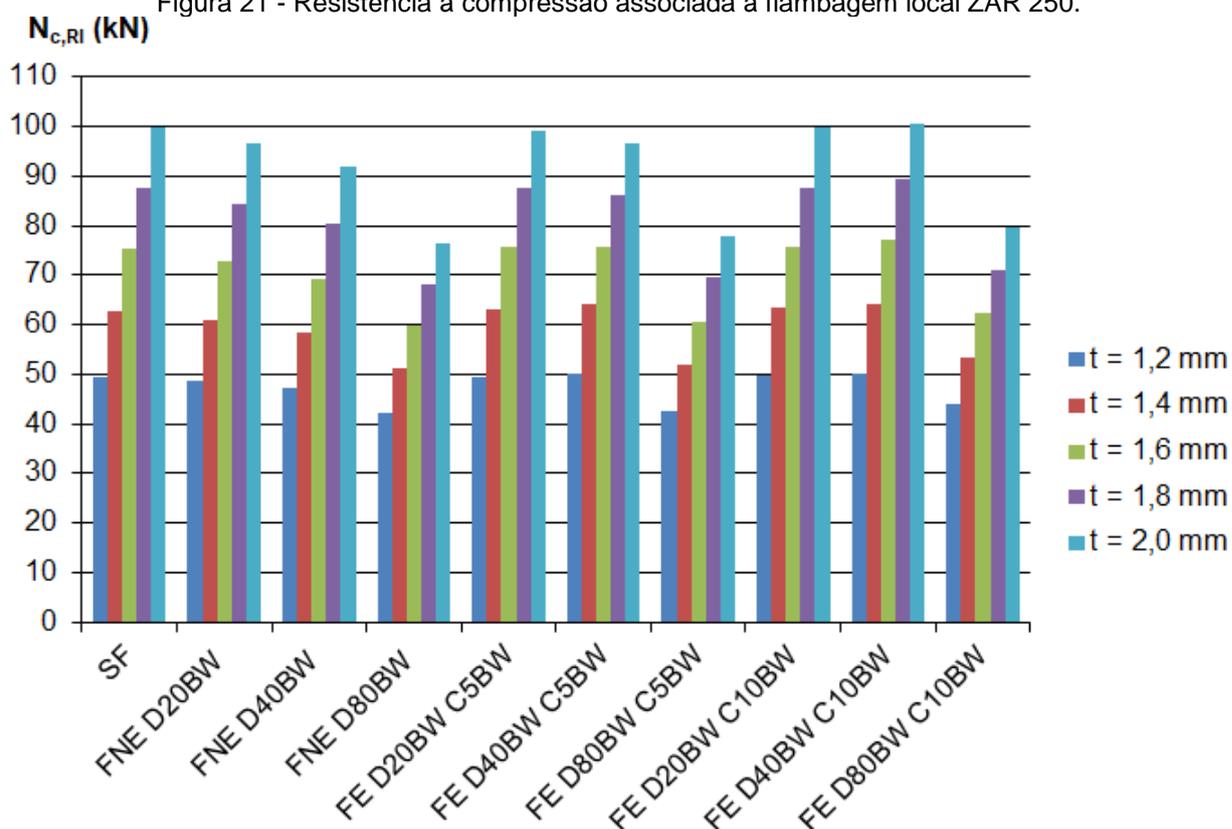


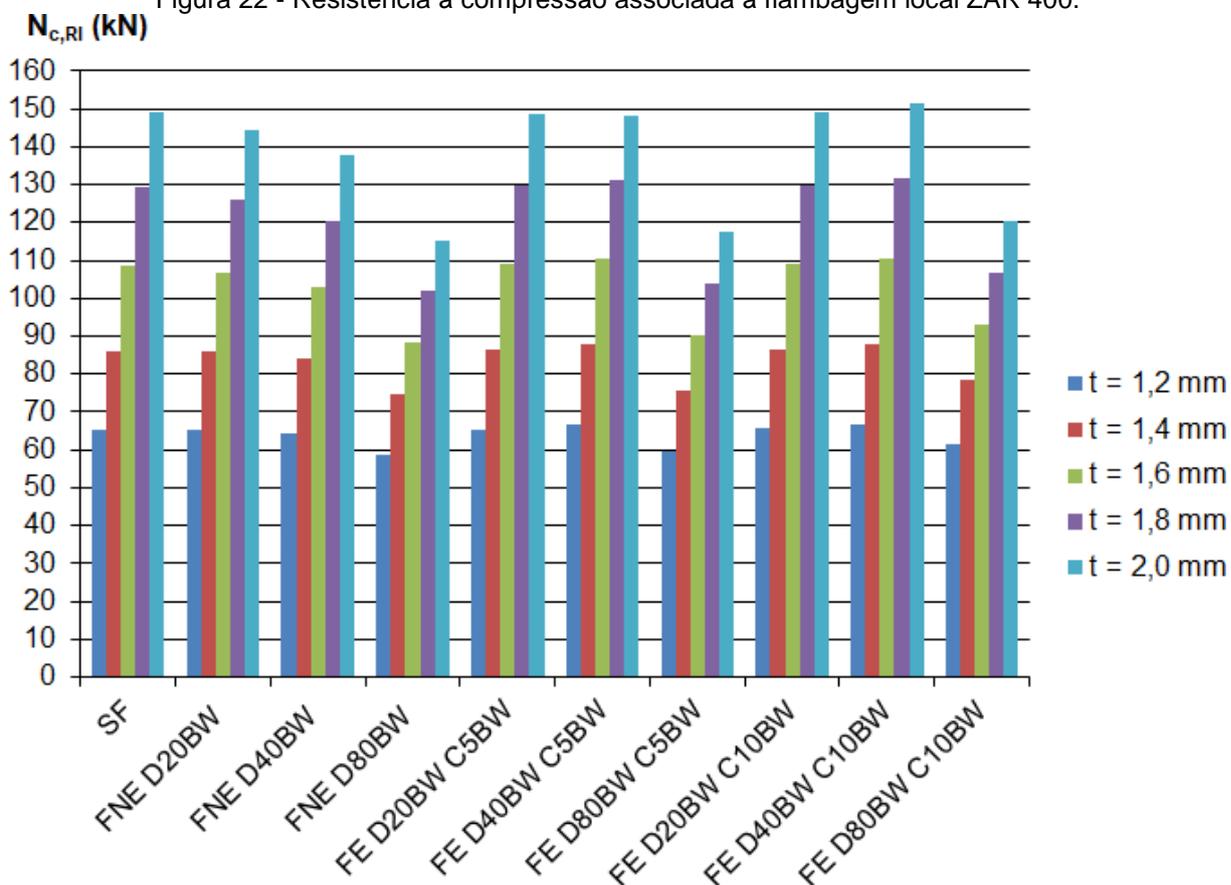
Tabela 8 - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos.

Seção	t = 1,2 mm	t = 1,4 mm	t = 1,6 mm	t = 1,8 mm	t = 2,0 mm
FNE D20BW	0,99	0,97	0,97	0,96	0,97
FNE D40BW	0,96	0,93	0,92	0,92	0,92
FNE D80BW	0,86	0,82	0,80	0,78	0,77
FE D20BW C5BW	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00
FE D40BW C5BW	1,02	1,02	1,00	0,98	0,97
FE D80BW C5BW	0,87	0,83	0,81	0,79	0,78
FE D20BW C10BW	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00
FE D40BW C10BW	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01
FE D80BW C10BW	0,89	0,85	0,83	0,81	0,80

Fonte: O autor.

Aço ZAR 400

Figura 22 - Resistência à compressão associada à flambagem local ZAR 400.



Fonte: O autor.

Tabela 9 - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos.

Seção	t = 1,2 mm	t = 1,4 mm	t = 1,6 mm	t = 1,8 mm	t = 2,0 mm
FNE D20BW	1,00	1,00	0,98	0,97	0,97
FNE D40BW	0,98	0,98	0,95	0,93	0,92
FNE D80BW	0,90	0,86	0,82	0,79	0,77
FE D20BW C5BW	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00
FE D40BW C5BW	1,02	1,02	1,02	1,01	0,99
FE D80BW C5BW	0,91	0,88	0,83	0,80	0,79
FE D20BW C10BW	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00
FE D40BW C10BW	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
FE D80BW C10BW	0,94	0,91	0,86	0,83	0,81

Fonte: O autor.

B - Flambagem Distorcional

Aço ZAR 250

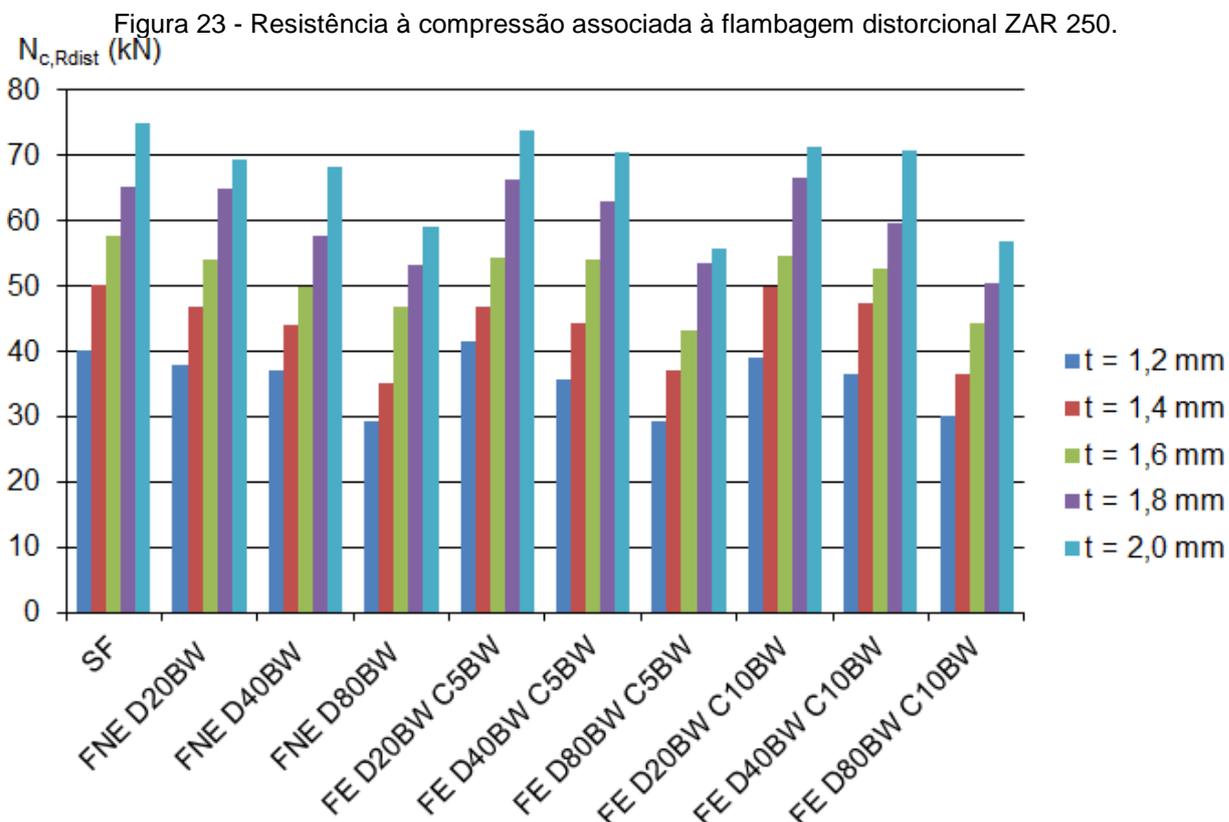


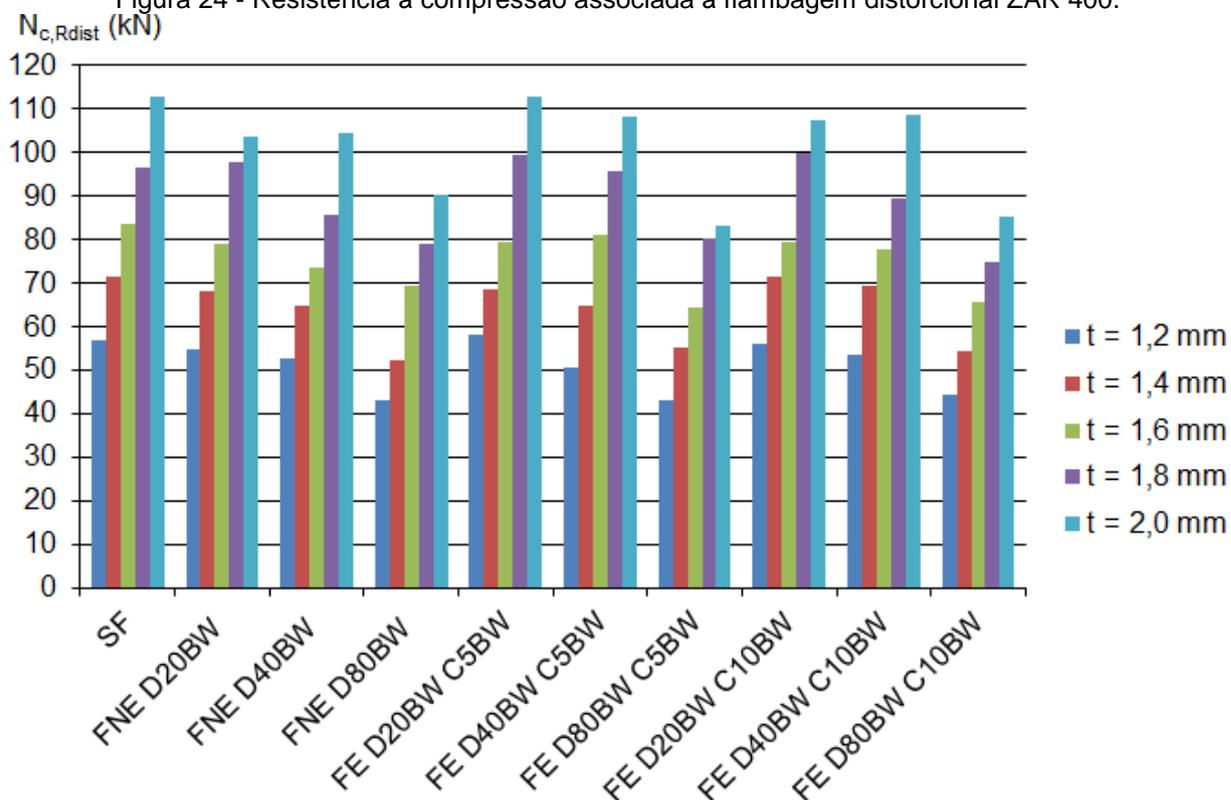
Tabela 10 - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos.

Seção	t = 1,2 mm	t = 1,4 mm	t = 1,6 mm	t = 1,8 mm	t = 2,0 mm
FNE D20BW	0,95	0,93	0,94	0,99	0,93
FNE D40BW	0,92	0,88	0,86	0,88	0,91
FNE D80BW	0,73	0,70	0,81	0,82	0,79
FE D20BW C5BW	1,04	0,93	0,94	1,02	0,99
FE D40BW C5BW	0,89	0,88	0,94	0,97	0,94
FE D80BW C5BW	0,73	0,74	0,75	0,82	0,74
FE D20BW C10BW	0,97	1,00	0,95	1,02	0,95
FE D40BW C10BW	0,91	0,95	0,91	0,91	0,95
FE D80BW C10BW	0,75	0,73	0,77	0,77	0,76

Fonte: O autor.

Aço ZAR 400

Figura 24 - Resistência à compressão associada à flambagem distorcional ZAR 400.



Fonte: O autor.

Tabela 11 - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos.

Seção	t = 1,2 mm	t = 1,4 mm	t = 1,6 mm	t = 1,8 mm	t = 2,0 mm
FNE D20BW	0,97	0,95	0,95	1,01	0,92
FNE D40BW	0,93	0,91	0,88	0,89	0,92
FNE D80BW	0,76	0,73	0,83	0,82	0,80
FE D20BW C5BW	1,03	0,96	0,95	1,03	1,00
FE D40BW C5BW	0,89	0,91	0,97	0,99	0,96
FE D80BW C5BW	0,76	0,77	0,77	0,83	0,74
FE D20BW C10BW	0,99	1,00	0,95	1,03	0,95
FE D40BW C10BW	0,94	0,97	0,93	0,92	0,96
FE D80BW C10BW	0,78	0,76	0,79	0,78	0,75

Fonte: O autor.