



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



Análise da influência das dimensões de perfurações em perfis formados a frio tipo U enrijecidos sujeitos à flambagem distorcional submetidos à compressão centrada

Ouro Preto

2021



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



Letícia Caroline Policarpo Oliveira

Análise da influência das dimensões de perfurações em perfis formados a frio tipo U enrijecidos sujeitos à flambagem distorcional submetidos à compressão centrada

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 parcial para obtenção do título de Mestre em Construção Metálica.

Orientadores: Prof. Flávio Teixeira de Souza D.Sc.
Prof^a. Arlene Maria Cunha Sarmanho D.Sc.

Ouro Preto
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O48a Oliveira, Letícia Caroline Policarpo.

Análise da influência das dimensões de perfurações em perfis formados a frio tipo U enrijecidos sujeitos à flambagem distorcional submetidos à compressão centrada. [manuscrito] / Letícia Caroline Policarpo Oliveira. Letícia Caroline Policarpo Oliveira. - 2021.
115 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.

1. Construção metálica. 2. Chapas de aço - Processo a frio. 3. Flambagem (Mecânica) . 4. Método da Resistência Direta (MRD). I. Oliveira, Letícia Caroline Policarpo. II. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. III. Souza, Flávio Teixeira de. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 624.014.2

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

Letícia Caroline Policarpo Oliveira

Análise da influência das dimensões de perfurações em perfis formados a frio tipo U enrijecido sujeitos à flambagem distorcional submetidos à compressão centrada

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

Aprovada em 03 de fevereiro de 2021

Membros da banca

Doutor - Flávio Teixeira de Souza - Orientador - Instituto Federal de Minas Gerais - Ouro Preto
Doutor - Arlene Maria Cunha Sarmanho - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Vinicius Nicchio Russo - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Mario Luis Cabello Russo - Instituto Federal de Minas Gerais - Ouro Preto

Flávio Teixeira de Souza, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 25/02/2021



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Donizetti de Paula, COORDENADOR(A) DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DAS CONSTRUÇÕES**, em 03/03/2021, às 08:07, 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 **0139543** e o código CRC **A4D3336C**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.001784/2021-13

SEI nº 0139543

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

AGRADECIMENTOS

A **Deus** e a **Nossa Senhora Aparecida**, por permitirem realizar tantos sonhos.

Aos meus pais **Jaime** e **Glória**, pelo amor e apoio imensuráveis sem os quais não estaria aqui. Sinto-me orgulhosa e privilegiada por ter pais tão especiais.

À minha irmã **Isadora**, sempre pronta a me apoiar em tudo nesta vida.

À minha avó **Tereza**, por sempre se lembrar de mim em suas orações.

Ao meu noivo **Ronie César**, por todo amor, carinho, compreensão e apoio em tantos momentos difíceis desta caminhada.

Ao professor e sempre amigo **Flávio Teixeira**. Foi através do seu exemplo como professor e profissional, que me espelhei e decidi fazer engenharia civil. Obrigada por toda paciência, empenho, pelas constantes demonstrações de sabedoria e humildade e por sempre acreditar em mim.

A minhas amigas **Renata, Jéssica Silva, Jéssica Ferreira, Jhoyce, Marilda, Maraysa, Júlia, Thaís e Cristiane** por sempre me incentivarem.

Ao meu amigo e colega de pesquisa **Ramon**, por toda ajuda e auxílio prestado em inúmeras vezes.

Às minhas famílias “**Policarpo**”, “**Oliveira**” e “**Lois**” pela força e pelo carinho que sempre me dedicaram ao longo de toda a minha vida.

Agradeço, por fim, à **Universidade Federal de Ouro Preto** e à **Escola de Minas** pelo acolhimento e formação profissional.

“Se você não puder se destacar pelo talento, vença pelo esforço.”

Dave Weinbaum

RESUMO

Os perfis formados a frio apresentam-se como resposta para variados tipos de sistemas estruturais, visto que o desenvolvimento da indústria metálica no mundo torna contínua a busca por estruturas mais leves, econômicas, eficientes e racionais. A elevada relação largura/espessura (esbeltez local) acentua a ocorrência de fenômenos de instabilidade, tais como modos local, distorcional e global, isolados ou em interação, que ocorre quando as cargas críticas coincidem ou apresentam valores próximos. Quando há interação entre esses modos, aumenta-se a complexidade para dar um prognóstico da capacidade de carga e do comportamento do elemento estrutural. Com o crescente uso dos perfis formados a frio, torna-se necessário um estudo aprofundado para entender como esses fenômenos interferem na capacidade resistente desse tipo de perfil. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência das perfurações na estabilidade e na força axial de compressão resistente dos perfis formados a frio do tipo U enrijecido sujeitos à flambagem distorcional, quando submetidos a uma força de compressão, por meio de métodos numéricos e teóricos adaptados para considerar as perfurações. Na presente pesquisa, foram analisados 4 grupos de perfis U enrijecidos, em cinco situações diferentes: perfil sem furos e com furos de comprimento igual a 20%, 40%, 60% e 80% da largura da alma (b_w), sendo eles posicionados a uma distância da aresta alma/flange igual a 20% de b_w , espaçados a uma distância de 40% de b_w e com largura equivalente a 10% de seu comprimento. Como principais conclusões pode-se ressaltar que o método proposto por Sales apresentou melhores resultados e que não há uma variação expressiva para o valor característico da força axial de compressão resistente para o método de MOEN 2, quando se varia a altura do furo.

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

ABSTRACT

Cold-formed profiles present themselves as an answer to various types of structural systems, since the development of the metal industry in the world makes continuous the search for lighter, more economical, efficient and rational structures. The high width/thickness ratio (local slenderness) accentuates the occurrence of instability phenomena, such as local modes, distortional and global, isolated or in interaction, which occurs when the critical loads coincide or present close values. When there is interaction between these modes, the complexity to provide a prognosis of the load capacity and of the behavior of the structural element increases. With the expanding use of cold-formed profiles, an in-depth study is necessary to understand how these phenomena interfere with the resistant capacity of this type of profile. The objective of this academic work is to evaluate the influence of perforations on the stability and on the resistant axial compressive strength of the C section cold-formed profile type subject to distortion buckling, when subjected to a compressive strength, through numerical and theoretical methods, through numerical and theoretical methods adapted to consider the perforations. In the present study, 4 groups of profiles were analyzed, in five different situations: profiles without holes and with holes equal to 20%, 40%, 60% and 80% of the width of the web (bw), being positioned at a distance from the web/flange edge equal to 20% of bw and spaced at a distance of 40% of bw with a width equivalent to 10% of its length. As main conclusions, it can be emphasized that the method proposed by Sales presented better results and that there is no significant variation for the characteristic value of the axial compressive strength for the MOEN 2 method, when the height of the hole is varied.

Keywords: Metallic structures. Cold formed profile. Distorted buckling. Direct Resistance Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Flambagem local em seções tipo U enrijecidas submetido a compressão axial	29
Figura 2: Flambagem distorcional do perfil U enrijecido na compressão simples	29
Figura 3: Flambagem global.....	30
Figura 4: Perfil U enrijecido.....	35
Figura 5: Exemplificação dos valores $t_{web, hole}$ e P_{crd} para o perfil 68x68x20x2,2 no software GBTul.....	42
Figura 6: Exemplificação dos valores t_{fic} e P_{crd} do perfil 68x68x20x2,2, no software GBTul.....	43
Figura 7: Dimensões das perfurações conforme a variação de h_f	47
Figura 8: Dimensões e disposições dos furos dos perfis com perfurações estudados.....	48
Figura 9: Distribuição da malha dos elementos finitos para perfil U enrijecido 50x45x10x1,2, com furo de 80% b_w	49
Figura 10: Acoplamento dos nós das extremidades	50
Figura 11: Nó a meia altura na direção longitudinal	50
Figura 12: Translações ortogonais ao eixo restringidas	51
Figura 13: Carregamentos para o modelo numérico	51
Figura 14: Flambagem distorcional: Seção U enrijecida 50x45x10x1,2.....	52
Figura 15: Modelo gerado via software GBTul.....	55
Figura 16: Modo de flambagem distorcional para as simulações para perfil U enrijecido 75x65x15x2,2 via ANSYS e GBTul.....	55
Figura 17: Comparação dos resultados entre MRD e ANSYS.....	58
Figura 18: Comparação dos resultados.....	58
Figura 19: Resultado das cargas resistentes para os perfis sem furos, $f_y=220$ MPa.....	59
Figura 20: Resultado das cargas resistentes para os perfis sem furos, $f_y=300$ MPa	59
Figura 21: Comparação da dispersão entre os resultados da resistência a compressão propostas pelos métodos teórico e numérico para os perfis U enrijecidos sem furos, sendo apresentados a média e o desvio padrão, respectivamente	59
Figura 22: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 20% b_w - SALES, $f_y=220$ MPa.....	62
Figura 23: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 20% b_w - MOEN 2, $f_y=220$ MPa.....	62
Figura 24: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 20% b_w - SALES, $f_y=300$ MPa.....	62
Figura 25: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 20% b_w - MOEN 2, $f_y=300$ MPa.....	62

Figura 26: Comparação da dispersão entre os resultados da resistência a compressão propostas pelos métodos teórico e numérico dos perfis U enrijecidos com furos 20% bw, sendo apresentados a média e o desvio padrão, respectivamente.....	63
Figura 27: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 40% bw - SALES, fy=220 MPa.....	64
Figura 28: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 40% bw - MOEN 2, fy=220 MPa.....	64
Figura 29: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 40% bw - SALES, fy=300 MPa.....	64
Figura 30: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 40% bw - MOEN 2, fy=300 MPa.....	64
Figura 31: Comparação da dispersão entre os resultados da resistência a compressão propostas pelos métodos teórico e numérico dos perfis U enrijecidos com furos 40% bw, sendo apresentados a média e o desvio padrão, respectivamente	65
Figura 32: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 60% bw - SALES, fy=220 MPa.....	66
Figura 33: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 60% bw, - MOEN 2, fy=220 MPa.....	66
Figura 34: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 60% bw - SALES, fy=300 MPa.....	66
Figura 35: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 60% bw - MOEN 2, fy =300 MPa.....	66
Figura 36: Comparação da dispersão entre os resultados da resistência a compressão propostas pelos métodos teórico e numérico dos perfis U enrijecidos com furos 60% bw, sendo apresentados a média e o desvio padrão, respectivamente	67
Figura 37: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 80% bw- SALES, fy=220 MPa.....	68
Figura 38: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 80% bw, - MOEN 2, fy=220 MPa.....	68
Figura 39: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 80% bw - SALES, fy=300 MPa.....	68
Figura 40: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 80% bw - MOEN 2, fy=300 MPa.....	68
Figura 41: Comparação da dispersão entre os resultados da resistência a compressão propostas pelos métodos teórico e numérico dos perfis U enrijecidos com furos 80% bw, sendo apresentados a média e o desvio padrão, respectivamente.....	69
Figura 42: Comparação entre a curva de dimensionamento da ABNT NBR 14762 e cargas máximas obtidas para modo distorcional de todos os modelos estudados para o método de SALES com tensão de escoamento de 220 MPa.....	70
Figura 43: Comparação entre a curva de dimensionamento da ABNT NBR 14762 e cargas máximas obtidas para modo distorcional de todos os modelos estudados para o método de MOEN 2 com a tensão de escoamento de 220 MPa	71

Figura 44: Comparação entre a curva de dimensionamento da ABNT NBR 14762 e cargas máximas obtidas para modo distorcional de todos os modelos estudados para o método de SALES com tensão de escoamento de 300 MPa.....	71
Figura 45: Comparação entre a curva de dimensionamento da ABNT NBR 14762 e cargas máximas obtidas para modo distorcional de todos os modelos estudados para o método de MOEN 2 com a tensão de escoamento de 300 MPa	72
Figura 46: Redução percentual entre as resistências obtidas no ANSYS dos perfis U_e com perfurações em relação aos perfis U_e sem perfurações para $f_y = 220$ MPa	72
Figura 47: Redução percentual entre as resistências obtidas no ANSYS dos perfis U_e com perfurações em relação aos perfis U_e sem perfurações para $f_y = 300$ MPa	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões das seções transversais analisadas	47
Tabela 2: Dimensões das seções transversais com perfurações analisadas.....	61
Tabela 3: Resumo dos resultados para a Média e Desvio Padrão encontrados para todos os tipos de perfurações.....	65
Tabela 4: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis sem furos – $f_y=220$ MPa	101
Tabela 5: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis sem furos – $f_y=300$ MPa	103
Tabela 6: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 20% b_w , $f_y=220$ MPa.....	105
Tabela 7: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 20% b_w , $f_y=300$ MPa.....	107
Tabela 8: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 40% b_w , $f_y=220$ MPa.....	109
Tabela 9: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 40% b_w , $f_y=300$ MPa.....	111
Tabela 10: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 60% b_w , $f_y=220$ MPa.....	113
Tabela 11: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 60% b_w , $f_y=300$ MPa.....	115
Tabela 12: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 80% b_w , $f_y=220$ MPa.....	117
Tabela 13: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 80% b_w , $f_y=300$ MPa.....	119

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 MODOS DE INSTABILIDADE EM PERFIS FORMADOS A FRIO	28
1.1.1 Flambagem local	28
1.1.2 Flambagem distorcional.....	29
1.1.3 Flambagem global.....	30
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
1.3 PERFIL U ENRIJECIDO	34
1.4 OBJETIVOS	35
1.5 JUSTIFICATIVA	36
1.6 METODOLOGIA.....	36
1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	37
2 PRESCRIÇÃO NORMATIVA: MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA	39
2.1 PROPOSTAS PARA A MODIFICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA	40
2.1.1 Determinação da força axial resistente de perfis formados a frio com furos através do método MOEN 2	40
2.1.2 Determinação da força axial resistente de perfis formados a frio com furos através do método SALES.....	42
3 MODELAGEM NUMÉRICA	45
3.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	45
3.2 GEOMETRIA DOS MODELOS ADOTADOS	46
3.3 MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS	48
3.3.1 Tipo de elemento.....	48
3.3.2 Refinamento da malha utilizada	49
3.3.3 Condições de contorno	50
3.3.4 Aplicação do carregamento	51
3.3.5 Propriedades mecânicas dos materiais	51
3.3.6 Análise numérica via ANSYS	52
3.3.6.1 Análise linear.....	53
3.3.6.2 Análise não linear	54
3.3.7 Análise linear via teoria generalizada de vigas utilizando o <i>software</i> GBTul.....	54
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
4.1 ANÁLISE NUMÉRICA DOS PERFIS SEM PERFURAÇÕES E COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS EM NORMA.....	57
4.2 ANÁLISE NUMÉRICA DOS PERFIS COM PERFURAÇÕES E COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS EM NORMA.....	59
4.3 ANÁLISE NUMÉRICA DE TODAS AS SECÇÕES ESTUDADAS DOS PERFIS SEM E COM PERFURAÇÕES E COMPARAÇÃO OS RESULTADOS OBTIDOS EM NORMA	70

4.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS PERFURAÇÕES NA RESISTÊNCIA DOS PERFIS U ENRIJECIDOS	72
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
REFERÊNCIAS.....	77
APÊNDICE A – APDL SEM FUROS	81
APÊNDICE B – APDL COM FUROS DE 20% b_w.....	91
APÊNDICE C – TABELAS.....	101

1 INTRODUÇÃO

O constante desenvolvimento da indústria metálica no mundo torna contínua a busca por estruturas mais leves, econômicas, eficientes e racionais, ou seja, que evitam o desperdício de insumos durante o processo construtivo. Aliado à grande competitividade do setor, esse processo leva engenheiros calculistas a optarem por soluções que contemplem materiais com baixos custos de produção, bom controle de qualidade, elevada versatilidade e melhores propriedades mecânicas. É nesse contexto que os perfis formados a frio se apresentam como resposta para variados tipos de sistemas estruturais e tornam-se elementos fundamentais em obras em que haja preocupação com o tempo de montagem da estrutura, aliado ao menor custo.

Segundo Yu (2000), a utilização de perfis metálicos obtidos a partir da conformação a frio de chapas planas metálicas iniciou-se por volta de 1850, nos Estados Unidos e na Grã-Bretanha, simultaneamente. Durante esse período, não existiam especificações técnicas regulamentando a utilização de tais perfis. Porém somente a partir de 1946 seu uso foi popularizado, devido à publicação, pelo American Iron and Steel Institute (AISI) das *Especificações para Projetos de Elementos Estruturais em Perfis Leves*. Em 1949, o AISI lançou o primeiro *Manual de Projetos de Perfis Leves em Aço* com subsequentes revisões. Esta norma foi reconhecida mundialmente e serviu de referência para pesquisas e normas de outros países. Ressalta-se que ela foi baseada em estudos realizados na Universidade de Cornell desde 1939, com suporte do AISI e sob a direção do professor George Winter.

Perfis formados a frio, também conhecidos como perfis leves, são obtidos a partir de dobragem de chapas a frio, em temperatura ambiente. Tal processo permite a fabricação de variados perfis com grande emprego na construção civil. Dessa forma, são geralmente utilizadas chapas finas de aço para sua produção, conforme especificado na norma ABNT NBR 14762 (ABNT, 2010).

Conforme Silva e Silva (2008), os processos de fabricação dos perfis formados a frio podem ser classificados como: contínuo (perfilação) ou descontínuo (dobramento). O processo contínuo é realizado a partir do deslocamento longitudinal de uma chapa de aço sobre os rolos de uma linha de perfilação. Os rolos vão dobrando gradativamente a chapa até a forma definitiva do perfil. Quando o perfil deixa a linha de perfilação, ele é cortado no comprimento indicado no projeto, sendo este processo adequado à fabricação em série. Por sua vez, o processo descontínuo é indicado para a produção de pequenas quantidades de perfis, sendo executado mediante o emprego de uma prensa dobradeira. A matriz da dobradeira é prensada contra a

chapa de aço, obrigando-a a formar uma dobra. Várias operações similares a essa, sobre a mesma chapa, fornecem à seção do perfil a geometria exigida no projeto. O comprimento do perfil está limitado à largura da prensa. Ambos os processos promovem mudanças nas propriedades mecânicas do aço, sendo que na região dos cantos dobrados há uma elevação da resistência ao escoamento e redução da ductilidade do material.

Os perfis formados a frio, por adotarem chapas de pequena espessura e por serem estruturas esbeltas, estão sujeitos a problemas de instabilidade de seus elementos, tais como a flambagem local, distorcional e global, quando submetidos a compressão. Dessa forma, pode-se dizer que a flambagem é um fenômeno que ocorre em elementos esbeltos com perda de estabilidade, ocasionando o deslocamento de um elemento estrutural quando submetido a um carregamento.

A elevada relação largura/espessura (esbeltez local) acentua a ocorrência desses fenômenos de instabilidade, tais como modos locais, globais ou a interação entre estes, sendo que essa interação ocorre quando as cargas críticas coincidem ou apresentam valores próximos. Quando há interação entre esses modos, aumenta-se a complexidade para dar um prognóstico da capacidade de carga e do comportamento do elemento estrutural. (MATSUBARA, 2018, p. 2).

Com o crescente uso dos perfis formados a frio, torna-se necessário um estudo aprofundado para entender como esses fenômenos interferem na capacidade resistente desse tipo de perfil.

1.1 MODOS DE INSTABILIDADE EM PERFIS FORMADOS A FRIO

Por meio da análise linear de estabilidade é possível investigar as forças críticas e os modos de flambagem dos perfis formados a frio, pois, devido à adoção de chapas de pequena espessura, esses elementos estruturais estão suscetíveis a este fenômeno. No processo do cálculo estrutural desses perfis, é de extrema importância a análise de estabilidade, porque, para conseguir resultados seguros nos procedimentos de dimensionamento, é necessário obter valores precisos referentes à capacidade de resistência desses perfis. Vários são os modos de flambagem que podem afetar esses perfis: modo local, modo distorcional da seção e os modos globais do elemento estrutural. Nos próximos itens, tais modos são apresentados em mais detalhes.

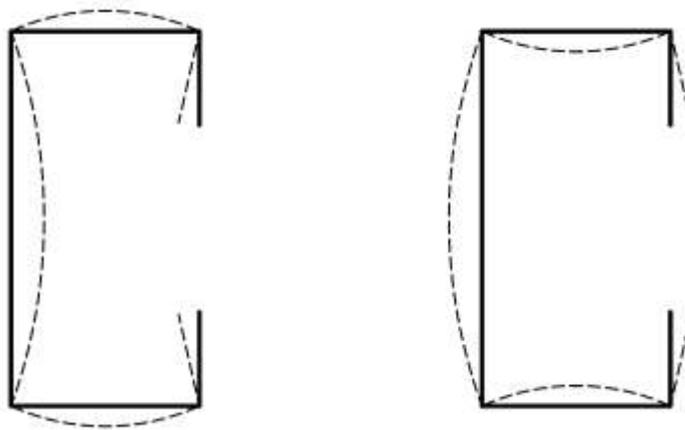
1.1.1 Flambagem local

A flambagem local pode ser caracterizada pelo enrugamento ou ondulação de um ou mais elementos do perfil, sem que haja deslocamento das bordas comuns à seção transversal. Existem apenas deslocamentos laterais senoidais mantendo os ângulos entre os elementos inalterados.

Esse fenômeno não representa colapso estrutural, e sim uma redução significativa da rigidez da seção, apresentando geralmente um comportamento pós-crítico estável.

A Figura 1 ilustra esse modo de flambagem.

Figura 1: Flambagem local em seções tipo U enrijecidas submetido a compressão axial

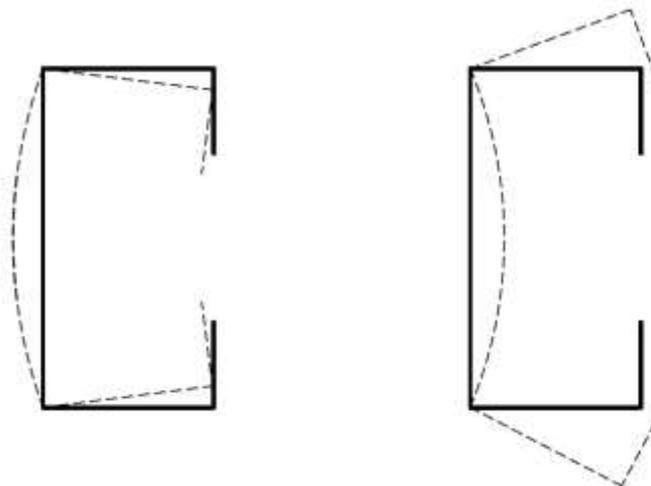


Fonte: Adaptado de Almeida (2007, p. 19).

1.1.2 Flambagem distorcional

A flambagem distorcional ocorre com a perda de estabilidade da seção transversal do perfil submetido a compressão quando este não possui contenção lateral, ou seja, ocorre a translação de pelo menos uma das arestas do perfil ocasionando abertura ou fechamento delas. Comparando esse modo com o modo local, nota-se que não há conservação da posição original dos cantos dobrados da seção do perfil, conforme se pode observar na Figura 2.

Figura 2: Flambagem distorcional do perfil U enrijecido na compressão simples



Fonte: Adaptado de Matsubara (2018, p. 6).

de projeto. No decorrer do estudo, ele constatou inconsistência entre resultados analíticos e experimentais, pois as instruções normativas ignoram a interação da flambagem local e não mostram uma conferência do modo distorcional. Assim sendo, propôs um novo método que visa agregar os modos, fornecendo um procedimento para o dimensionamento baseando-se na estabilidade elástica das seções, a fim de reduzir a necessidade de cálculos de largura efetiva e/ou propriedade efetiva e evitar erros sistemáticos: o Método da Resistência Direta.

Schafer e Yu (2006) realizaram um amplo trabalho ensaiando perfis formados a frio do tipo U enrijecido e Z sem contenções laterais, analisando, por sua vez, os modos de flambagem local, distorcional e o lateral por torção. Constataram que a flambagem distorcional leva a uma maior redução na capacidade resistente do perfil, considerando-se o critério de falha, comparado ao modo de flambagem local. Concluíram, então, que a norma australiana e o Método da Resistência Direta eram procedimentos mais confiáveis e precisos quando comparados às normas americanas e canadense vigentes à época.

Devido ao contínuo aprimoramento da indústria, continuam a ser realizados extensivos trabalhos focados no desempenho dos perfis formados a frio. É nesse contexto que Souza (2006) apresentou um estudo numérico de colunas de seções do tipo U enrijecido com enrijecedores intermediários na alma, sob compressão axial. Ele realizou uma análise numérica através do Método dos Elementos Finitos via *software* ANSYS, para obter as cargas críticas de flambagem e modos associados e o comportamento pós-crítico. E concluiu que o acréscimo de enrijecedores intermediários induzem à intensificação do modo de flambagem distorcional.

Moen e Schafer (2008) desenvolveram uma pesquisa com o intuito de ampliar o campo de aplicação do Método da Resistência Direta para perfis formados a frio com perfurações. Seus estudos apontaram que a carga crítica de flambagem elástica pode aumentar ou diminuir devido à presença de furos, bem como à sua geometria, tamanho e localização. No final do seu estudo, os autores desenvolveram equações para o Método da Resistência Direta que levam em conta a presença das perfurações.

Souza (2013) avaliou a ocorrência dos modos local, distorcional e global em perfis do tipo rack curtos e médios, de forma isolada ou em interação a partir de um estudo teórico-experimental. O grupo de perfis estudados englobava séries sem e com perfurações, sendo configuradas essas aberturas em 60% e 80% em relação à largura da alma. Procedimentos numéricos foram empregados para avaliar o comportamento dos perfis submetidos à compressão centrada em

análises lineares e não lineares, com extremidades rotuladas. Para definir os ensaios experimentais que seriam adotados pela pesquisa, foram realizadas análises numéricas com seção escolhida a partir de análises preliminares. Com relação aos resultados experimentais, estes contemplaram: levantamento das imperfeições geométricas dos protótipos, ensaios de caracterização do aço e, por fim, ensaios de compressão centrada. Algumas conclusões dessa pesquisa foram: os resultados experimentais indicaram que a existência dos furos leva à redução da carga última; observou-se ainda uniformidade nos resultados em relação aos perfis com perfurações, mesmo com variação no comprimento dos furos; e constatou-se o domínio do modo distorcional nas séries.

Faria (2016) analisou a influência do modo de flambagem local e distorcional, em perfis leves tipo rack, curtos e médios, com e sem perfurações ao longo de seu comprimento. Para definir a geometria dos protótipos, o autor baseou-se em estudos realizados por Souza (2013). O modelo desenvolvido para essa pesquisa fundamentou-se em estudo numérico realizado utilizando o Método dos Elementos Finitos, via ANSYS. As condições de contorno empregadas simularam o engaste nas duas extremidades do perfil, de modo a impedir o deslocamento de corpo rígido. Como conclusões, os resultados experimentais indicaram que a existência de perfurações leva à redução da carga última, uma vez que a área líquida das colunas perfuradas é menor que a área bruta; ainda, o modo local não influenciou na capacidade resistente, predominando em todos os casos o modo distorcional.

Neiva (2017) realizou uma análise numérica linear para avaliar a influência das perfurações na estabilidade e carga máxima dos perfis formados a frio do tipo rack sob carregamento centrado e excêntrico. O modelo numérico foi desenvolvido em elementos finitos, analisando 160 seções, variando o comprimento de 100 mm a 3000 mm, sendo que as perfurações foram divididas em dois grupos: furos verticais e inclinados. Segundo os resultados obtidos pela análise linear, foi realizada uma análise numérica não linear, considerando as não linearidades física e geométrica. Amparado pelo Método da Resistência Direta e a partir dos resultados obtidos na pesquisa, o autor propôs um método para barras comprimidas perfuradas sob o modo distorcional. Observou-se, no final da pesquisa, que tanto as perfurações verticais como as inclinadas influenciam na carga crítica das colunas, reduzindo seu valor. Com relação às colunas com furos verticais, o início do modo global é pouco influenciado pela altura do furo, já no caso dos furos inclinados, a influência da altura e inclinação das perfurações é maior e precipita o início do modo global.

Sales (2017) investigou a aplicação do Método da Resistência Direta na previsão da carga axial resistente à compressão de perfis formados a frio de seção do tipo rack com perfurações. Apresentou uma adequação desse método a perfis perfurados comprimidos e sujeitos ao modo distorcional, baseando-se em análise numérica e utilizando um modelo já calibrado por Souza (2013).

Jardim Júnior (2018) avaliou a adaptação do Método de Resistência Direta para a determinação da força axial resistente de perfis formados a frio de seção tipo U enrijecido com furos, sob compressão centrada. As análises numéricas não lineares foram realizadas utilizando o Método dos Elementos Finitos, via ANSYS. Foram criados modelos utilizando a linguagem de programação ANSYS Parametric Design Language (APDL) e suas condições de contorno foram adotadas de forma a simular extremidades rotuladas. Baseado em estudos prévios, foi adotado o elemento de casca SHELL181 para a parede das colunas e elementos de malha com dimensão igual a 10% da dimensão da alma b_w . O autor concluiu que o método proposto por Sales (2017) apresentou resultados melhores que os obtidos pelos métodos propostos por Moen e Schafer (2009). Com menores valores teóricos, as análises numéricas indicaram que o método está a favor da segurança. Foi apresentado também um método alternativo em busca de resultados ainda mais próximos entre as resistências teóricas e numéricas.

Santos (2020) estudou a aplicação do Método da Resistência Direta no dimensionamento de perfis formados a frio do tipo rack submetidos a compressão e sujeitos à flambagem distorcional, considerando a variação do comprimento do furo. Simulou via elementos finitos no *software* ANSYS (2012) pilares de seções racks com perfurações dotadas das seguintes características: dois furos na alma, com largura equivalente a 10% b_w e variando a altura em 20%, 40%, 60% 80% da largura da alma. Os resultados foram comparados com prescrições de Método da Resistência Direta (ABNT, 2010) e com as adaptações propostas por Sales (2017). O autor concluiu que a variação da altura do furo, mantendo-se sua largura, influenciava consideravelmente na resistência do perfil quando a esbeltez se elevava.

Souza, Santos e Sarmanho (2020) avaliaram a extensão da aplicação do Método da Resistência Direta para verificar a ocorrência da flambagem distorcional, em perfis formados a frio do tipo rack com perfurações, submetidos à compressão centrada. Este estudo foi uma extensão das análises de Sales (2017) e de Jardim Jr. (2018), considerando-se a variação do comprimento do furo (L_h). Foram consideradas cinco situações: a coluna sem furos e furos de comprimento igual a 20%, 40%, 60% e 80% da largura da alma (b_w). Conclui-se que a redução na esbeltez da alma

devida às perfurações pode levar à ocorrência do modo local, e ainda foi possível identificar que seções com esbeltez da alma (b_w/t) superiores a 66,7 poderão estar sob a ação da flambagem local.

A partir dos resultados obtidos nas pesquisas apresentadas anteriormente, utilizaram-se alguns parâmetros definidos pelos autores para o desenvolvimento deste estudo, como:

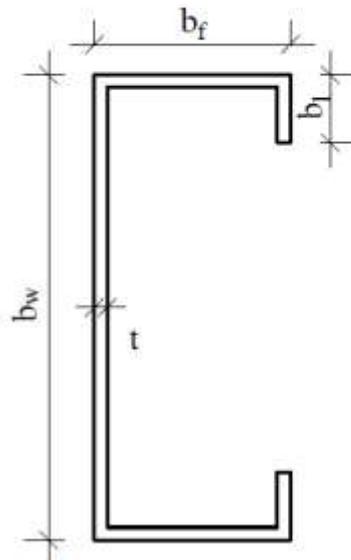
- Souza (2013) – Refinamento da malha igual a 10 % da largura da alma (b_w), inserção de um nó à meia altura do modelo para impedir a translação nesta direção, elemento de casca SHELL181, espaçamento das perfurações posicionadas a uma distância da aresta alma/flange igual a 20% de b_w e espaçadas entre elas a uma distância de 40% de b_w . e, por fim, o empenamento impedido.
- Jardim Júnior (2018) – Modelos de seções transversais tipo U enrijecido: Ue 50x45x10, Ue 75x65x15, Ue 100x100x20, com 5 espessuras de chapa para cada, para aços com tensões de escoamento (f_y) de 220 MPa. Foi empregada ainda a linguagem de programação ANSYS Parametric Design Language (APDL), elaborada pelo autor como base para desenvolver o trabalho e o modelo de perfuração com altura variando em 40% b_w . Ressalta-se que não foi adotado o grupo Ue 125x125x25, pois o mesmo apresentou o modo local como governante.
- Santos (2020) – Inserção de dois furos na alma, variando sua altura em 20%, 40%, 60% e 80% da largura da alma.

1.3 PERFIL U ENRIJECIDO

O perfil U enrijecido é uma variação do perfil U, com a inserção de dobras na extremidade da abertura. Este material garante melhor resistência e rigidez quando comparado ao perfil U, sendo muito utilizado na construção de estruturas que necessitam de leveza e resistência, sendo comumente encontrado no mercado com 3, 6 ou ainda com 12 metros de comprimento.

A Figura 4 ilustra a nomenclatura e as dimensões do perfil U enrijecido.

Figura 4: Perfil U enrijecido



Fonte: Adaptado da NBR 14762 (ABNT, 2010, p. 46).

Onde:

b_w - Altura da alma;

b_f - Comprimento do flange;

b_l - Altura do elemento enrijecido;

t - Espessura do perfil.

1.4 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência das perfurações na estabilidade e na resistência dos perfis formados a frio do tipo U enrijecidos sujeitos à flambagem distorcional quando submetidos a uma força de compressão, por meio de métodos numéricos e teóricos adaptados para considerar as perfurações.

Como objetivo específico tem-se:

- Avaliar a influência da variação da altura das perfurações na força axial de compressão resistente de perfis formados a frio;
- Avaliar a adaptação do Método da Resistência Direta para a previsão da força axial de resistência à compressão de perfis formados a frio do tipo U enrijecidos com perfurações de dimensões variadas.

1.5 JUSTIFICATIVA

A existência de furos em um perfil formado a frio do tipo U enrijecido pode, além de reduzir sua capacidade resistente, alterar seu comportamento. É corriqueira, no âmbito da construção civil, a execução de perfurações nas almas dessas estruturas, para a passagem de tubulações e fixação de elementos estruturais, por exemplo.

Porém existem poucos estudos e respaldos normativos que sugerem o dimensionamento de perfis formados a frio por meio da realização de furos indicando sua magnitude, disposição e forma. É então necessário desenvolver análises e pesquisas nessa área, pois, conforme demonstra Oliveira (2017), no Brasil as normas que tratam dos perfis formados a frio são a NBR 14762 (ABNT, 2010), que se refere aos princípios para dimensionamento; a ABNT NBR 6355 (ABNT, 2012), que trata da padronização dos perfis e apresenta a metodologia para cálculo das propriedades das seções transversais, inspeção e aceitação dos perfis; e a ABNT NBR 15253 (ABNT, 2014), que padroniza os perfis a serem aplicados no método construtivo *light steel framing* (LSF).

Neste contexto, verifica-se a necessidade de estabelecer procedimentos para dimensionar os elementos formados a frio, demandando-se a proposição de soluções técnicas e econômicas, assim como de alternativas para o desenvolvimento de projetos menos onerosos.

Em vista dessa realidade, este trabalho é uma extensão das pesquisas de Souza (2005, 2013), Sales (2017), Jardim Júnior (2018), Neiva (2019) e Santos (2020), e visa contribuir para a avaliação da adaptação do Método da Resistência Direta ao dimensionamento de perfis formados a frio com perfurações, com ênfase nos perfis do tipo U enrijecidos.

1.6 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho foi a seguinte:

- Análise linear de perfis formados a frio do tipo U enrijecidos sem perfurações utilizando o programa GBTul (BEBIANO; SILVESTRE; CAMOTIM, 2008), via teoria generalizada de vigas, para determinar as forças axiais de flambagem distorcional elástica (N_{dist}).
- Cálculo das forças axiais de compressão resistentes ($N_{C,RR}$) dos perfis sem furos, por meio do Método da Resistência Direta, utilizando as forças axiais de flambagem distorcional elástica, obtida via programa GBTul (BEBIANO; SILVESTRE; CAMOTIM, 2008).

- Comparação dos valores das forças axiais de compressão resistentes teóricas com os valores obtidos pela análise não linear de modelos numéricos desenvolvidos em elementos finitos, via *software* ANSYS.
- Com o modelo numérico calibrado, foram introduzidas duas perfurações na alma com espaçamento posicionadas a uma distância da aresta alma/flange igual a 20% de b_w e espaçadas entre si a uma distância de 40% de b_w . A largura dessas perfurações equivale a 10% de seu comprimento, e sua altura foi variada em 20%, 40%, 60% e 80% b_w . Em seguida, foram realizadas novas análises não lineares via elementos finitos para obter, desta vez, as forças axiais de compressão resistentes dos perfis com furos.
- Comparação dos valores obtidos com as prescrições normativas referentes ao Método da Resistência Direta (ABNT, 2010) e as adaptações propostas por Sales (2017) e por Moen e Schaffer (2009).

1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 2, são apresentadas as prescrições normativas para o dimensionamento de perfis formados a frio com ênfase no Método da Resistência Direta, sendo que este realiza o cálculo da força axial de compressão resistente de perfis sem perfurações considerando o modo de flambagem distorcional, presente no Anexo C da norma brasileira ABNT NBR 14762 (ABNT, 2010). Também são apresentados os estudos para a utilização do Método da Resistência Direta na previsão da força resistente de seções com perfurações conforme estudos realizados por Sales (2017) e por Moen e Schafer (2009).

No capítulo 3, descrevem-se os modelos utilizados nas análises lineares e não lineares, com destaque para Teoria Generalizada de Vigas, através do *software* GBTul, e para o Método dos Elementos Finitos, através do *software* ANSYS.

No capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas análises numéricas de perfis sem perfurações com base nas prescrições normativas segundo o Método da Resistência Direta (ABNT, 2010), e os com perfurações, segundo propostas de extensão do Método da Resistência Direta feitas por Sales (2017) e Moen e Schafer (2009).

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas neste estudo, assim como propostas para trabalhos futuros.

2 PRESCRIÇÃO NORMATIVA: MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

O Método da Resistência Direta foi proposto inicialmente por Hancock, Kwon e Bernard (1994) para a análise de flambagem distorcional de perfis de paredes finas sob flexão simples e compressão centrada. Os autores demonstraram, por meio de ensaios, que a resistência à flambagem distorcional das seções estava diretamente relacionada com a esbelteza distorcional dos elementos. O referido método requer a determinação das forças críticas de flambagem elástica do perfil, com base em métodos numéricos ou analíticos. Segundo Paixão (2018), com a finalidade de aprimorar o dimensionamento dos perfis formados a frio, Schafer e Peköz (1998) propuseram a aplicação do Método da Resistência Direta para a flexão de vigas contidas lateralmente sob flambagem local ou distorcional.

Para Schafer (2000), o Método da Resistência Direta consiste em usar as propriedades da seção completa, em vez da análise elemento por elemento, conforme indicado no método das larguras efetivas. É um método que visa à previsão da resistência de colunas e vigas de perfis formados a frio mediante o ajuste de resultados experimentais e/ou numéricos. Ele utiliza curvas ajustadas de forma a determinar a força de resistência de barras submetidas a compressão centrada e/ou a flexão simples, avaliando os modos local, distorcional, global e interações entre estes. É um procedimento eficaz, pois fornece estimativas precisas e seguras, baseadas no comportamento da barra na flambagem e na tensão de escoamento do aço utilizado.

O Método da Resistência Direta encontra-se na norma brasileira ABNT NBR 14762 (ABNT, 2010) (em seu Anexo C), na americana AISI-S100-16 (AISI, 2016) e na australiana/neozelandesa AS/NZS 4600 (AS/NZS, 2018).

O Anexo C da norma ABNT NBR 14762 (ABNT, 2010) apresenta as seguintes prescrições no caso do cálculo da resistência à flambagem distorcional sob compressão centrada para perfis sem perfurações:

$$\lambda_{\text{dist}} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{\text{dist}}}}$$

Se $\lambda_{\text{dist}} \leq 0,561$, tem-se $N_{c,R\text{dist}} = A \cdot f_y$

Se $\lambda_{\text{dist}} > 0,561$, tem-se $N_{c,R\text{dist}} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{\text{dist}}^{1,2}}\right) \frac{A \cdot f_y}{\lambda_{\text{dist}}^{1,2}}$

$$N_{c,rd} = \frac{N_{c,R\text{dist}}}{1,2}$$

Onde:

A - Área bruta da seção transversal;

f_y - Tensão de escoamento do aço;

λ_{dist} - Índice de esbeltez reduzido associado ao modo distorcional;

$N_{c,Rdist}$ - Força resistente característica relativa à compressão no modo distorcional;

$N_{c,Rd}$ - Resistência de cálculo à compressão relativa ao modo distorcional;

N_{dist} - Força axial de flambagem distorcional elástica.

Pode-se afirmar, então, que a base para o cálculo por meio do Método da Resistência Direta consiste na obtenção da resistência do perfil através de uma análise de estabilidade elástica da seção transversal, obtida por meio de uma análise linear, que pode ser realizada por programas de análise de estabilidade elástica.

2.1 PROPOSTAS PARA A MODIFICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Nesta seção são apresentados dois métodos de cálculo que foram aplicados nesta pesquisa para a determinação resistência direta de perfis do tipo U enrijecidos formados a frio, considerando a flambagem distorcional como forma de colapso, para os perfis com perfurações, sendo ambos considerados uma extensão do Método da Resistência Direta.

2.1.1 Determinação da força axial resistente de perfis formados a frio com furos através do método MOEN 2

Moen e Schaffer (2009) realizaram uma abrangente pesquisa com o objetivo de aprimorar o Método da Resistência Direta na parte do dimensionamento de perfis formados a frio com perfurações quando submetidos à compressão e à flexão, e analisaram três modos de flambagem: local, distorcional e global. Métodos aproximados foram desenvolvidos, sendo um deles o método MOEN 2, feito para calcular a carga de flambagem elástica por meio da análise de estabilidade da seção pelo método das faixas finitas. Pode-se dizer que, devido à presença dos furos, o método MOEN 2 considera a perda de rigidez de uma seção transversal sujeita à flambagem distorcional, sendo isso possível devido à modificação da espessura original da alma da seção por uma espessura fictícia, reduzida, conforme a equação a seguir:

$$t_{web,hole} = \left(1 - \frac{L_h}{L_{crd}}\right)^{\frac{1}{3}} \times t_w$$

Onde:

$t_{web,hole}$ - Espessura reduzida da seção transversal;

t_w - Espessura da seção sem furos;

L_h - Comprimento do furo;

L_{crd} - Comprimento de meia onda associada ao modo distorcional.

O método MOEN 2 considera os furos na análise da carga crítica de flambagem, e utiliza a força de escoamento da seção líquida.

As equações utilizadas nessa metodologia são as seguintes:

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{A_{wnet} \cdot f_y}{N_{dist}}}$$

Se $\lambda_{dist} \leq 0,561$, tem-se $N_{c,Rdist} = A_{wnet} \cdot f_y$

Se $\lambda_{dist} > 0,561$, tem-se $N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{A_{wnet} \cdot f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}$

$$N_{c,rd} = \frac{N_{c,Rdist}}{1,2}$$

Sendo:

Onde:

A_{wnet} - Área líquida da alma da seção transversal da barra;

f_y - Tensão de escoamento do aço;

λ_{dist} - Índice de esbeltez reduzido associado ao modo distorcional;

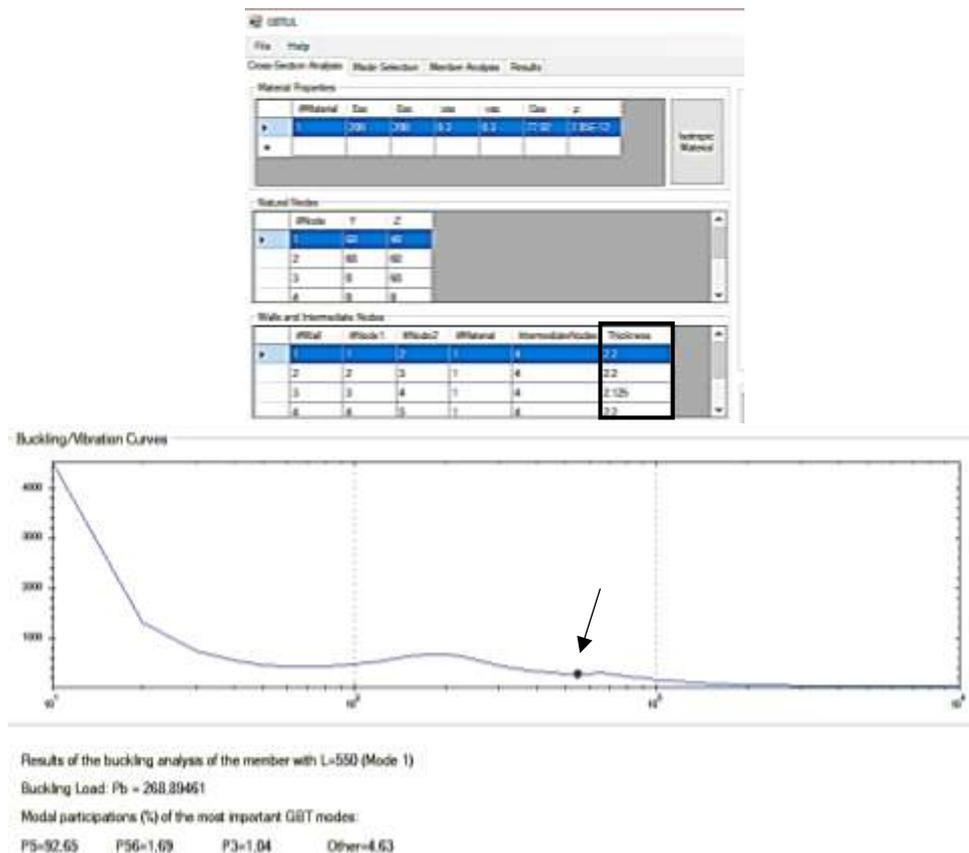
$N_{c,Rdist}$ - Força resistente característica relativa à compressão no modo distorcional;

$N_{c,Rd}$ - Resistência de cálculo à compressão relativa ao modo distorcional;

N_{dist} - Força axial de flambagem distorcional elástica.

A análise de estabilidade, que determina a força axial crítica de flambagem distorcional elástica para seção com furos (P_{crd}), foi realizada neste trabalho por meio do programa GBTul. Na Figura 5, apresenta-se a inserção dos dados referente as dimensões da seção transversal do perfil Ue 68x68x20x2,2 com a modificação da sua espessura para o valor $t_{web,hole}$, considerando furo de 80% de b_w , e a retirada do valor da força axial crítica de flambagem distorcional elástica para a seção com furos.

Figura 5: Exemplificação dos valores $t_{web,hole}$ e P_{crd} para o perfil 68x68x20x2,2 no *software* GBtul



Fonte: Autora (2020).

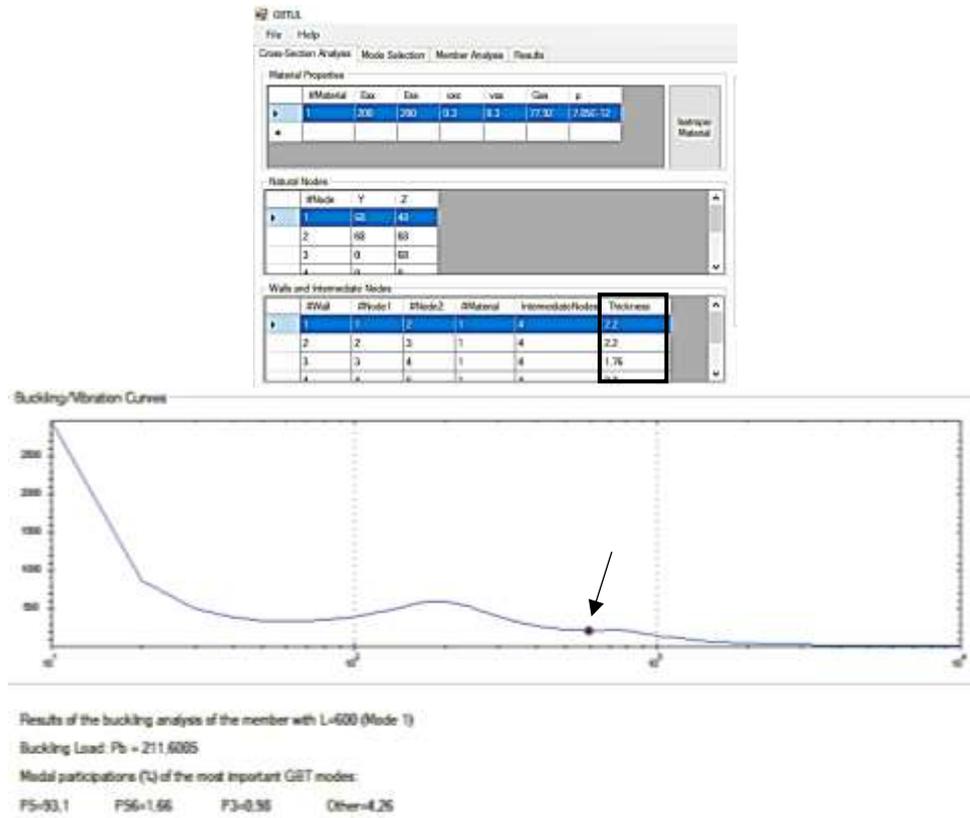
2.1.2 Determinação da força axial resistente de perfis formados a frio com furos através do método SALES

Embasado no método MOEN 2 de Moen e Schaffer (2009), Sales (2017) propôs um método alternativo, no qual obteve bons resultados quando comparados com os métodos de Moen para colunas de seção do tipo rack. O autor correlacionou a perda de capacidade resistente dos perfis com ausência de material no furo quando sujeitos ao modo de flambagem distorcional. Para obter a força axial de flambagem elástica, este método alterou o modo de calcular a espessura da alma do perfil, sendo denominada agora de espessura fictícia da alma t_{fic} , na qual considera que a redução da espessura da alma da seção transversal deve seguir a proporção entre sua área líquida A_{wnet} e sua área bruta A_{wg} , conforme a equação a seguir:

$$t_{fic} = \frac{A_{wnet}}{A_{wg}} \times t_w$$

Na Figura 6, apresenta-se a inserção no GBTul dos dados referentes às dimensões da seção transversal do perfil Ue 68x68x20x2,2 com a modificação da sua espessura para o valor t_{fic} e retirada do valor da força axial crítica de flambagem distorcional elástica para a seção com furos.

Figura 6: Exemplificação dos valores t_{fic} e P_{crd} do perfil 68x68x20x2,2, no *software* GBTul



Fonte: Autora (2020).

3 MODELAGEM NUMÉRICA

Este capítulo expõe o desenvolvimento de modelos numéricos para perfis do tipo U enrijecidos com e sem perfurações submetidos à compressão, para avaliação de seu comportamento estrutural. O modelo numérico foi desenvolvido pelo método dos elementos finitos, utilizando-se o *software* comercial ANSYS. As cargas críticas de flambagem foram obtidas por meio do GBTul e aplicadas no Método da Resistência Direta e suas adaptações; por sua vez, o método de elementos finitos foi utilizado para as análises lineares e não lineares dos modelos propostos.

3.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Segundo Azevedo (2003), o Método de Elementos Finitos é referido por vários autores, sendo que a publicação mais antiga em que é utilizada a designação “elemento finito” data de 1960 e tem como autor Ray Clough. Anteriormente, já eram conhecidas algumas técnicas que vieram a ser incorporadas ao Método dos Elementos Finitos, sem este aparecer ainda com as principais características que hoje em dia possui. Os grandes passos do desenvolvimento do Método de Elementos Finitos, que o conduziram ao formato que atualmente apresenta maior aceitação, foram dados na década de 1960 e início da de 1970. Inicialmente, os elementos finitos mais comuns eram os triangulares e os tetraédricos, passando-se mais tarde a dar preferência aos quadriláteros e aos hexaedros.

Conforme estudo realizado por Azevedo (2003), antes do aparecimento do Método de Elementos Finitos, a análise dos meios contínuos era feita por resolução de sistemas de equações de derivadas parciais que regem o fenômeno, tendo em consideração as necessárias condições de fronteira. Para facilitar a aplicação desta técnica a problemas não elementares, era comum recorrer às séries de Fourier.

Devido à sua complexidade, estes procedimentos somente eram aplicáveis a meios contínuos homogêneos e de geometria simples. Atualmente, a maioria das análises estruturais na área de estruturas de aço realizadas pela comunidade técnico-científica é feita por meio de programas que de alguma forma utilizam o Método dos Elementos Finitos.

O Método de Elementos Finitos é uma ferramenta que possibilita a obtenção de respostas para inúmeros problemas de engenharia, pois possui um vasto campo de aplicação, tendo em vista a facilidade de se adaptar a uma ampla diversidade de geometrias. Na definição de Lotti *et al.* (2006, p. 35), ele é “uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo

em pequenos elementos, conservando as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos [...]”.

Para simular por meio do Método de Elementos Finitos, é necessário modelar a geometria do elemento, aplicar as condições de contorno e definir as propriedades dos materiais utilizados, sendo que o objetivo desse método é determinar o estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores.

Segundo Braga (2015), para analisar a estabilidade de perfis formados a frio, mediante o Método de Elementos Finitos, normalmente se discretiza a geometria do perfil, utilizando elementos e funções de interpolação adequadas. Para obter as deformações da seção transversal nos diversos modos de instabilidade, é preciso utilizar malhas razoavelmente refinadas. A introdução dos carregamentos e das condições de contorno nos nós das seções transversais extremas deve ser feita minuciosamente, a fim de representar adequadamente a sollicitação externa e a condição de vínculo desejada.

3.2 GEOMETRIA DOS MODELOS ADOTADOS

Seguindo estudos anteriores de Souza (2013), Sales (2017) e Jardim Jr. (2018), na presente pesquisa foram analisados 4 grupos de perfis, em cinco situações diferentes: perfil sem furos e com furos de comprimento igual a 20%, 40%, 60% e 80% da largura da alma (b_w), sendo eles posicionados a uma distância da aresta alma/flange igual a 20% de b_w , espaçados a uma distância de 40% de b_w e com largura equivalente a 10% de seu comprimento.

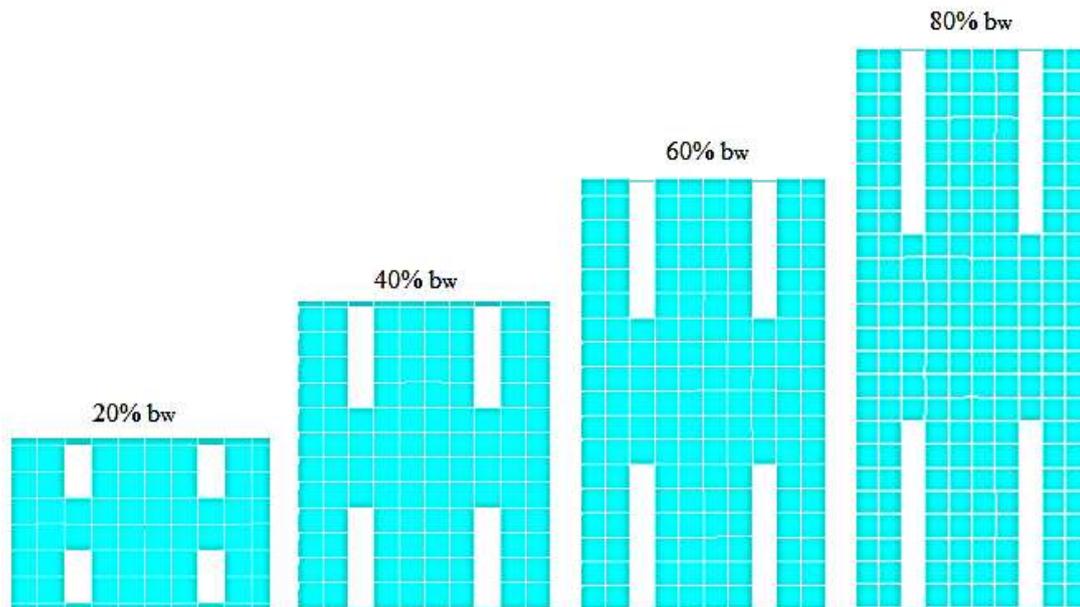
A seleção para determinar os grupos de perfis abordados nesse estudo se deu de modo a contemplar perfis aos quais o modo de flambagem distorcional fosse o modo governante de flambagem. Para que isso ocorresse, a seleção foi baseada nos dados apresentados na Tabela da ABNT NBR 14762 (ABNT, 2010).

A Tabela 1 apresenta características das seções analisadas, e a Figura 7 e a Figura 8 ilustram as dimensões e disposição das perfurações efetuadas nos perfis.

Tabela 1: Dimensões das seções transversais analisadas

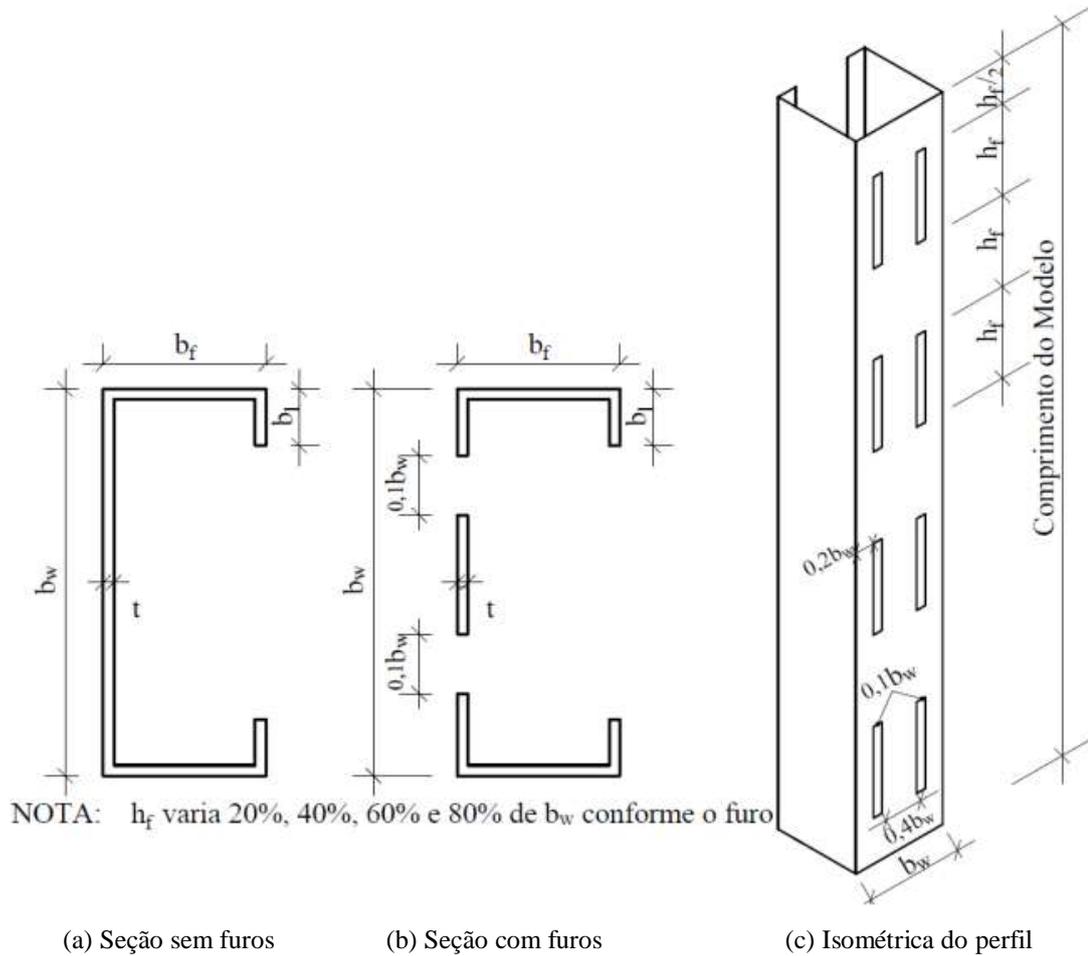
PERFIL ESTUDADO		Dimensões da seção transversal dos perfis tipo U enrijecidos			
		b_w	b_f	b_l	t
		mm	mm	mm	mm
GRUPO 50	Ue 50x45x10x1,2	50	45	10	1,2
	Ue 50x45x10x1,4	50	45	10	1,4
	Ue 50x45x10x1,6	50	45	10	1,6
	Ue 50x45x10x1,8	50	45	10	1,8
	Ue 50x45x10x2,0	50	45	10	2,0
GRUPO 68	Ue 68x68x20x2	68	68	20	2
	Ue 68x68x20x2,2	68	68	20	2,2
	Ue 68x68x20x2,4	68	68	20	2,4
	Ue 68x68x20x2,6	68	68	20	2,6
	Ue 68x68x20x2,8	68	68	20	2,8
GRUPO 75	Ue 75x65x15x1,6	75	65	15	1,6
	Ue 75x65x15x1,8	75	65	15	1,8
	Ue 75x65x15x2,0	75	65	15	2,0
	Ue 75x65x15x2,2	75	65	15	2,2
	Ue 75x65x15x2,4	75	65	15	2,4
GRUPO 100	Ue 100x100x20x1,6	100	100	20	1,6
	Ue 100x100x20x1,8	100	100	20	1,8
	Ue 100x100x20x2,0	100	100	20	2,0
	Ue 100x100x20x2,2	100	100	20	2,2
	Ue 100x100x20x2,4	100	100	20	2,4

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 7: Dimensões das perfurações conforme a variação de h_f 

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 8: Dimensões e disposições dos furos dos perfis com perfurações estudadas



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.3 MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS

O modelo numérico de elementos finitos desenvolvido no ANSYS para os perfis formados a frio do tipo U enrijecidos tem como objetivo presumir a força axial de compressão resistente dos perfis, e seus resultados são comparados com os resultados teóricos obtidos pelo Método da Resistência Direta e suas respectivas extensões.

3.3.1 Tipo de elemento

A seção U enrijecida foi modelada com o elemento de casca SHELL 181, que é um elemento estrutural homogêneo de casca com quatro nós por elemento e 6 graus de liberdade por nó (translações e rotações em X, Y e Z), sendo seu uso aconselhado na análise de estruturas de espessura reduzida.

O SHELL 181 aceita malhas irregulares, possibilitando também a aplicação de carga em qualquer direção. Ele adapta-se bem a análises não lineares, possui capacidade plástica, é bem

atual e muito empregado na modelagem de perfis formados a frio, sendo utilizado por pesquisadores como Souza (2013), Sales (2017) e Jardim Jr. (2018).

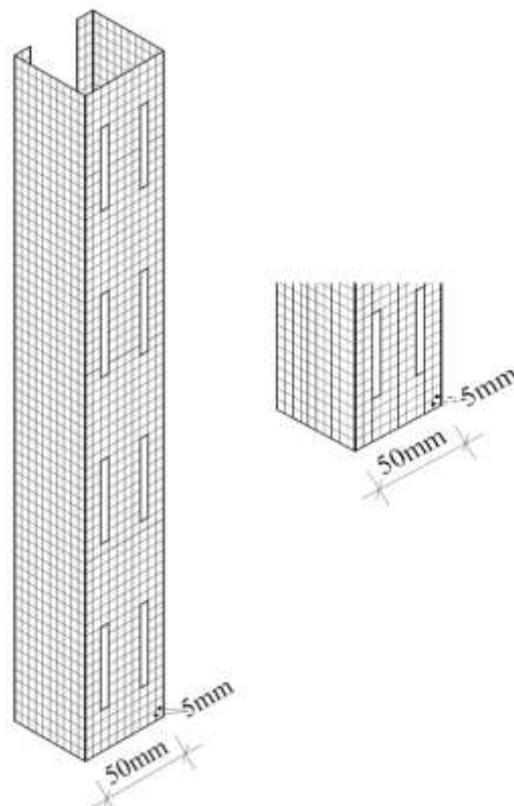
3.3.2 Refinamento da malha utilizada

Para obter um tempo adequado de processamento computacional utilizando o Método dos Elementos Finitos, é necessário desenvolver malhas que se adaptem a cada caso específico e que apresentem uma boa aproximação da solução, com minimização do erro (MELENK; BABUŠKA, 1996).

Souza (2013) desenvolveu um estudo de refinamento relacionando o tamanho dos elementos à largura da alma (b_w), tendo como objetivo a acomodação das perfurações nos modelos com furos. Segundo sua pesquisa, o elemento com lados iguais a 10% da largura da alma apresentou desempenho satisfatório, sendo adotado também neste trabalho.

A Figura 9 apresenta a distribuição da malha de elementos finitos para o perfil 50x45x10x1,2, com furo de 80% b_w .

Figura 9: Distribuição da malha dos elementos finitos para perfil U enrijecido 50x45x10x1,2, com furo de 80% b_w

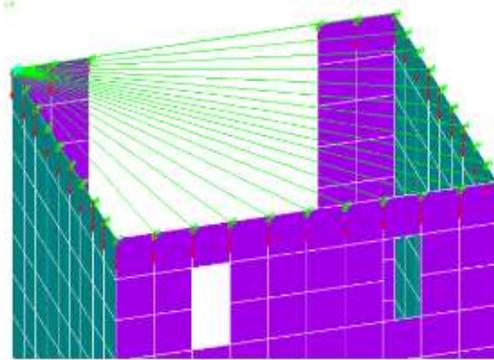


Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.3.3 Condições de contorno

As condições de contorno utilizadas neste estudo foram desenvolvidas de modo a simular extremidades globalmente rotuladas e empenamento restringido. Para esse fim, os nós das extremidades foram acoplados em todas as direções, garantindo dessa forma o mesmo deslocamento e rotação nesses pontos, assegurando assim a uniformidade de aplicação do carregamento (ver Figura 10).

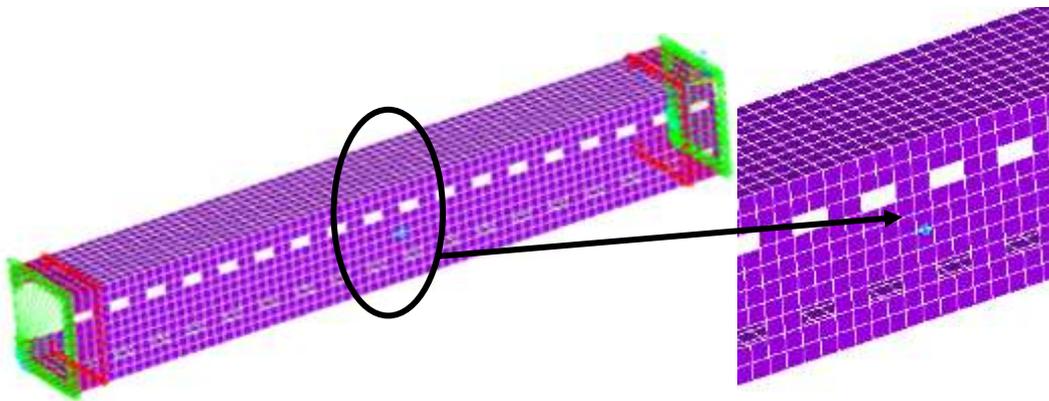
Figura 10: Acoplamento dos nós das extremidades



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Um nó à meia altura na direção longitudinal do perfil teve sua translação axial restringida para impedir o deslocamento de corpo rígido nesta direção, conforme ilustra a Figura 11.

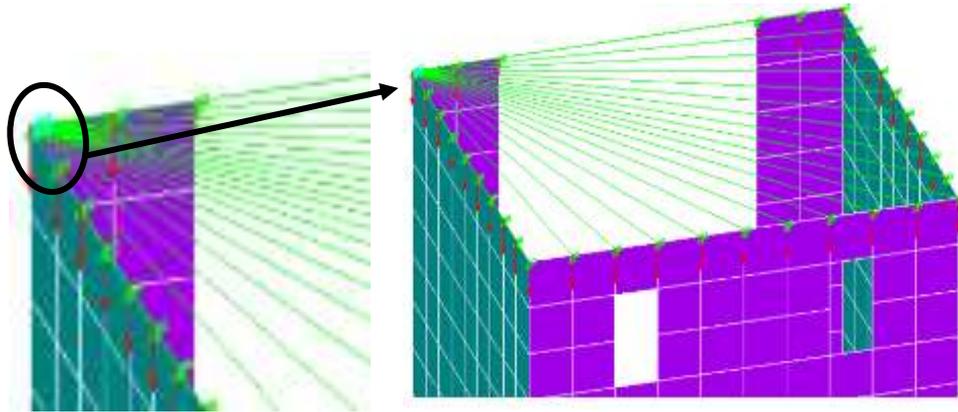
Figura 11: Nó a meia altura na direção longitudinal



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As translações no plano da seção transversal (x e z), ilustrada na Figura 12, foram restringidas.

Figura 12: Translações ortogonais ao eixo restringidas

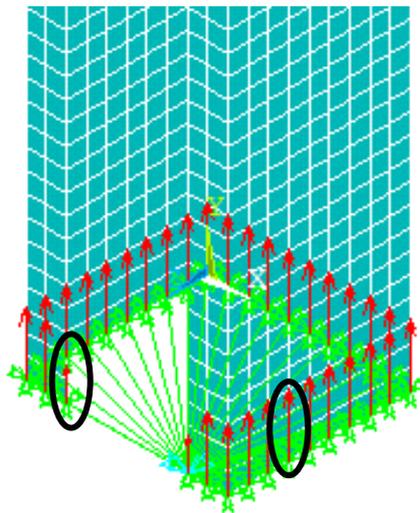


Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.3.4 Aplicação do carregamento

A carga foi aplicada de modo pontual em cada nó pertencente à extensão das arestas das extremidades do perfil formado a frio do tipo U enrijecido. Para obter uma distribuição das forças de modo mais uniforme ao longo do eixo longitudinal do perfil, foi aplicado nos nós da ponta dos enrijecedores metade do valor do carregamento dos demais nós, pois esses pontos possuem menor área de influência (ver Figura 13).

Figura 13: Carregamentos para o modelo numérico



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.3.5 Propriedades mecânicas dos materiais

Neste trabalho, empregou-se para os modelos testados duas categorias de aço: aço com $f_y = 220$ MPa e $f_u = 328$ MPa e aço com $f_y = 300$ MPa e $f_u = 400$ MPa, sendo f_y a tensão de escoamento e f_u a tensão última.

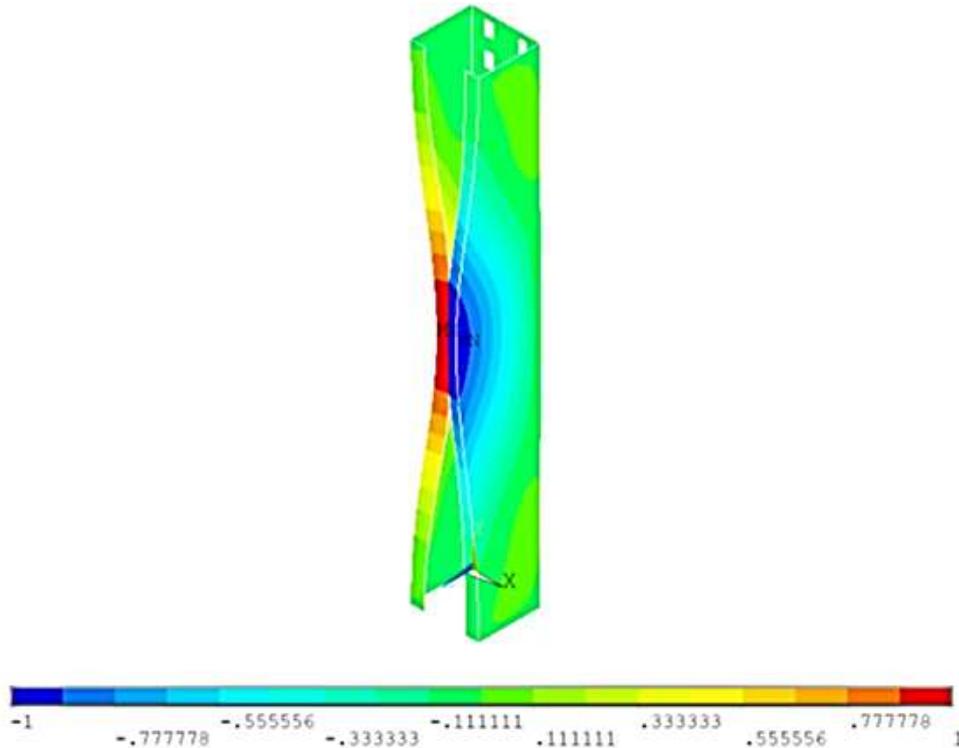
Considerou-se ainda para o módulo de elasticidade (E) o valor igual a 200000 MPa, para o coeficiente de Poisson (ν) um valor igual a 0,3 e, por fim, o módulo de elasticidade transversal (G) igual a 77 000 MPa.

3.3.6 Análise numérica via ANSYS

Para a determinação da força axial de compressão resistente dos perfis U enrijecidos com e sem furos, utilizou-se como base para a presente pesquisa a linguagem de programação paramétrica ANSYS Parametric Design Language (APDL), desenvolvida por Jardim Júnior (2018), sendo ela programada para realizar análise de flambagem linear e não linear a fim de obter o modo distorcional de instabilidade. Deve-se salientar que algumas modificações foram inseridas no modelo para o desenvolvimento e aprimoramento do estudo como: a restrição das translações em torno do eixo x e z e acoplamento dos nós das extremidades.

A Figura 14 ilustra como ocorre o modo distorcional para o perfil U enrijecido 50x45x10x1,2 gerado a partir da APDL.

Figura 14: Flambagem distorcional: Seção U enrijecida 50x45x10x1,2



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com a automatização do modelo, foram pré-estabelecidas todas as características do protótipo, tornando possível sua parametrização. A ferramenta APDL auxilia e facilita o estudo, pois possibilita modificações na geometria, na malha, nas condições de contorno, entre outras.

A técnicas apresentadas a seguir para a análise linear tiveram como base os estudos anteriores de Souza (2013) e Jardim Júnior (2018).

3.3.6.1 Análise linear

A análise linear foi assim realizada:

1. Inicialização do *software* ANSYS Mechanical APDL.
2. Definição do tipo de Análise Estrutural.
3. Ajuste das opções de visualizações.
4. Definição dos parâmetros do modelo (alma, flange, enrijecedor, espessura, comprimento do modelo).
5. Dados do material - Propriedades mecânicas do aço: módulo de elasticidade.
6. Definição do tipo de elemento utilizado: SHELL181.
7. Definição da geometria do modelo a partir dos dados do passo 4:
 - Criação de *keypoints*.
 - Replicação dos *keypoints* a uma distância igual ao comprimento do modelo.
 - Criação das áreas.
 - Inserção dos furos (caso possua)
8. Geração das malhas.
9. Aplicação das condições de contorno:
 - Acoplamentos dos nós de extremidade.
 - Restrição de deslocamentos.
 - Aplicação da carga distribuída de compressão em todos os nós das bordas uma carga igual a $1/(\text{números de nós} - 1)$.
 - Retirada dos carregamentos dos nós das extremidades.
 - Aplicação nós das extremidades uma carga igual a $1/(2*(\text{números de nós} - 1))$.
10. Solução do problema de autovalor e autovetor, para determinação da força axial de flambagem elástica e do modo a ela associado.
11. Visualização e avaliação dos resultados.

3.3.6.2 Análise não linear

A rotina para a programação para a análise não linear foi realizada considerando os efeitos de segunda ordem e as propriedades elastoplásticas do aço. Foi efetuada a seguinte sequência de passos:

1. Inicialização do *software* ANSYS Mechanical APDL.
2. Sequência descrita no item 3.3.6.1.
3. Introdução das imperfeições geométricas e escolha dos modos de flambagem:
 - Inserção das imperfeições para induzir a flambagem. Seguindo o estudo proposto por Faria (2016), o fator de imperfeição foi definido como metade da espessura do modelo.
 - A definição do modo de flambagem é feita após análise linear, posteriormente são introduzidos no modelo fatores de imperfeição (SOUZA, 2013).
4. Propriedades elastoplásticas do aço e introdução do diagrama multilinear:
 - Aços utilizados: $f_y = 220$ MPa e $f_u = 328$ MPa / $f_y = 300$ MPa e $f_u = 400$ MPa
 - A não linearidade do aço foram feitas considerando o gráfico de tensão x deformação multilinear.
5. Apagadas todas as cargas e aplicada carga P_y , igual ao escoamento da seção bruta do perfil:
 - Aplicação em todos os nós das bordas de uma carga igual a $P/(\text{números de nós} - 1)$.
 - Retirada dos carregamentos dos nós das extremidades.
 - Aplicação nos nós das extremidades de uma carga igual a $P/(2 * (\text{números de nós} - 1))$.
6. Solução do problema de análise não linear: Para garantir a convergência da análise foi utilizado o Método do Comprimento de Arco, onde a carga foi aplicada em 50 subetapas e o critério de parada adotado variou para cada família de seções geométricas, sendo definido por um deslocamento máximo que permita que o modelo atinja sua força axial de compressão resistente.
7. Visualização e avaliação dos resultados.

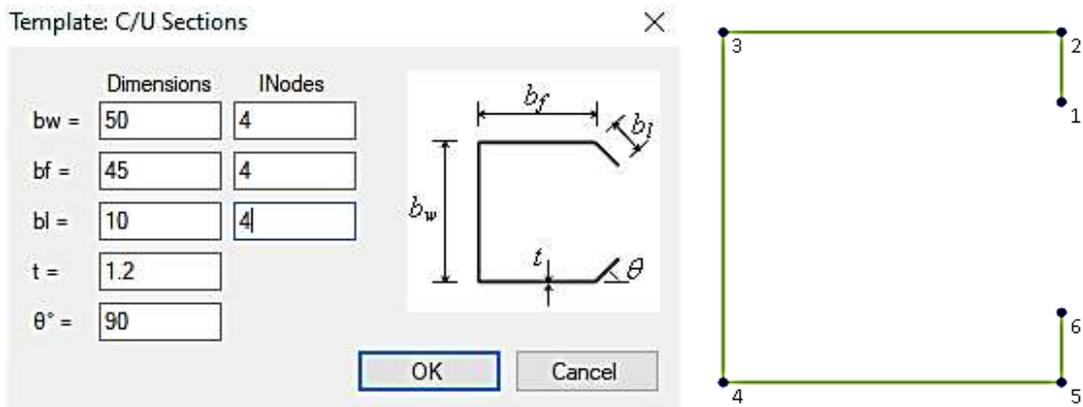
3.3.7 Análise linear via teoria generalizada de vigas utilizando o *software* GBTul

A Teoria Generalizada de Vigas, via programa GBTul, possibilita a execução da análise de estabilidade dos modos de flambagem local, distorcional e global e ainda das respectivas cargas

críticas associadas da seção transversal em diversos comprimentos de coluna. Essa análise foi indispensável para que o Método da Resistência Direta fosse utilizado.

Definidos os dados de entrada, o modelo é gerado e apresentado conforme mostra a Figura 15. Inicialmente, o modelo é elaborado a partir da inserção das posições nodais. Suas condições de vinculações são consideradas como simplesmente apoiadas.

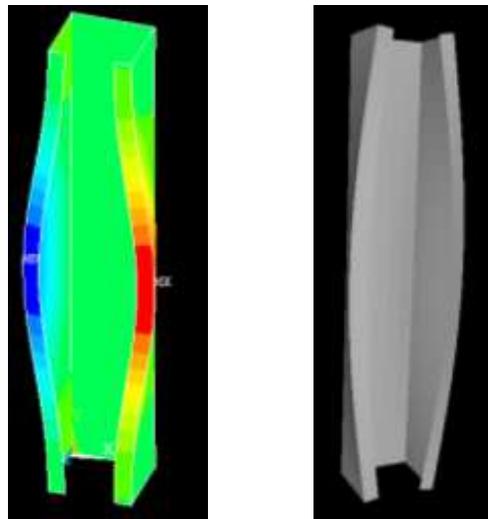
Figura 15: Modelo gerado via *software* GBTul



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Já a Figura 16 ilustra o modo de flambagem distorcional obtido a partir do programa ANSYS e pelo GBTul, respectivamente.

Figura 16: Modo de flambagem distorcional para as simulações para perfil U enrijecido 75x65x15x2,2 via ANSYS e GBTul



(a) ANSYS sem furos

(b) GBTul

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme definido nos objetivos da pesquisa, este trabalho teve como escopo avaliar a influência das dimensões das perfurações na estabilidade e carga máxima dos perfis formados a frio do tipo U enrijecidos sujeitos à flambagem distorcional quando submetidos a uma força de compressão. Assim sendo, neste capítulo são apresentados os resultados obtidos numericamente pela análise não linear via ANSYS e comparados com métodos teóricos.

Para demonstrar a viabilidade do modelo numérico adotado, inicialmente foi realizada uma análise numérica dos perfis sem perfurações, posteriormente comparando-a com resultados obtidos segundo a metodologia normativa. Uma vez validado o modelo, foram introduzidas perfurações na alma, com largura equivalente a 10% de seu comprimento e variando a altura em 20%, 40%, 60% e 80% (relação entre o comprimento do furo com a largura da alma). Em seguida, foram realizadas novas análises não lineares via elementos finitos para obter as forças axiais de compressão resistentes dos perfis com furos.

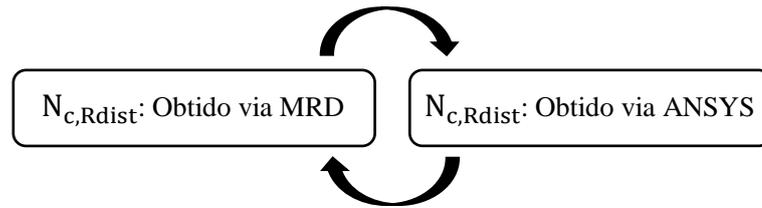
Para melhor compreensão e análise, os resultados obtidos são apresentados neste capítulo da seguinte forma:

- Item 4.1: Análise numérica dos perfis sem perfurações e comparação com os resultados obtidos em norma;
- Item 4.2: Análise numérica dos perfis com perfurações e comparação com os resultados obtidos em norma;
- Item 4.3: Análise numérica de todas as seções estudadas dos perfis sem e com perfurações e comparação os resultados obtidos em norma;
- Item 4.4: Avaliação da influência das perfurações na resistência dos perfis U enrijecidos

4.1 ANÁLISE NUMÉRICA DOS PERFIS SEM PERFURAÇÕES E COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS EM NORMA

Nesta etapa, compararam-se os resultados das forças axiais de compressão resistentes obtidas pelo Método da Resistência Direta, de acordo com as prescrições do Anexo C da norma ABNT NBR 14762 (ABNT, 2010), com os obtidos por análises numéricas não lineares para perfis U enrijecidos sem furos com tensões de escoamento para o aço de 220 e 300 MPa. A comparação é ilustrada pela Figura 17.

Figura 17: Comparação dos resultados entre MRD e ANSYS



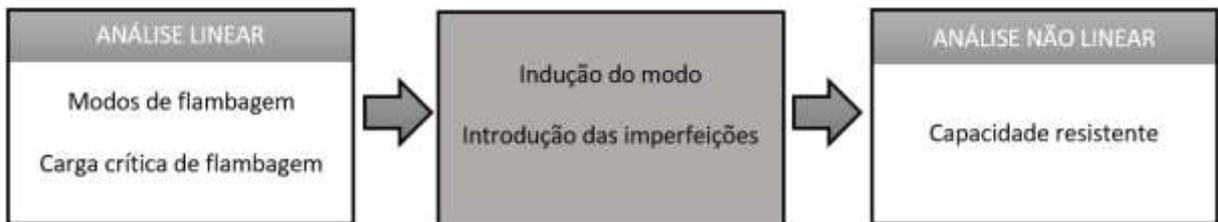
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Onde:

$N_{c,Rdist}$ - Valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional

Para obter os resultados para a análise numérica, adotou-se a sequência de cálculo ilustrada pela Figura 18:

Figura 18: Comparação dos resultados



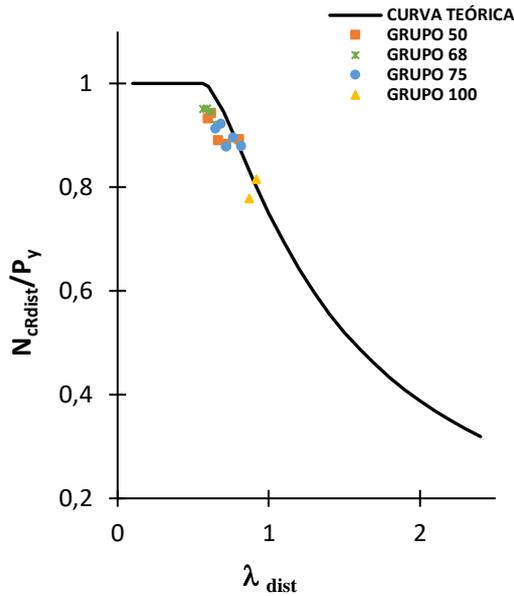
Fonte: Adaptado de Faria (2016, p. 35).

O Apêndice C desta dissertação contém tabelas com os resultados obtidos por essas análises.

A Figura 19 e Figura 20, a seguir, apresentam as curvas referentes ao Método da Resistência Direta, juntamente com os resultados das análises dos 40 modelos feitos no ANSYS para os perfis U enrijecidos sem furos para a tensão de escoamento de 220 e 300 MPa, respectivamente. A proporção entre os valores característicos da força axial de compressão resistente prevista pelo Método da Resistência Direta e os obtida via modelo numérico pelo ANSYS $\frac{N_{c,Rdist-MRD}}{N_{c,Rdist-ANSYS}}$ possuem como valor médio 1,041 e 1,012, e desvio padrão igual a 0,032 e 0,037 para as tensões de escoamento de 220 e 300 Mpa, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 21.

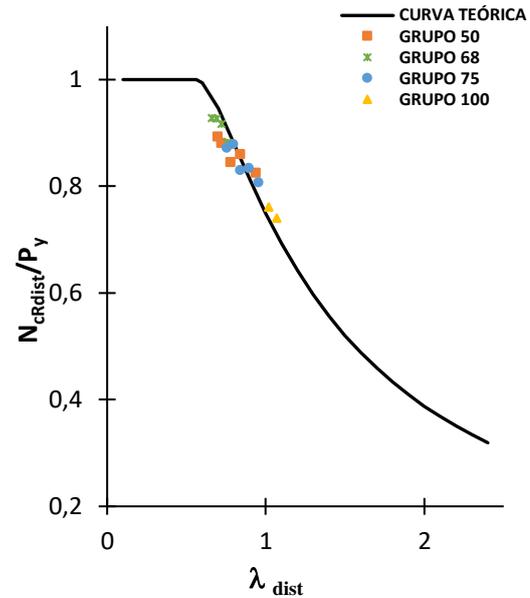
Segundo os grupos de perfis apresentados, verificou-se que há uma tendência maior dos resultados numéricos tangenciarem a curva do método da resistência direta à medida que se aumenta a tensão de escoamento do aço. Observou-se que os resultados numéricos apresentam boa correlação com os resultados normativos.

Figura 19: Resultado das cargas resistentes para os perfis sem furos, $f_y=220$ MPa



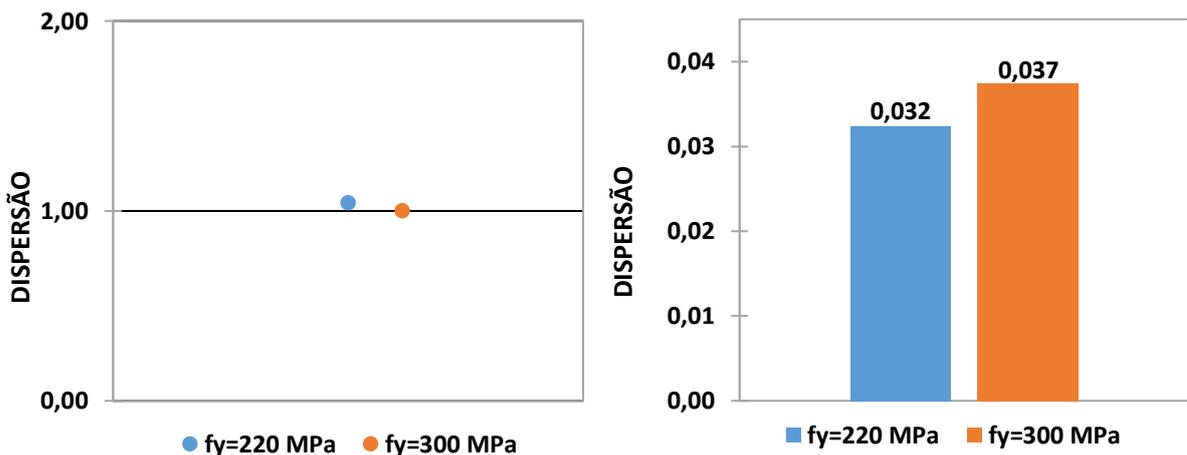
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 20: Resultado das cargas resistentes para os perfis sem furos, $f_y=300$ MPa



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 21: Comparação da dispersão entre os resultados da resistência a compressão propostas pelos métodos teórico e numérico para os perfis U enrijecidos sem furos, sendo apresentados a média e o desvio padrão, respectivamente



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.2 ANÁLISE NUMÉRICA DOS PERFIS COM PERFURAÇÕES E COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS EM NORMA

As forças axiais de compressão resistentes obtidas via Método dos Elementos Finitos são comparadas neste tópico com as obtidas pelos métodos de cálculo MOEN 2 (MOEN; SCHAFER, 2009) e pelo método de Sales (2017), cujas definições e equações são apresentadas no Capítulo 2.

O método de cálculo MOEN 2 (MOEN; SCHAFER, 2009) considera as implicações decorrentes dos efeitos das perfurações nos perfis, quando estes estão sujeitos à compressão. Desse modo, pode-se dizer que essas alterações propostas para o Método da Resistência Direta consideram os efeitos da perda de rigidez, devido à ausência do material no local do furo. Assim sendo, a análise estabilidade elástica foi realizada via GBTul, considerando o emprego de uma espessura fictícia $t_{web,hole}$, a qual pode ser descrita como uma relação em que se reduz a espessura original da alma a uma espessura fictícia.

Por sua vez, o método de Sales (2017) pondera modificações sobre o método MOEN 2 e leva em conta a redução da espessura da alma da seção transversal considerando a proporção entre sua área líquida (A_n) e sua área bruta (A_g). Dessa maneira, pode-se concluir que a perda de resistência do perfil perfurado é proporcional à perda da área da seção transversal.

Nesta pesquisa foram utilizados 4 grupos de perfis U enrijecidos, tendo cada 5 espessuras diferentes conforme apresentado a seguir na Tabela 2. Foram utilizados aços com duas tensões de escoamento (f_y), 220 e 300 MPa e contemplados 4 modelos de perfurações introduzidos na alma, com largura equivalente a 10% de seu comprimento e variando a altura em 20%, 40%, 60% e 80%.

Tabela 2: Dimensões das seções transversais com perfurações analisadas

PERFIL ESTUDADO (mm) $b_w \times b_f \times b_l \times t$		Dimensões da seção transversal dos perfis tipo U enrijecidos com furos					
		Sales		Moen 2			
		A_n	t_{fic}	$t_{web,hole}$ 20% b_w	$t_{web,hole}$ 40% b_w	$t_{web,hole}$ 60% b_w	$t_{web,hole}$ 80% b_w
		(mm ²)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
GRUPO 50	50 x 45 x 10 x 1,2	180,00	0,96	1,188	1,177	1,165	1,152
	50 x 45 x 10 x 1,4	210,00	1,12	1,384	1,368	1,352	1,335
	50 x 45 x 10 x 1,6	240,00	1,28	1,582	1,564	1,545	1,525
	50 x 45 x 10 x 1,8	270,00	1,44	1,780	1,759	1,738	1,716
	50 x 45 x 10 x 2,0	300,00	1,60	1,988	1,975	1,963	1,950
GRUPO 68	68 x 68 x 20 x 2,0	460,80	1,60	1,983	1,966	1,949	1,932
	68 x 68 x 20 x 2,2	506,88	1,76	2,182	2,163	2,144	2,125
	68 x 68 x 20 x 2,4	552,96	1,92	2,378	2,356	2,333	2,310
	68 x 68 x 20 x 2,6	599,04	2,08	2,576	2,552	2,527	2,502
	68 x 68 x 20 x 2,8	645,12	2,24	2,774	2,748	2,722	2,695
GRUPO 75	75 x 65 x 15 x 1,6	352,00	1,28	1,585	1,570	1,555	1,540
	75 x 65 x 15 x 1,8	396,00	1,44	1,782	1,763	1,744	1,725
	75 x 65 x 15 x 2,0	440,00	1,60	1,978	1,955	1,931	1,907
	75 x 65 x 15 x 2,2	484,00	1,76	2,175	2,150	2,124	2,098
	75 x 65 x 15 x 2,4	528,00	1,92	2,373	2,345	2,317	2,288
GRUPO 100	100 x 100 x 20 x 1,6	512,00	1,28	1,588	1,576	1,564	1,551
	100 x 100 x 20 x 1,8	576,00	1,44	1,786	1,771	1,757	1,742
	100 x 100 x 20 x 2,0	640,00	1,60	1,982	1,964	1,945	1,926
	100 x 100 x 20 x 2,2	704,00	1,76	2,180	2,160	2,140	2,119
	100 x 100 x 20 x 2,4	768,00	1,92	2,377	2,353	2,329	2,305

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

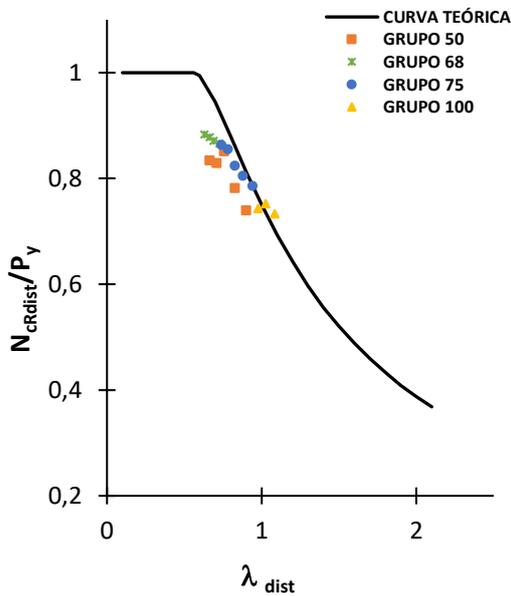
Inicialmente, foram introduzidas duas perfurações na alma, com largura equivalente a 10% de seu comprimento e variando a altura em 20% de b_w .

Como pode ser observado pela Figura 22 à Figura 26, percebeu-se que o método de Sales (2017) apresentou melhores resultados que o MOEN 2 (MOEN; SCHAFER, 2009). A proporção entre os valores característicos da força axial de compressão resistente prevista pelo método da Resistência Direta e os obtidos via modelo numérico pelo ANSYS $\frac{N_{c,Rdist-MRD}}{N_{c,Rdist-ANSYS}}$ têm como valor médio para o método de Sales 1,05 e 1,00, e desvio padrão igual a 0,046 e 0,048 para as tensões de escoamento de 220 e 300 MPa respectivamente. Já o método MOEN 2 apresentou como valor médio 1,12 e 1,10, e desvio padrão igual a 0,021 e 0,032 para as mesmas tensões de escoamento, respectivamente.

Todas as análises envolvendo os perfis do grupo 68 com espessura de 2 mm e do grupo de 100 com espessura de 1,6 e 1,8 mm não apresentaram flambagem distorcional como modo governante e sim como modo local, portanto esses pontos foram excluídos da área de plotagem

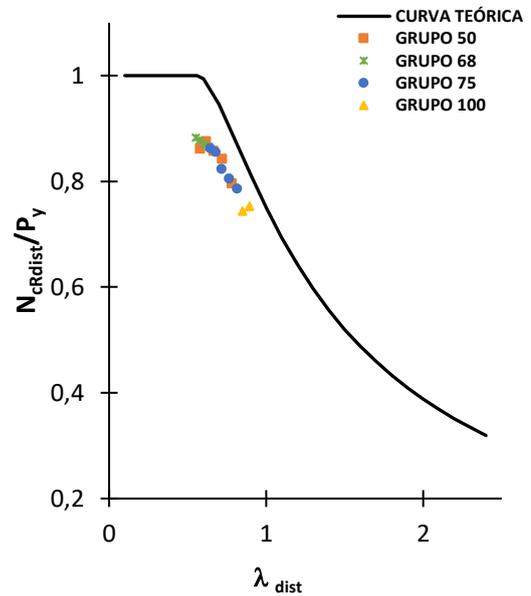
da figura. De maneira similar aos resultados encontrados para os perfis sem perfurações, quando se aumenta a tensão de escoamento do aço, verifica-se uma tendência maior dos resultados numéricos de tangenciarem a curva do Método da Resistência Direta.

Figura 22: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 20% b_w - SALES, $f_y = 220$ MPa



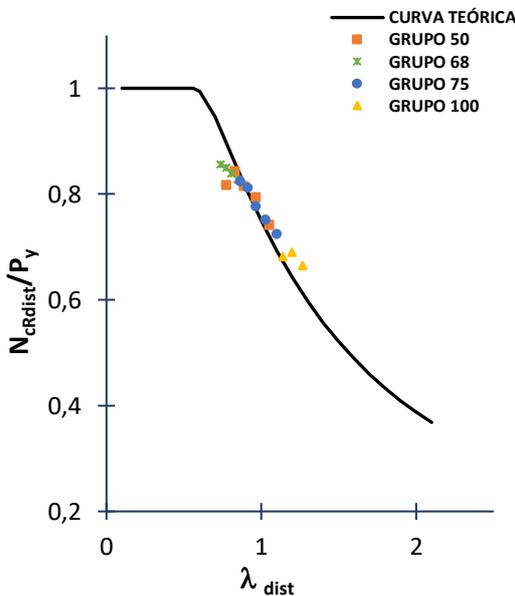
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 23: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 20% b_w - MOEN 2, $f_y = 220$ MPa



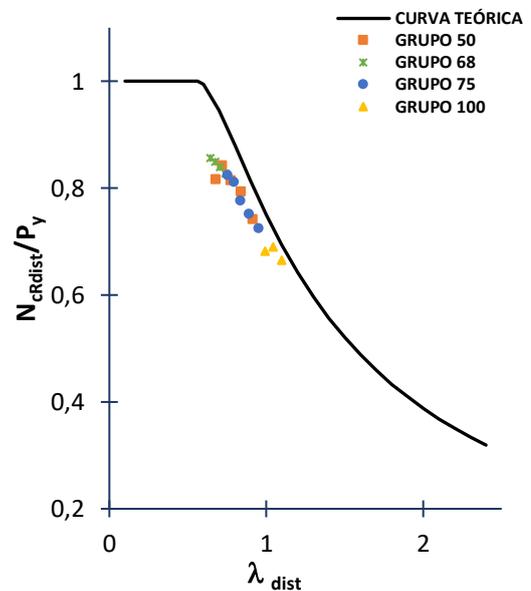
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 24: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 20% b_w - SALES, $f_y = 300$ MPa



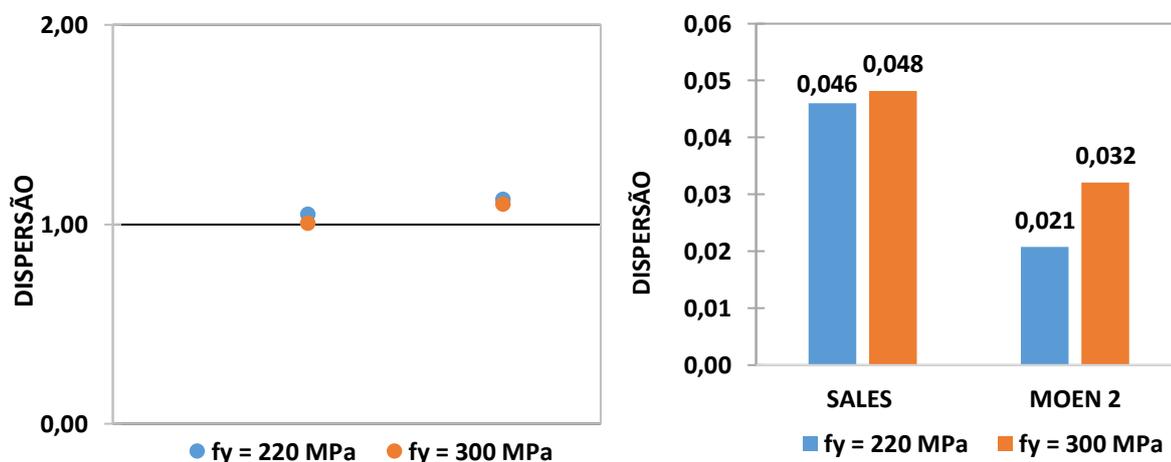
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 25: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 20% b_w - MOEN 2, $f_y = 300$ MPa



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 26: Comparação da dispersão entre os resultados da resistência a compressão propostas pelos métodos teórico e numérico dos perfis U enrijecidos com furos 20% b_w , sendo apresentados a média e o desvio padrão, respectivamente



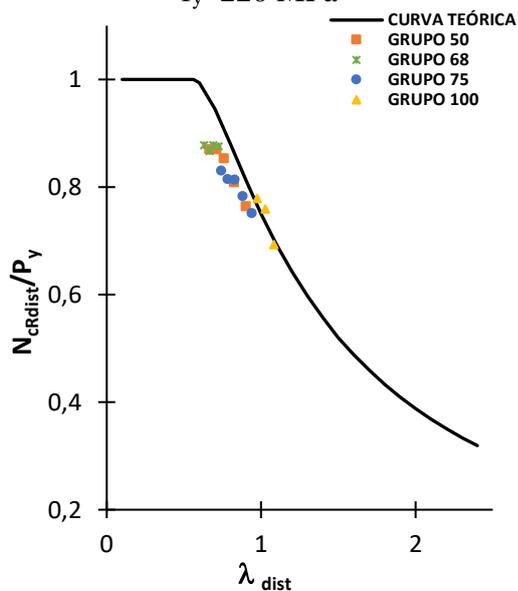
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Analisando agora as perfurações correspondentes a 40% de b_w , conforme apresentado na Figura 27 à Figura 31, percebeu-se que para ambos os métodos os resultados se aproximam da curva do Método da Resistência Direta, tornando-se mais expressivo para o método de Sales (2017) para a tensão de escoamento de 300 MPa.

A proporção entre os valores característicos da força axial de compressão resistente para esse método são de 1,06 e 1,02, para o valor médio e desvio padrão igual a 0,043 e 0,041, para as tensões de escoamento de 220 e 300 MPa, respectivamente. Já o método MOEN 2 apresentou como valor médio 1,14 e 1,12 e desvio padrão igual a 0,027 e 0,030 para as mesmas tensões de escoamento, respectivamente.

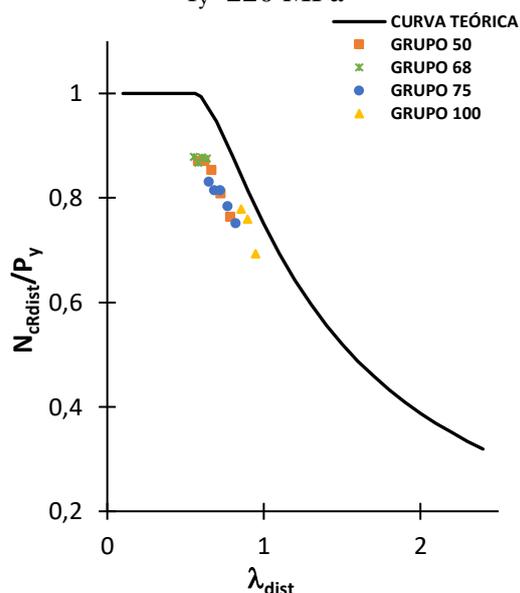
Conforme supracitado, todas as análises envolvendo os perfis do grupo 68 com espessura de 2 mm e do grupo de 100 com espessura de 1,6 e 1,8 mm não apresentaram flambagem distorcional como modo governante e sim como modo local, portanto esses resultados numéricos não apareceram nas figuras.

Figura 27: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 40% b_w - SALES, $f_y=220$ MPa



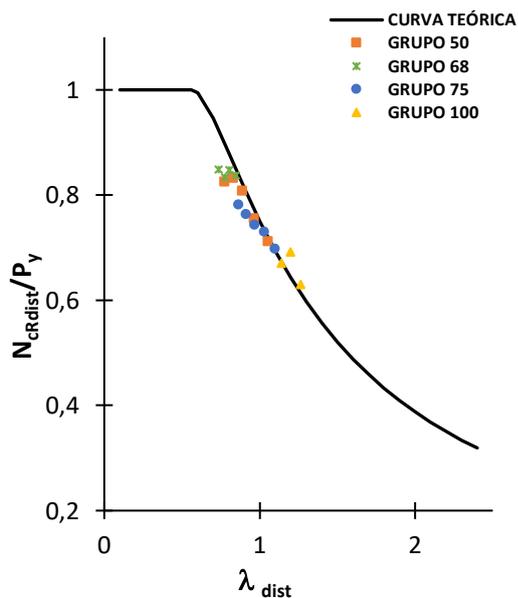
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 28: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 40% b_w - MOEN 2, $f_y=220$ MPa



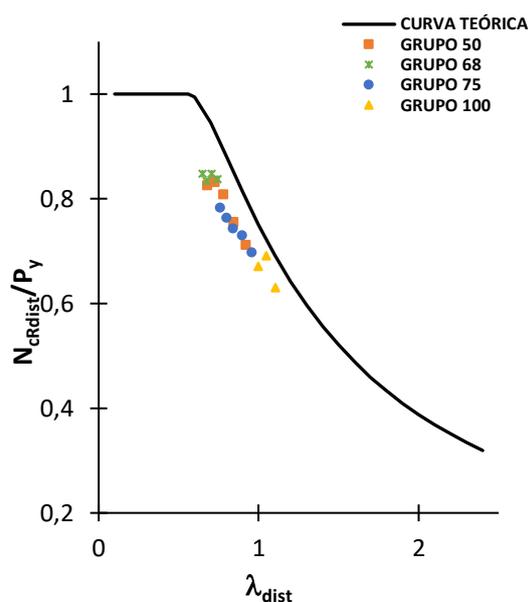
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 29: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 40% b_w - SALES, $f_y=300$ MPa



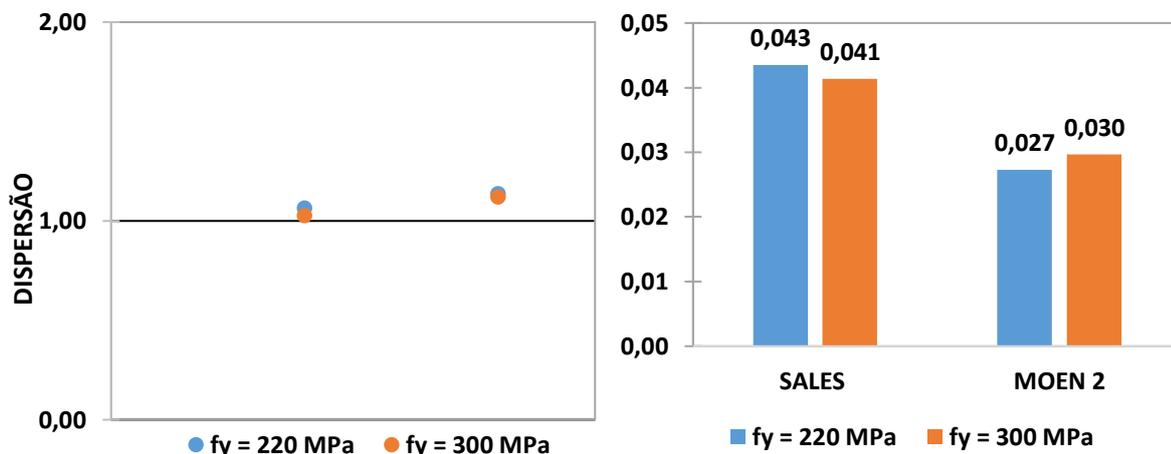
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 30: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 40% b_w - MOEN 2, $f_y=300$ MPa



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

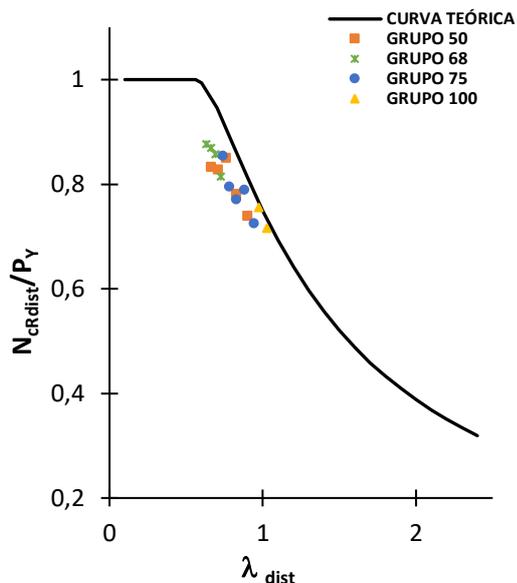
Figura 31: Comparação da dispersão entre os resultados da resistência a compressão propostas pelos métodos teórico e numérico dos perfis U enrijecidos com furos 40% b_w , sendo apresentados a média e o desvio padrão, respectivamente



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

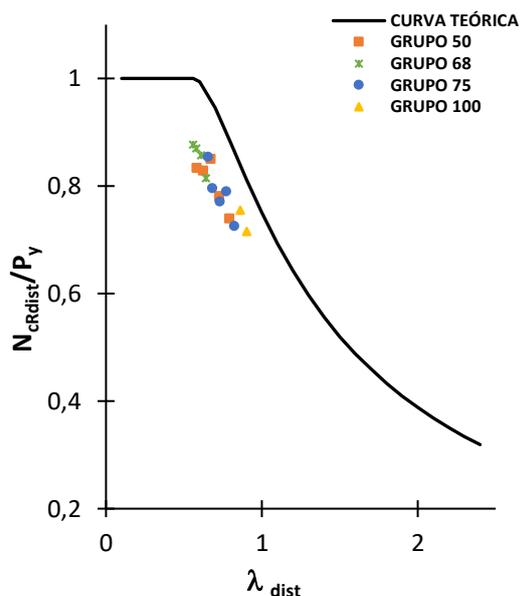
Observa-se que, para a perfuração de 60% de b_w , os valores característicos da força axial de compressão resistente prevista pelo Método da Resistência Direta e os obtidos via modelo numérico pelo ANSYS $\frac{N_{c,Rdist-MRD}}{N_{c,Rdist-ANSYS}}$ têm como valor médio 1,03 e 1,06, e desvio padrão é igual a 0,041 e 0,048 para as tensões de escoamento de 220 e 300 MPa, respectivamente. Já o método MOEN 2 apresentou como valor médio 1,17 e 1,15, e desvio padrão igual a 0,032 e 0,041 para as mesmas tensões de escoamento, respectivamente, conforme ilustrado pela Figura 32 à Figura 36 a seguir.

Figura 32: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 60% b_w - SALES, $f_y=220$ MPa



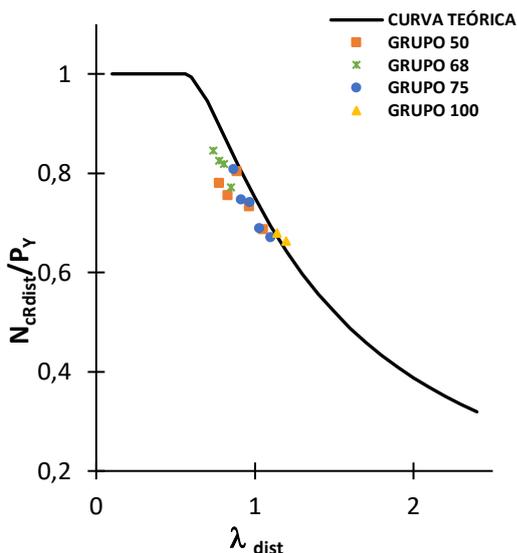
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 33: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 60% b_w - MOEN 2, $f_y=220$ MPa



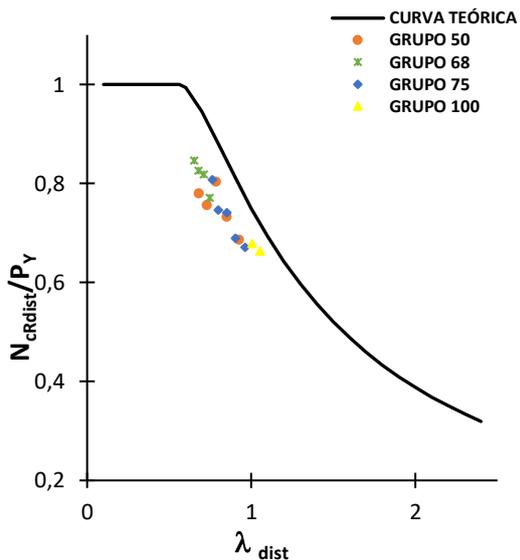
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 34: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 60% b_w - SALES, $f_y=300$ MPa



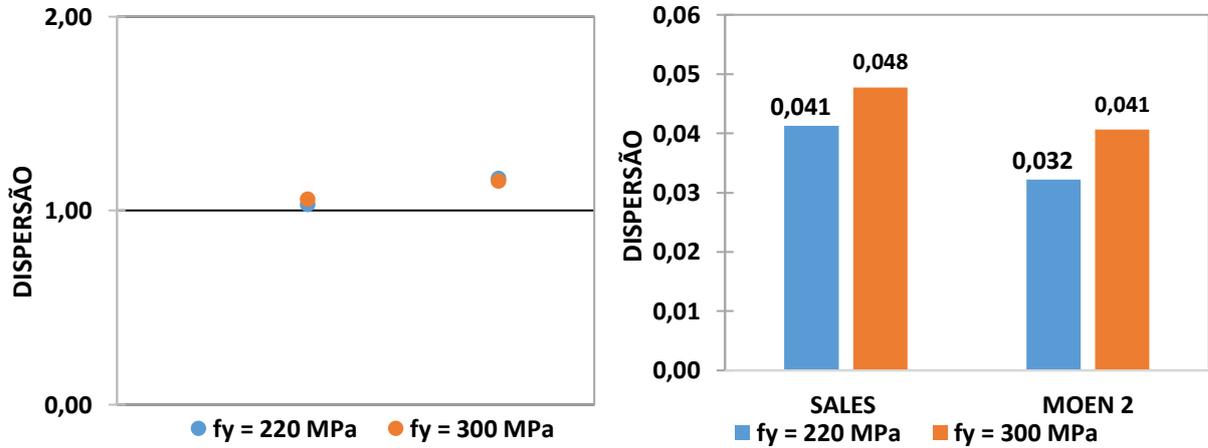
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 35: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 60% b_w - MOEN 2, $f_y=300$ MPa



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

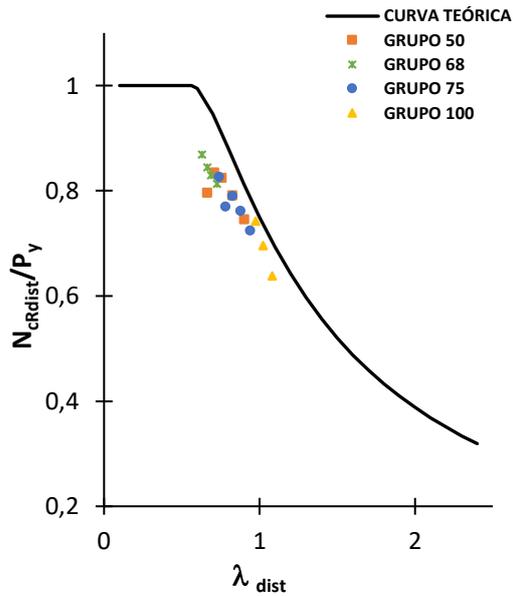
Figura 36: Comparação da dispersão entre os resultados da resistência a compressão propostas pelos métodos teórico e numérico dos perfis U enrijecidos com furos 60% b_w , sendo apresentados a média e o desvio padrão, respectivamente



Fonte: : Elaborada pela autora (2020).

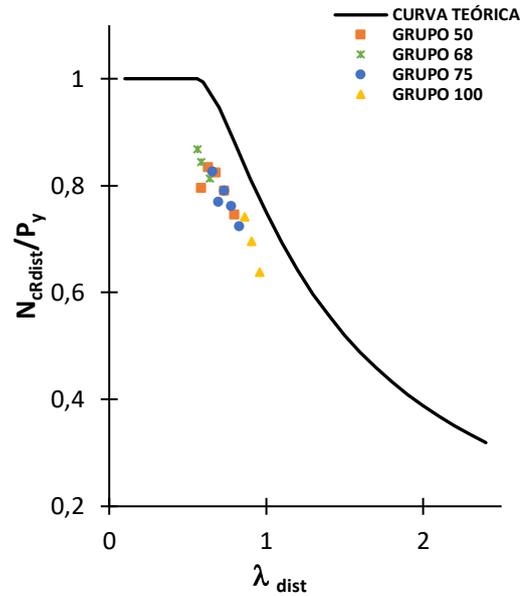
Por fim, como pode ser observado na Figura 37 à Figura 41, percebe-se que o método de Sales (2017) apresenta melhores resultados que o método MOEN 2 (MOEN; SCHAFER, 2009) para a perfuração de 80% de b_w , seguindo a mesma relação das análises anteriores para as perfurações de 20%, 40% e 60%. A proporção entre $\frac{N_{c,Rdist-MRD}}{N_{c,Rdist-ANSYS}}$ tem como valor médio 1,11 e 1,08, e desvio padrão igual a 0,043 e 0,055 para as tensões de escoamento de 220 e 300 MPa, respectivamente. Já o método MOEN 2 apresentou como valor médio 1,18 e 1,17, e desvio padrão igual a 0,030 e 0,044 para as mesmas tensões de escoamento, respectivamente.

Figura 37: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 80% b_w - SALES, $f_y=220$ MPa



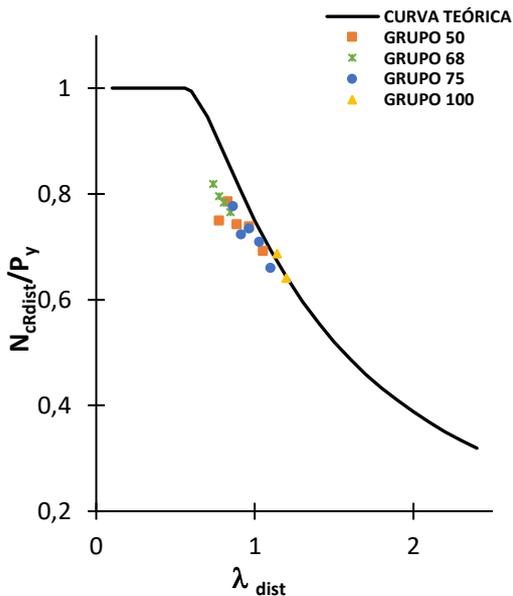
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 38: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 80% b_w , - MOEN 2, $f_y=220$ MPa



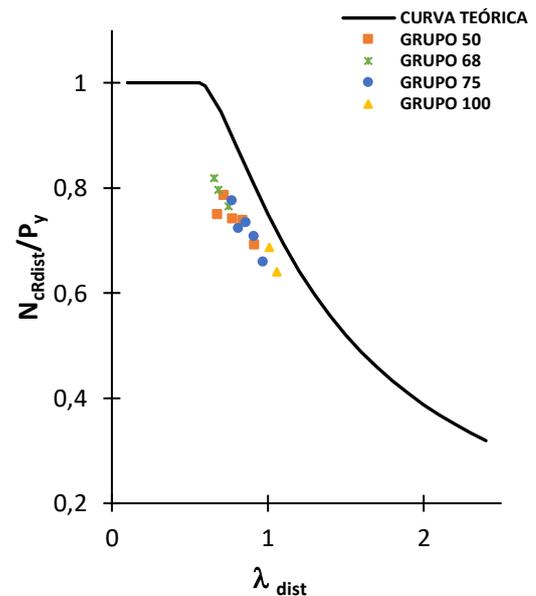
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 39: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 80% b_w - SALES, $f_y=300$ MPa



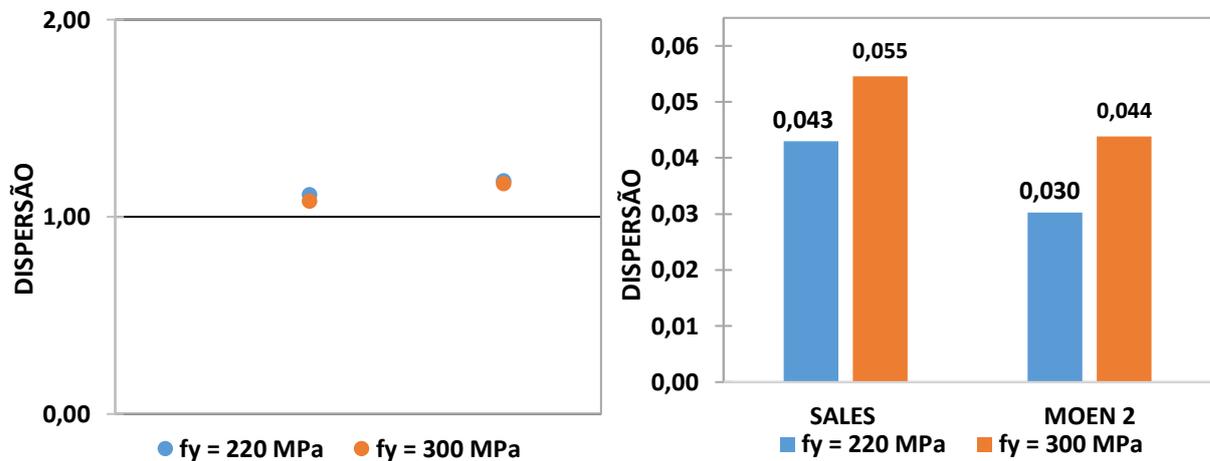
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 40: Resultado das cargas resistentes dos perfis com furos: 80% b_w - MOEN 2, $f_y=300$ MPa



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 41: Comparação da dispersão entre os resultados da resistência a compressão propostas pelos métodos teórico e numérico dos perfis U enrijecidos com furos 80% b_w , sendo apresentados a média e o desvio padrão, respectivamente



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A seguir, a Tabela 3 apresenta o resumo de todos os resultados obtidos para a resistência a compressão propostas pelas adaptações do Método da Resistência Direta e pelo método numérico, avaliando a média e desvio padrão para os quatro grupos de perfurações dos perfis U enrijecidos.

Tabela 3: Resumo dos resultados para a Média e Desvio Padrão encontrados para todos os tipos de perfurações

TIPO DE PERFURAÇÃO		MÉDIA: $\frac{N_{C,Rdist-MRD}}{N_{C,Rdist-ANSYS}}$		DESVIO PADRÃO	
SEM PERFURAÇÕES	$f_y=220\text{MPa}$	1,041		0,032	
	$f_y=300\text{MPa}$	1,012		0,037	
COM PERFURAÇÕES		SALES	MOEN	SALES	MOEN
20 % b_w	$f_y=220\text{MPa}$	1,05	1,12	0,046	0,021
	$f_y=300\text{MPa}$	1,00	1,10	0,048	0,032
40 % b_w	$f_y=220\text{MPa}$	1,06	1,14	0,043	0,027
	$f_y=300\text{MPa}$	1,02	1,12	0,041	0,030
60 % b_w	$f_y=220\text{MPa}$	1,03	1,17	0,041	0,032
	$f_y=300\text{MPa}$	1,06	1,15	0,048	0,041
80 % b_w	$f_y=220\text{MPa}$	1,11	1,18	0,043	0,030
	$f_y=300\text{MPa}$	1,08	1,17	0,055	0,044

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

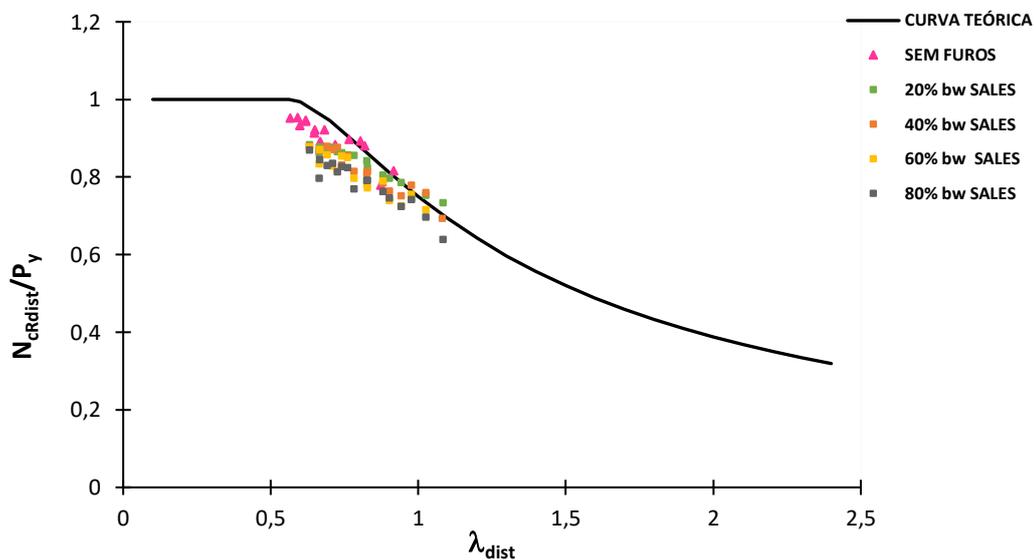
Assim sendo, é possível constatar que houve boa correlação entre os resultados teóricos e numéricos estudados nesta pesquisa.

4.3 ANÁLISE NUMÉRICA DE TODAS AS SECÇÕES ESTUDADAS DOS PERFIS SEM E COM PERFURAÇÕES E COMPARAÇÃO OS RESULTADOS OBTIDOS EM NORMA

Nesta seção são apresentados os resultados numéricos para a força axial de compressão resistente de todas as seções estudadas em um único gráfico, considerando o mesmo método, dividindo a análise para as tensões de escoamento de 220 e 300 MPa, respectivamente, conforme a Figura 42 à Figura 45 apresentadas a seguir. Para o perfil U enrijecido sem perfurações foi adotada a forma geométrica triangular, para o MOEN 2 a forma circular e, por fim, para o método de Sales a forma quadrangular.

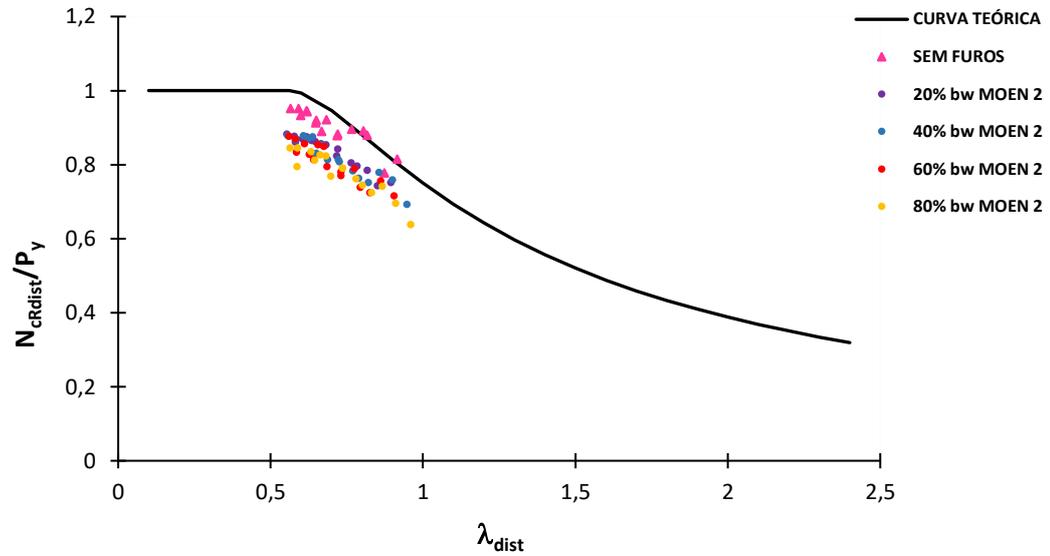
No geral, os resultados numéricos possuem boa correlação com os resultados teóricos, principalmente se for considerado o método de Sales (2017). Isso indica a viabilidade das adaptações do Método da Resistência Direta para a consideração do efeito das perfurações.

Figura 42: Comparação entre a curva de dimensionamento da ABNT NBR 14762 e cargas máximas obtidas para modo distorcional de todos os modelos estudados para o método de SALES com tensão de escoamento de 220 MPa.



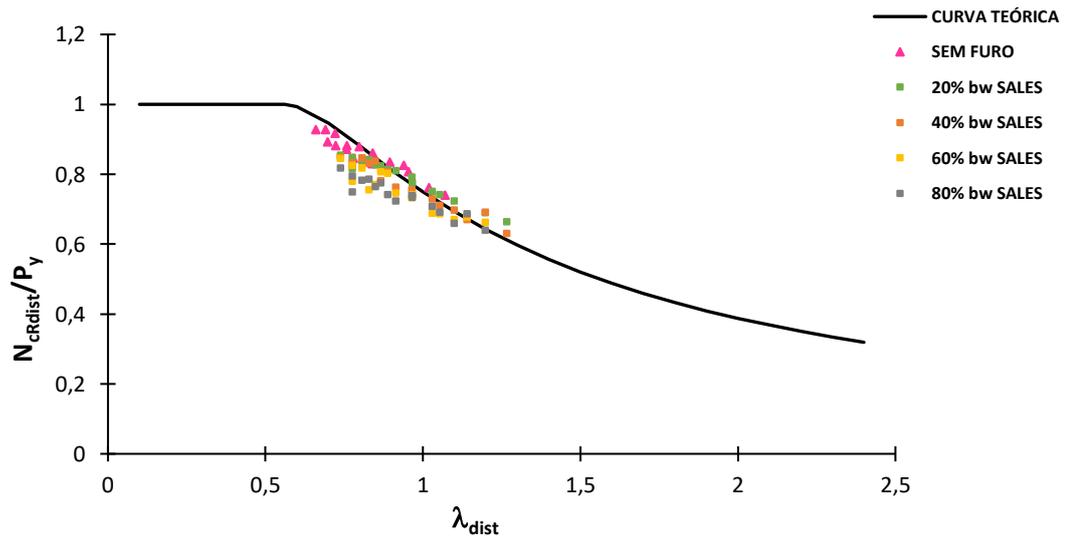
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 43: Comparação entre a curva de dimensionamento da ABNT NBR 14762 e cargas máximas obtidas para modo distorcional de todos os modelos estudados para o método de MOEN 2 com a tensão de escoamento de 220 MPa



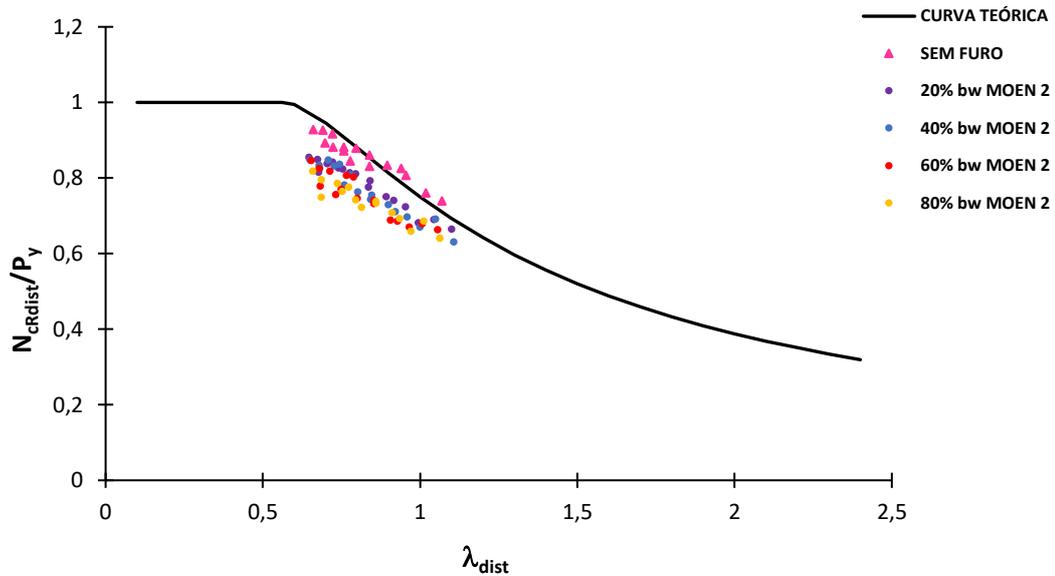
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 44: Comparação entre a curva de dimensionamento da ABNT NBR 14762 e cargas máximas obtidas para modo distorcional de todos os modelos estudados para o método de SALES com tensão de escoamento de 300 MPa



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 45: Comparação entre a curva de dimensionamento da ABNT NBR 14762 e cargas máximas obtidas para modo distorcional de todos os modelos estudados para o método de MOEN 2 com a tensão de escoamento de 300 MPa

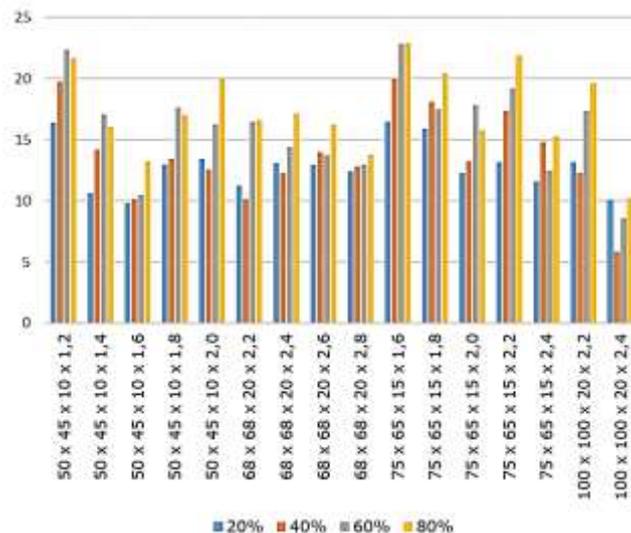


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS PERFURAÇÕES NA RESISTÊNCIA DOS PERFIS U ENRIJECIDOS

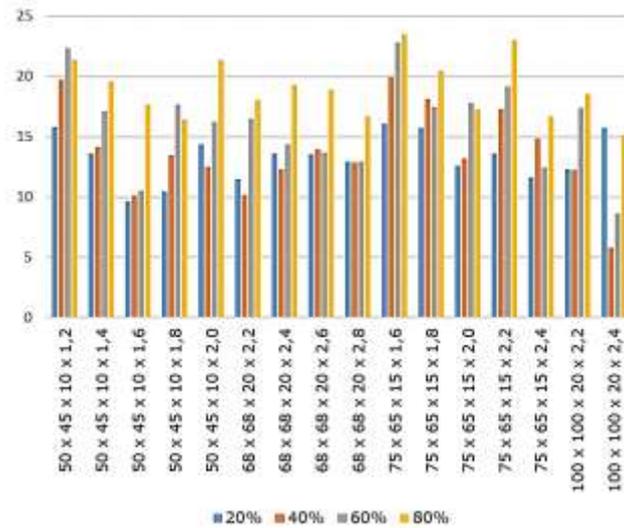
Foi feita ainda a análise da influência das perfurações na resistência dos perfis U enrijecidos. As Figuras 46 e 47 apresentam a redução percentual entre as resistências dos perfis perfurados em relação aos perfis sem perfurações, para todas as seções analisadas.

Figura 46: Redução percentual entre as resistências obtidas no ANSYS dos perfis Ue com perfurações em relação aos perfis Ue sem perfurações para $f_y = 220$ MPa



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Figura 47: Redução percentual entre as resistências obtidas no ANSYS dos perfis Ue com perfurações em relação aos perfis Ue sem perfurações para $f_y = 300$ MPa



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Nas figuras 46 e 47 pode ser visto que a existência das perfurações leva a uma redução da resistência dos perfis. Pode-se ainda observar que, para a maioria das seções analisadas, o aumento do comprimento das perfurações leva a uma maior redução da resistência.

Para os modelos com perfurações com comprimento igual a 20% da largura da alma, as perfurações induzem uma redução da resistência média de 12,84% para os modelos com tensão de escoamento igual a 220 MPa e 13,31% para a tensão de escoamento igual a 300MPa.

Já para os modelos cujas perfurações têm 40% da largura da alma, os perfis com perfurações possuem em média 13,8% e 15,06% de redução da resistência em relação aos perfis sem perfurações, para as tensões de escoamento de 220 MPa e 300MPa respectivamente.

Comportamentos similares vão ocorrer para os perfis com perfurações de comprimento igual a 60% da largura da alma, onde as reduções das resistências dos modelos sem e com perfurações serão de 16,06% para $f_y = 220$ MPa e 17,54% para $f_y = 300$ MPa.

Para os modelos com perfurações de comprimento igual a 80% da largura da alma, observam-se reduções nas resistências considerando as perfurações de 17,36% para $f_y = 220$ MPa e 18,99% para $f_y = 300$ MPa.

A partir da análise destes resultados, observa-se que maiores perfurações levam a maiores reduções na resistência quando se usa como referência o caso sem perfurações. Percebe-se, no

entanto, uma uniformidade na variação desta influência em relação à variação do comprimento do furo, com ligeiro aumento para os furos de comprimento igual a 60% e 80% da largura da alma.

Observa-se ainda que a adoção de um aço com maior tensão de escoamento leva a uma redução ligeiramente maior. Isto pode ser explicado pois, neste caso, o modo distorcional pode se desenvolver com mais liberdade antes da ruptura por escoamento, o que pode fazer com que os efeitos das perfurações sejam mais relevantes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os perfis formados a frio apresentam-se como resposta para variados tipos de sistemas estruturais, visto que o desenvolvimento da indústria metálica no mundo torna contínua a busca por estruturas mais leves, econômicas, eficientes e racionais. Com seu crescente uso, é necessário um estudo aprofundado para entender os fenômenos que interferem em sua capacidade resistente. A análise e o dimensionamento desses perfis têm sido tratados em diversos estudos com o objetivo de prognosticar seu comportamento e ampliar o entendimento quanto aos modos de flambagem.

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a influência das perfurações na estabilidade e na carga máxima dos perfis formados a frio do tipo U enrijecidos sujeitos à flambagem distorcional quando submetidos a uma força de compressão, por meio de métodos numéricos e teóricos, juntamente com a análise de suas respectivas extensões.

A justificativa para a realização deste trabalho se baseou no fato que a existência de furos em um perfil formado a frio tipo U enrijecido pode, além de reduzir sua capacidade resistente, alterar seu comportamento. É importante salientar que existem poucos estudos e respaldos normativos que sugerem o dimensionamento de perfis formados a frio por meio da realização de furos indicando sua magnitude, disposição e forma. Então é neste contexto que se verifica a necessidade de estabelecer procedimentos para dimensionar os elementos formados a frio, demandando-se a proposição de soluções técnicas e econômicas, assim como de alternativas para o desenvolvimento de projetos menos onerosos.

Comparando os resultados de cada grupo, percebeu-se que o grupo de 100 foi o que apresentou os resultados mais discrepantes, isso pode ser explicado por este possuir maior esbeltez se comparado aos demais, e também pelo fato de que, por mais que sejam compelidas condições que irão induzir o perfil a possuir como modo governante a flambagem distorcional, pode ocorrer durante o processo de análise outro modo governante ou interação entre os modos.

Constatou-se que para uma faixa de esbeltez distorcional entre 0,74 e 1,43 a adaptação proposta por Sales apresentou melhores resultados comparados aos de Moen.

Observou-se que as adaptações do Método da Resistência Direta se mostraram promissoras na previsão do comportamento destas estruturas, considerando-se a prevalência do modo de

flambagem distorcional, com diferenças máximas de 11% para a aproximação de Sales e de 18% para a aproximação de Moen.

Foi ainda avaliada a redução da resistência devido à inserção das perfurações nos perfis U enrijecidos. Estas análises indicaram que os furos diminuem a resistência dos perfis Ue, com reduções entre 13% e 19%, sendo tanto maior quanto maior forem as dimensões das perfurações.

Apresentam-se a seguir algumas sugestões para a continuidade deste trabalho:

- Variar as larguras e posições dos furos na alma do perfil;
- Aprofundar a análise da influência das condições de contorno do perfil U enrijecido nos resultados da seção;
- Fazer a mesma análise com furos inclinados.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6355**: Perfis estruturais de aço formados a frio — Padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15253**: Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis reticulados em edificações – Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- AISI – American Iron and Steel Institute. **North American Specification (NAS) for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members (AISI-S100-16)**. Washington DC: AISI, 2016.
- ALMEIDA, Saulo José de Castro. **Análise numérica de perfis de aço formados a frio comprimidos considerando as imperfeições geométricas iniciais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-03122007-093434/publico/2007ME_SauloJCA Almeida.pdf. Acesso em: 24 abr. 2019.
- ANSYS. **SHELL181**. Last modified: April 7th, 2016. Disponível em: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html. Acesso em: 2 junho 2019.
- AS/NZS. **Cold-formed steel structures (AS/NZS 4600:2018)**. Superseding AS/NZS 4600:2005 on 15 May 2019. Sydney-Wellington: AS/NZS, May 15th 2018.
- AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos elementos finitos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Portugal, 2003.
- BEBIANO, Rui; SILVESTRE, Nuno; CAMOTIM, Dinar. GBTUL - A code for the buckling analysis of cold-formed steel members. *In*: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 19., 2008, St. Louis (MO). **Proceedings**. St. Louis (MO): Oct. 14 and 15 2008. p. 61-79.
- BRAGA, Débora Coting. **Avaliação de métodos numéricos de análise linear de estabilidade para perfis de aço formados à frio**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- FARIA, Vinícius de Oliveira. **Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2016.
- HANCOCK, G. J.; KWON, Y. B.; BERNARD, E. S. Strength design curves for thin-walled sections undergoing distortional buckling. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 31, i. 2-3, p. 169-186, 1994.

JARDIM JÚNIOR, Fausto. **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, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2018.

LOTTI, Raquel S.; MACHADO, André Wilson; MAZZIEIRO, Ênio Tonani; LANDRE JÚNIOR, Janes. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **R Dental Press Ortodon Ortop Facial**, Maringá, v. 11, n. 2, p. 35-43, mar./abr. 2006.

MATSUBARA, Gustavo Yoshio. **Análise da interação entre modos de flambagem local e distorcional em perfis de aço formados a frio com seção U enrijecido sob compressão axial**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COOPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

MELENK, J. M.; BABUŠKA, I. The partition of unity finite element method: Basic theory and applications. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 139, i. 1, p. 289-314, Dec. 1996.

MOEN, C. D.; SCHAFER, B. W. **Direct Strength Design of Cold-Formed Steel members with perforations**: Research Report RP 09-1. Washington: American Iron and Steel Institute – Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2009.

NEIVA, Luiz Henrique de Almeida Neiva. **Análise de modos de estabilidade em sistemas de armazenamento**. 2017. Tese (Exame de Qualificação ao Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2017.

OLIVEIRA, Rafael Luiz Galvão de. **Estudo teórico sobre os esforços resistentes de perfis formados a frio com presença de furos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

PAIXÃO, João Fernando Martins. **Dimensionamento via método da resistência direta de colunas em aço inoxidável de parede fina sob falha distorcional**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2018.

SALES, Amaury Eloy Carvalho Araújo. **Análise da aplicação do método da resistência direta a perfis formados a frio com perfurações submetidos à compressão**. 2017. Dissertação (Mestrado Profissional em Construção Metálica) - Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2017.

SANTOS, Elves Tiago dos. **Análise numérica da influência das dimensões das perfurações em perfis formados a frio do tipo rack submetidos à compressão**. 2020. Dissertação (Mestrado profissional em Construção Metálica) – Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2020.

SCHAFER, B. W. Local, distortional and Euler buckling of thin-walled columns. **Journal of Structural Engineering**, v. 128, i. 3, p. 289-299, March 2002.

SCHAFER, B. W. **Distortional buckling of cold-formed steel columns**: Final Report. [Washington DC]: AISI, 2000.

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

SCHAFER, B. W.; YU, C. Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. **Journal of Structural Engineering**, v. 132, n. 4, p. 515-528, Apr. 2006.

SILVA, E. L.; SILVA V. P. E. **Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia; Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2008.

SOUZA, Flávio Teixeira 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, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2013.

SOUZA, Flávio Teixeira de; SANTOS, Elves Tiago dos; SARMANHO, Arlene Maria Cunha. 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. 266-01, 266-20, 2020.

SWANSON ANALYSIS SYSTEMS INC. ANSYS. Vs. 14.5. Houston, USA: 2020.

YU, W. **Cold formed steel design**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

APÊNDICE A – APDL SEM FUROS

Para o perfil 50x45x10x1,2, com $f_y=220$ MPa

finish

/clear

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

/NOPR

/PMETH,OFF,0

KEYW,PR_SET,1

KEYW,PR_STRUC,1

KEYW,PR_THERM,0

KEYW,PR_FLUID,0

KEYW,PR_ELMAG,0

KEYW,MAGNOD,0

KEYW,MAGEDG,0

KEYW,MAGHFE,0

KEYW,MAGELC,0

KEYW,PR_MULTI,0

KEYW,PR_CFD,0

/GO

/VIEW,1,0.3,0.50,-1

!PARÂMETROS

/PREP7

BW=50 !LARGURA DA ALMA

BF=45 !LARGURA DO FLANGE

BS=10 !LARGURA DO ENRRIGECEDOR

ESP=1.2 !ESPESSURA

L=350 !COMPRIMENTO DO MODELO

```

DM=5 !DIMENSSÃO DA MALHA %10 DE BW
!ELEMENTO E MATERIAL
MOD_EST=200000 !MODULO ELASTICIDADE PERFIL
FY=220 !TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)
FU=328!TENSÃO ÚLTIMA (MPa)
EY=(0.7*FY)/MOD_EST !DEFORMAÇÃO NO ESCOAMENTO
ET,1,SHELL181
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,2
KEYOPT,1,8,2
KEYOPT,1,9,0
KEYOPT,1,10,0
R,1,ESP, , , , ,
MPTEMP, 1, , , , ,
MPDATA,EX,1,,MOD_EST
MPDATA,PRXY,1,,0.3
!GERACAO DAS AREAS
K,1,,,
K,2,BW,,,
K,3,BW,,BF,
K,4,BW-BS,,BF,
K,5,BS,,BF,
K,6,0,,BF,
KGEN,2,1,6,1, ,L, , ,0
A,4,3,9,10
A,3,2,8,9
A,1,2,8,7

```

A,6,1,7,12

A,6,5,11,12

!GERACAO DA MALHA

AATT, 1, 1, 1, 0

AESIZE, ALL, DM,

MSHKEY, 0

AMESH, ALL,,

EPLLOT

!APLICACAO DAS RESTRICOES

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

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

ALLSEL,ALL

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

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

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

ALLSEL,ALL

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

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

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

ALLSEL,ALL

!ACOPLAMENTO DOS DESLOCAMENTOS NAS EXTREMIDADES

NSEL,S,LOC,Y,0

CP, NEXT, ALL, ALL

!CP, NEXT, ROTY, ALL

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,L

!CP, NEXT, ROTX, ALL

CP, NEXT, ALL, ALL

ALLSEL,ALL

!APLICACAO DAS CARGAS

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

*GET,NOS,NODE,0,COUNT

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

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

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

ALLSEL,ALL

!_____

!RETIRANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5

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

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

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

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4

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

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

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

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11

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

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

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

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10

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

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

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

FDELE,ALL

!_____

!COLOCANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5

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

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

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

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

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4

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

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

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

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

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11

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

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

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

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

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10

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

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

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

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

ALLSEL,ALL

```

EPlot
save
!SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FLAMBAGEM ELASTICA
/Solu
Antype,0
Pstres,1
Solve
Finish
/Solu
Antype,1
BUCOPT,LANB,20,0,0
MXPAND,20,0,0,0,0.001,
Solve
Finish
EPlot
!ATUALIZAÇÃO DA GEOMETRIA (INTRODUÇÃO DE IMPERFEIÇÕES)
/Prep7
UPgeom,-ESP/2,1,11,'INTRO-IMP','rst',''
!INTRODUÇÃO DO DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO BILINEAR
TB,MISO,1,1,4,0
TBTEMP,0
TBPT,,EY,0.7*FY
TBPT,,3*EY,FY
TBPT,,10*EY,1.01*FY
TBPT,,100*EY,FU
!SOLUÇÃO DO PROBLEMA NÃO LINEAR COM APLICAÇÃO DE
DESLOCAMENTOS
P=(BW+2*BF+2*BS)*ESP*FY

```

```

/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,50,0,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
TIME,P
ARCLEN,1,0,0
ARCTRM,U,15,0,UX
AUTOTS,-1.0
FDELE,ALL
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
F, ALL, FY, P/(NOS-1),
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
F, ALL, FY, -P/(NOS-1),
ALLSEL,ALL
!_____
!RETIRANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA
!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
FDELE,ALL
!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1

```

```

NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
FDELE,ALL
!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
FDELE,ALL
!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
FDELE,ALL
!_____
!COLOCANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA
!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
F,ALL,FY,P/(2*(NOS-1))
!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
F,ALL,FY,P/(2*(NOS-1))
!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1

```

```
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
F,ALL,FY,-P/(2*(NOS-1))
!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
F,ALL,FY,-P/(2*(NOS-1))
ALLSEL,ALL
SOLVE
```


APÊNDICE B – APDL COM FUROS DE 20% bw

Para o perfil 50x45x10x1,2, com $f_y=220$ MPa

finish

/clear

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

/NOPR

/PMETH,OFF,0

KEYW,PR_SET,1

KEYW,PR_STRUC,1

KEYW,PR_THERM,0

KEYW,PR_FLUID,0

KEYW,PR_ELMAG,0

KEYW,MAGNOD,0

KEYW,MAGEDG,0

KEYW,MAGHFE,0

KEYW,MAGELC,0

KEYW,PR_MULTI,0

KEYW,PR_CFD,0

/GO

/VIEW,1,0.3,0.50,-1

!PARÂMETROS

/PREP7

BW=50 !LARGURA DA ALMA

BF=45 !LARGURA DO FLANGE

BS=10 !LARGURA DO ENRRIGECEDOR

ESP=1.2 !ESPESSURA

!L=350 !COMPRIMENTO DO MODELO

DM=5 !DIMENSSÃO DA MALHA %10 DE BW

!

REL=0.2 !RELAÇÃO ENTRE O COMPRIMENTO DO FURO E A LARGURA DA ALMA

DIF=0 !DIFERENÇA NA ABERTURA

h=REL*BW !ALTURA DO FURO

B_FURO=0.1*BW !LARGURA DO FURO

LI=350 !COMPRIMENTO INICIAL DO PROTOTIPO

!DESCONSIDERANDO A COMPATIBILIDADE COM O NUMERO DE FUROS

$N=(LI-MOD(LI,h))/h$!NÚMERO INTEIRO DE INTERVALO

RESTO=MOD(N,2) !N É PAR/IMPARG?. SE RESTO DA DIV $N/2=0$, PAR

*IF,RESTO,EQ,0,THEN

$L=N*h$!COMPR. NEC. DO PROTOTIPO QDO N É PAR

*ELSE

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

*ENDIF

!

!ELEMENTO E MATERIAL

MOD_EST=200000 !MODULO ELASTICIDADE PERFIL

FY=220 !TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)

FU=328 !TENSÃO ÚLTIMA (MPa)

$EY=(0.7*FY)/MOD_EST$!DEFORMAÇÃO NO ESCOAMENTO

ET,1,SHELL181

KEYOPT,1,1,0

KEYOPT,1,3,2

KEYOPT,1,8,2

KEYOPT,1,9,0

KEYOPT,1,10,0

R,1,ESP, , , , , ,

MPTEMP, 1, , , , , ,

MPDATA,EX,1,,MOD_EST

MPDATA,PRXY,1,,0.3

!GERACAO DAS AREAS

K,1,,,

K,2,BW,,,

K,3,BW,,BF,

K,4,BW-BS,,BF,

K,5,BS,,BF,

K,6,0,,BF,

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

A,4,3,9,10

A,3,2,8,9

A,1,2,8,7

A,6,1,7,12

A,6,5,11,12

!

!INCERÇÃO DOS FUROS

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

BLC4,2*BW/10,Y,BW/10,REL*BW

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

*ENDDO

ASEL,S,LOC,Z,0

ASBA,3,ALL

ALLSEL, ALL

!

!GERACAO DA MALHA

AATT, 1, 1, 1, 0

AESIZE, ALL, DM,

MSHKEY, 0

AMESH, ALL,,

EPLLOT

!APLICACAO DAS RESTRICOES

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

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

ALLSEL,ALL

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

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

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

ALLSEL,ALL

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

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

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

ALLSEL,ALL

!ACOPLAMENTO DOS DESLOCAMENTOS NAS EXTREMIDADES

NSEL,S,LOC,Y,0

CP, NEXT, ALL, ALL

!CP, NEXT, ROTY, ALL

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,L

!CP, NEXT, ROTX, ALL

CP, NEXT, ALL, ALL

ALLSEL,ALL

!APLICACAO DAS CARGAS

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

*GET,NOS,NODE,0,COUNT

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

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

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

ALLSEL,ALL

!_____

!RETIRANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5

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

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

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

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4

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

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

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

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11

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

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

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

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10

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

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

```
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
FDELE,ALL
!_____
!COLOCANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA
!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
F,ALL,FY,1/(2*(NOS-1))
!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
F,ALL,FY,1/(2*(NOS-1))
!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
F,ALL,FY,-1/(2*(NOS-1))
!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
F,ALL,FY,-1/(2*(NOS-1))
ALLSEL,ALL
EPLOT
SAVE
```

!SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FLAMBAGEM ELASTICA

/SOLU

ANTYPE,0

PSTRES,1

SOLVE

FINISH

/SOLU

ANTYPE,1

BUCOPT,LANB,20,0,0

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

SOLVE

FINISH

EPLOT

!ATUALIZACAO DA GEOMETRIA (INTRODUCAO DE IMPERFEIÇÕES)

/PREP7

UPGEOM,-ESP/2,1,9,'INTRO-IMP','rst',''

!INTRODUÇÃO DO DIAGRAMA TENSAO-DEFORMAÇÃO BILINEAR

TB,MISO,1,1,4,0

TBTEMP,0

TBPT,,EY,0.7*FY

TBPT,,3*EY,FY

TBPT,,10*EY,1.01*FY

TBPT,,100*EY,FU

! SOLUÇÃO DO PROBLEMA NÃO LINEAR COM APLICAÇÃO DE
DESLOCAMENTOS

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

/SOL

ANTYPE,0

```

NLGEOM,1
NSUBST,50,0,0
NSUBST,100,0,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
TIME,P
ARCLLEN,1,0,0
ARCTRM,U,15,0,UX
AUTOTS,-1.0
FDELE,ALL
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
F, ALL, FY, P/(NOS-1),
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
F, ALL, FY,-P/(NOS-1),
ALLSEL,ALL
!_____
!RETIRANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA
!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BS-0.1,BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1
FDELE,ALL
!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,R,LOC,X,BW-BS-0.1,BW-BS+0.1
NSEL,R,LOC,Z,BF-0.1,BF+0.1

```

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11

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

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

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

FDELE,ALL

!RETINRANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10

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

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

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

FDELE,ALL

!_____

!COLOCANDO O CARREGAMENTO DOS NÓS DA BORDA

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 5

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

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

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

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

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 4

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

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

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

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

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 11

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

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

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

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

!COLOCANDO CARREGAMENTO NO NÓ DO KPOINT 10

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

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

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

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

ALLSEL,ALL

SOLVE

APÊNDICE C – TABELAS

Tabela 4: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis sem furos – $f_y=220$ MPa

SEÇÃO ANALISADA (mm)		PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO					GBTUL	MRD	ANSYS	DISPERSÃO
		b_w	b_f	b_l	t	Área	N_{dist}	$N_{c,Rdist} - MRD$	$N_{c,Rdist} - ANSYS$	Valor característico da força axial de compressão resistente
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm ²)	(KN)	(KN)	(KN)	(%)
GRUPO 50	50 x 45 x 10 x 1,2	50	45	10	1,2	192,00	65,36	37,06	37,69	0,98
	50 x 45 x 10 x 1,4				1,4	224,00	95,37	46,03	43,51	1,06
	50 x 45 x 10 x 1,6				1,6	256,00	126,91	54,37	50,16	1,08
	50 x 45 x 10 x 1,8				1,8	288,00	165,54	62,59	59,73	1,05
	50 x 45 x 10 x 2,0				2,0	320,00	197,25	70,03	65,67	1,07
GRUPO 68	68 x 68 x 20 x 2,0	68	68	20	2,0	488,00	229,76	102,59	*	*
	68 x 68 x 20 x 2,2				2,2	536,80	280,66	115,09	108,74	1,06
	68 x 68 x 20 x 2,4				2,4	585,60	338,05	127,33	121,81	1,05
	68 x 68 x 20 x 2,6				2,6	634,40	400,15	139,08	132,91	1,05
	68 x 68 x 20 x 2,8				2,8	683,20	470,27	150,29	143,00	1,05
GRUPO 75	75 x 65 x 15 x 1,6	75	65	15	1,6	376,00	123,91	71,83	72,76	0,99
	75 x 65 x 15 x 1,8				1,8	423,00	158,76	84,05	83,38	1,01
	75 x 65 x 15 x 2,0				2,0	470,00	200,34	96,60	90,82	1,06
	75 x 65 x 15 x 2,2				2,2	517,00	244,33	108,77	104,86	1,04
	75 x 65 x 15 x 2,4				2,4	564,00	295,91	120,99	113,34	1,07
GRUPO 100	100 x 100 x 20 x 1,6	100	100	20	1,6	544,00	100,59	83,54	*	*
	100 x 100 x 20 x 1,8				1,8	612,00	128,79	99,19	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,0				2,0	680,00	160,58	115,38	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,2				2,2	748,00	196,29	132,09	134,12	0,98
	100 x 100 x 20 x 2,4				2,4	816,00	236,12	149,25	139,69	1,07

Obs.: * Perfis apresentaram flambagem local.

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 5: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis sem furos – $f_y=300$ MPa

SEÇÃO ANALISADA (mm)		PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO					GBTUL	MRD	ANSYS	DISPERSÃO
		b_w	b_f	b_l	t	Área	N_{dist}	$N_{c,Rdist} - MRD$	$N_{c,Rdist} - ANSYS$	Valor característico da força axial de compressão resistente
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm ²)	(KN)	(KN)	(KN)	(%)
GRUPO 50	50 x 45 x 10 x 1,2	50	45	10	1,2	192,00	65,36	45,38	47,56	0,95
	50 x 45 x 10 x 1,4				1,4	224,00	95,37	57,34	57,82	0,99
	50 x 45 x 10 x 1,6				1,6	256,00	126,91	68,73	64,90	1,06
	50 x 45 x 10 x 1,8				1,8	288,00	165,54	80,50	76,18	1,06
	50 x 45 x 10 x 2,0				2,0	320,00	197,25	90,93	85,78	1,06
GRUPO 68	68 x 68 x 20 x 2,0	68	68	20	2,0	488,00	229,76	129,00	*	*
	68 x 68 x 20 x 2,2				2,2	536,80	280,66	146,33	142,08	1,03
	68 x 68 x 20 x 2,4				2,4	585,60	338,05	163,85	161,04	1,02
	68 x 68 x 20 x 2,6				2,6	634,40	400,15	181,19	176,46	1,03
	68 x 68 x 20 x 2,8				2,8	683,20	470,27	198,54	190,18	1,04
GRUPO 75	75 x 65 x 15 x 1,6	75	65	15	1,6	376,00	123,91	87,78	91,08	0,96
	75 x 65 x 15 x 1,8				1,8	423,00	158,76	103,65	105,88	0,98
	75 x 65 x 15 x 2,0				2,0	470,00	200,34	120,35	117,14	1,03
	75 x 65 x 15 x 2,2				2,2	517,00	244,33	136,82	136,39	1,00
	75 x 65 x 15 x 2,4				2,4	564,00	295,91	153,89	147,57	1,04
GRUPO 100	100 x 100 x 20 x 1,6	100	100	20	1,6	544,00	100,59	99,25	*	*
	100 x 100 x 20 x 1,8				1,8	612,00	128,79	118,42	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,0				2,0	680,00	160,58	138,44	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,2				2,2	748,00	196,29	159,31	166,10	0,96
	100 x 100 x 20 x 2,4				2,4	816,00	236,12	180,95	186,41	0,97

Obs.: * Perfis apresentaram flambagem local.

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 6: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 20% b_w , $f_y=220$ MPa

SEÇÃO ANALISADA (mm)		PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO COM FUROS			GBTUL COM FURO: SALES	GBTUL COM FURO: MOEN 2	MRD SALES	MRD MOEN2	ANSYS	DISPERSÃO	
		A_n	t_{fic}	$t_{web,hole}$	N_{dist}	N_{dist}	$N_{c,Rdist} -$ MRD SALES	$N_{c,Rdist} -$ MRD MOEN2	$N_{c,Rdist} -$ ANSYS	Valor característico da força axial de compressão resistente:	Valor característico da força axial de compressão resistente:
		(mm ²)	(mm)	(mm)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(%)	(%)
GRUPO 50	50 x 45 x 10 x 1,2	180,00	0,96	1,188	48,73	64,57	32,15	35,30	31,52	1,02	1,12
	50 x 45 x 10 x 1,4	210,00	1,12	1,384	67,78	89,37	39,85	43,14	38,90	1,02	1,11
	50 x 45 x 10 x 1,6	240,00	1,28	1,582	91,52	119,70	47,90	51,03	45,26	1,06	1,13
	50 x 45 x 10 x 1,8	270,00	1,44	1,780	118,02	155,90	55,83	58,71	52,01	1,07	1,13
	50 x 45 x 10 x 2,0	300,00	1,60	1,988	149,78	196,31	63,80	65,90	56,86	1,12	1,16
GRUPO 68	68 x 68 x 20 x 2,0	460,80	1,60	1,983	172,78	233,67	91,54	98,28	*	*	*
	68 x 68 x 20 x 2,2	506,88	1,76	2,182	211,6	277,82	103,64	109,47	96,52	1,07	1,13
	68 x 68 x 20 x 2,4	552,96	1,92	2,378	255,38	334,49	115,77	120,82	105,88	1,09	1,14
	68 x 68 x 20 x 2,6	599,04	2,08	2,576	298,58	395,71	127,36	131,65	115,65	1,10	1,14
	68 x 68 x 20 x 2,8	645,12	2,24	2,774	355,95	464,81	139,46	141,93	125,24	1,11	1,13
GRUPO 75	75 x 65 x 15 x 1,6	352,00	1,28	1,585	87,38	116,44	60,88	67,33	60,81	1,00	1,11
	75 x 65 x 15 x 1,8	396,00	1,44	1,782	112,38	149,58	71,94	78,83	70,12	1,03	1,12
	75 x 65 x 15 x 2,0	440,00	1,60	1,978	141,49	189,07	83,40	90,61	79,70	1,05	1,14
	75 x 65 x 15 x 2,2	484,00	1,76	2,175	174,06	229,87	94,99	101,94	91,02	1,04	1,12
	75 x 65 x 15 x 2,4	528,00	1,92	2,373	211,84	278,52	106,86	113,37	100,20	1,07	1,13
GRUPO 100	100 x 100 x 20 x 1,6	512,00	1,28	1,588	74,78	99,54	70,87	80,31	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 1,8	576,00	1,44	1,786	94,86	127,41	84,13	95,25	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,0	640,00	1,60	1,982	120,08	158,97	98,90	110,72	103,19	0,96	1,07
	100 x 100 x 20 x 2,2	704,00	1,76	2,180	147,34	194,30	113,84	126,62	116,51	0,98	1,09
	100 x 100 x 20 x 2,4	768,00	1,92	2,377	177,52	233,72	129,22	142,93	125,61	1,03	1,14

Obs.: * Perfis apresentaram flambagem local.

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 7: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 20% b_w , $f_y=300$ MPa

SEÇÃO ANALISADA (mm)		PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO COM FUROS			GBTUL COM FURO: SALES	GBTUL COM FURO: MOEN 2	MRD SALES	MRD MOEN2	ANSYS	DISPERSÃO	
		A_n	t_{fic}	$t_{web,hole}$	N_{dist}	N_{dist}	$N_{c,Rdist}$ – MRD SALES	$N_{c,Rdist}$ – MRD MOEN2	$N_{c,Rdist}$ – ANSYS	Valor característico da força axial de compressão resistente: SALES	Valor característico da força axial de compressão resistente: MOEN2
		(mm ²)	(mm)	(mm)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(%)	(%)
GRUPO 50	50 x 45 x 10 x 1,2	180,00	0,96	1,188	48,73	64,57	38,84	43,38	40,04	0,97	1,08
	50 x 45 x 10 x 1,4	210,00	1,12	1,384	67,78	89,37	48,63	53,74	49,96	0,97	1,08
	50 x 45 x 10 x 1,6	240,00	1,28	1,582	91,52	119,70	59,14	64,55	58,63	1,01	1,10
	50 x 45 x 10 x 1,8	270,00	1,44	1,780	118,02	155,90	69,71	75,55	68,22	1,02	1,11
	50 x 45 x 10 x 2,0	300,00	1,60	1,988	149,78	196,31	80,71	86,34	73,48	1,10	1,18
GRUPO 68	68 x 68 x 20 x 2,0	460,80	1,60	1,983	172,78	233,67	112,87	124,53	*	*	*
	68 x 68 x 20 x 2,2	506,88	1,76	2,182	211,6	277,82	128,89	139,96	125,81	1,02	1,11
	68 x 68 x 20 x 2,4	552,96	1,92	2,378	255,38	334,49	145,30	156,46	139,12	1,04	1,12
	68 x 68 x 20 x 2,6	599,04	2,08	2,576	298,58	395,71	161,08	172,73	152,61	1,06	1,13
	68 x 68 x 20 x 2,8	645,12	2,24	2,774	355,95	464,81	178,44	188,94	165,55	1,08	1,14
GRUPO 75	75 x 65 x 15 x 1,6	352,00	1,28	1,585	87,38	116,44	73,22	82,29	76,45	0,96	1,08
	75 x 65 x 15 x 1,8	396,00	1,44	1,782	112,38	149,58	87,12	97,25	89,24	0,98	1,09
	75 x 65 x 15 x 2,0	440,00	1,60	1,978	141,49	189,07	101,75	112,97	102,43	0,99	1,10
	75 x 65 x 15 x 2,2	484,00	1,76	2,175	174,06	229,87	116,76	128,29	117,79	0,99	1,09
	75 x 65 x 15 x 2,4	528,00	1,92	2,373	211,84	278,52	132,45	144,29	130,47	1,02	1,11
GRUPO 100	100 x 100 x 20 x 1,6	512,00	1,28	1,588	74,78	99,54	83,54	95,58	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 1,8	576,00	1,44	1,786	94,86	127,41	99,54	113,96	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,0	640,00	1,60	1,982	120,08	158,97	117,55	133,17	127,67	0,92	1,04
	100 x 100 x 20 x 2,2	704,00	1,76	2,180	147,34	194,30	135,89	153,12	145,68	0,93	1,05
	100 x 100 x 20 x 2,4	768,00	1,92	2,377	177,52	233,72	154,91	173,79	157,04	0,99	1,11

Obs.: * Perfis apresentaram flambagem local.

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 8: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 40% b_w , $f_y=220$ MPa

SEÇÃO ANALISADA (mm)		PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO COM FUROS			GBTUL COM FURO: SALES	GBTUL COM FURO: MOEN 2	MRD SALES	MRD MOEN2	ANSYS	DISPERSÃO	
		A_n	t_{fic}	$t_{web,hole}$	N_{dist}	N_{dist}	$N_{c,Rdist} - MRD SALES$	$N_{c,Rdist} - MRD MOEN2$	$N_{c,Rdist} - ANSYS$	Valor característico da força axial de compressão resistente:	Valor característico da força axial de compressão resistente:
		(mm ²)	(mm)	(mm)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(%)	(%)
GRUPO 50	50 x 45 x 10 x 1,2	180,00	0,96	1,177	48,73	63,75	32,15	35,16	30,25	1,06	1,16
	50 x 45 x 10 x 1,4	210,00	1,12	1,368	67,78	88,10	39,85	42,99	37,34	1,07	1,15
	50 x 45 x 10 x 1,6	240,00	1,28	1,564	91,52	117,90	47,90	50,89	45,08	1,06	1,13
	50 x 45 x 10 x 1,8	270,00	1,44	1,759	118,02	153,82	55,83	58,61	51,69	1,08	1,13
	50 x 45 x 10 x 2,0	300,00	1,60	1,975	149,78	194,78	63,80	65,88	57,45	1,11	1,15
GRUPO 68	68 x 68 x 20 x 2,0	460,80	1,60	1,966	172,78	230,82	91,54	98,06	*	*	*
	68 x 68 x 20 x 2,2	506,88	1,76	2,163	211,6	274,84	103,64	109,30	97,68	1,06	1,12
	68 x 68 x 20 x 2,4	552,96	1,92	2,356	255,38	330,93	115,77	120,70	106,82	1,08	1,13
	68 x 68 x 20 x 2,6	599,04	2,08	2,552	298,58	391,27	127,36	131,58	114,34	1,11	1,15
	68 x 68 x 20 x 2,8	645,12	2,24	2,748	355,95	459,36	139,46	141,91	124,66	1,12	1,14
GRUPO 75	75 x 65 x 15 x 1,6	352,00	1,28	1,570	87,38	115,04	60,88	67,07	58,22	1,05	1,15
	75 x 65 x 15 x 1,8	396,00	1,44	1,763	112,38	147,43	71,94	78,51	68,26	1,05	1,15
	75 x 65 x 15 x 2,0	440,00	1,60	1,955	141,49	185,95	83,40	90,24	78,81	1,06	1,15
	75 x 65 x 15 x 2,2	484,00	1,76	2,150	174,06	226,38	94,99	101,61	86,70	1,10	1,17
	75 x 65 x 15 x 2,4	528,00	1,92	2,345	211,84	274,99	106,86	113,13	96,53	1,11	1,17
GRUPO 100	100 x 100 x 20 x 1,6	512,00	1,28	1,576	74,78	98,61	70,87	79,99	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 1,8	576,00	1,44	1,771	94,86	126,10	84,13	94,85	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,0	640,00	1,60	1,964	120,08	157,08	98,90	110,21	97,61	1,01	1,13
	100 x 100 x 20 x 2,2	704,00	1,76	2,160	147,34	192,03	113,84	126,09	117,67	0,97	1,07
	100 x 100 x 20 x 2,4	768,00	1,92	2,353	177,52	230,84	129,22	142,32	131,58	0,98	1,08

Obs.: * Perfis apresentaram flambagem local.

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 9: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 40% b_w , $f_y=300$ MPa

SEÇÃO ANALISADA (mm)		PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO COM FUROS			GBTUL COM FURO: SALES	GBTUL COM FURO: MOEN 2	MRD SALES	MRD MOEN2	ANSYS	DISPERSÃO	
		A_n	t_{fic}	$t_{web,hole}$	N_{dist}	N_{dist}	$N_{c,Rdist} -$ MRD SALES	$N_{c,Rdist} -$ MRD MOEN2	$N_{c,Rdist} -$ ANSYS	Valor característico da força axial de compressão resistente:	Valor característico da força axial de compressão resistente:
		(mm ²)	(mm)	(mm)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(%)	(%)
GRUPO 50	50 x 45 x 10 x 1,2	180,00	0,96	1,177	48,73	63,75	38,84	43,18	38,43	1,01	1,12
	50 x 45 x 10 x 1,4	210,00	1,12	1,368	67,78	88,10	48,63	53,49	47,61	1,02	1,12
	50 x 45 x 10 x 1,6	240,00	1,28	1,564	91,52	117,90	59,14	64,26	58,20	1,02	1,10
	50 x 45 x 10 x 1,8	270,00	1,44	1,759	118,02	153,82	69,71	75,30	67,40	1,03	1,12
	50 x 45 x 10 x 2,0	300,00	1,60	1,975	149,78	194,78	80,71	86,20	74,31	1,09	1,16
GRUPO 68	68 x 68 x 20 x 2,0	460,80	1,60	1,966	172,78	230,82	112,87	124,09	*	*	*
	68 x 68 x 20 x 2,2	506,88	1,76	2,163	211,6	274,84	128,89	139,55	127,36	1,01	1,10
	68 x 68 x 20 x 2,4	552,96	1,92	2,356	255,38	330,93	145,30	156,07	140,63	1,03	1,11
	68 x 68 x 20 x 2,6	599,04	2,08	2,552	298,58	391,27	161,08	172,34	149,89	1,07	1,15
	68 x 68 x 20 x 2,8	645,12	2,24	2,748	355,95	459,36	178,44	188,57	164,20	1,09	1,15
GRUPO 75	75 x 65 x 15 x 1,6	352,00	1,28	1,570	87,38	115,04	73,22	81,91	73,69	0,99	1,11
	75 x 65 x 15 x 1,8	396,00	1,44	1,763	112,38	147,43	87,12	96,75	86,75	1,00	1,12
	75 x 65 x 15 x 2,0	440,00	1,60	1,955	141,49	185,95	101,75	112,35	98,12	1,04	1,15
	75 x 65 x 15 x 2,2	484,00	1,76	2,150	174,06	226,38	116,76	127,68	110,94	1,05	1,15
	75 x 65 x 15 x 2,4	528,00	1,92	2,345	211,84	274,99	132,45	143,78	123,93	1,07	1,16
GRUPO 100	100 x 100 x 20 x 1,6	512,00	1,28	1,576	74,78	98,61	83,54	95,17	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 1,8	576,00	1,44	1,771	94,86	126,10	99,54	113,44	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,0	640,00	1,60	1,964	120,08	157,08	117,55	132,49	121,09	0,97	1,09
	100 x 100 x 20 x 2,2	704,00	1,76	2,160	147,34	192,03	135,89	152,38	146,10	0,93	1,04
	100 x 100 x 20 x 2,4	768,00	1,92	2,353	177,52	230,84	154,91	172,93	154,58	1,00	1,12

Obs.: * Perfis apresentaram flambagem local.

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 10: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 60% b_w , $f_y=220$ MPa

SEÇÃO ANALISADA (mm)		PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO COM FUROS			GBTUL COM FURO: SALES	GBTUL COM FURO: MOEN2	MRD SALES	MRD MOEN2	ANSYS	DISPERSÃO	
		A_n	t_{fic}	$t_{web,hole}$	N_{dist}	N_{dist}	$N_{c,Rdist}$ - MRD SALES	$N_{c,Rdist}$ - MRD MOEN2	$N_{c,Rdist}$ - ANSYS	Valor característico da força axial de compressão resistente: SALES	Valor característico da força axial de compressão resistente: MOEN2
		(mm ²)	(mm)	(mm)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(%)	(%)
GRUPO 50	50 x 45 x 10 x 1,2	180,00	0,96	1,165	48,73	62,85	32,15	35,01	29,27	1,10	1,20
	50 x 45 x 10 x 1,4	210,00	1,12	1,352	67,78	86,83	39,85	42,83	36,07	1,10	1,19
	50 x 45 x 10 x 1,6	240,00	1,28	1,545	91,52	116,01	47,90	50,73	44,89	1,07	1,13
	50 x 45 x 10 x 1,8	270,00	1,44	1,738	118,02	151,83	55,83	58,52	49,19	1,13	1,19
	50 x 45 x 10 x 2,0	300,00	1,60	1,963	149,78	193,38	63,80	65,85	55,00	1,16	1,20
GRUPO 68	68 x 68 x 20 x 2,0	460,80	1,60	1,949	172,78	222,96	91,54	97,41	*	*	*
	68 x 68 x 20 x 2,2	506,88	1,76	2,144	211,6	271,86	103,64	109,12	90,84	1,14	1,20
	68 x 68 x 20 x 2,4	552,96	1,92	2,333	255,38	327,20	115,77	120,56	104,29	1,11	1,16
	68 x 68 x 20 x 2,6	599,04	2,08	2,527	298,58	391,41	127,36	131,59	114,69	1,11	1,15
	68 x 68 x 20 x 2,8	645,12	2,24	2,722	355,95	453,93	139,46	141,92	124,48	1,12	1,14
GRUPO 75	75 x 65 x 15 x 1,6	352,00	1,28	1,555	87,38	113,66	60,88	66,81	56,17	1,08	1,19
	75 x 65 x 15 x 1,8	396,00	1,44	1,744	112,38	145,30	71,94	78,18	68,81	1,05	1,14
	75 x 65 x 15 x 2,0	440,00	1,60	1,931	141,49	181,60	83,40	89,71	74,64	1,12	1,20
	75 x 65 x 15 x 2,2	484,00	1,76	2,124	174,06	227,70	94,99	101,74	84,73	1,12	1,20
	75 x 65 x 15 x 2,4	528,00	1,92	2,317	211,84	270,50	106,86	112,81	99,21	1,08	1,14
GRUPO 100	100 x 100 x 20 x 1,6	512,00	1,28	1,564	74,78	97,69	70,87	79,68	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 1,8	576,00	1,44	1,757	94,86	126,32	84,13	94,92	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,0	640,00	1,60	1,945	120,08	156,73	98,90	110,12	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,2	704,00	1,76	2,140	147,34	189,78	113,84	125,55	110,84	1,03	1,13
	100 x 100 x 20 x 2,4	768,00	1,92	2,329	177,52	227,96	129,22	141,71	127,70	1,01	1,11

Obs.: * Perfis apresentaram flambagem local.

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 11: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 60% b_w , $f_y=300$ MPa

SEÇÃO ANALISADA (mm)		PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO COM FUROS			GBTUL COM FURO: SALES	GBTUL COM FURO: MOEN 2	MRD SALES	MRD MOEN2	ANSYS	DISPERSÃO	
		A_n	t_{fic}	$t_{web,hole}$	N_{dist}	N_{dist}	$N_{c,Rdist} - MRD$ SALES	$N_{c,Rdist} - MRD$ MOEN2	$N_{c,Rdist} -$ ANSYS	Valor característico da força axial de compressão resistente:	Valor característico da força axial de compressão resistente:
		(mm ²)	(mm)	(mm)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(%)	(%)
GRUPO 50	50 x 45 x 10 x 1,2	180,00	0,96	1,165	48,73	62,85	38,84	42,95	37,08	1,05	1,16
	50 x 45 x 10 x 1,4	210,00	1,12	1,352	67,78	86,83	48,63	53,23	46,15	1,05	1,15
	50 x 45 x 10 x 1,6	240,00	1,28	1,545	91,52	116,01	59,14	63,95	57,87	1,02	1,11
	50 x 45 x 10 x 1,8	270,00	1,44	1,738	118,02	151,83	69,71	75,05	61,23	1,14	1,23
	50 x 45 x 10 x 2,0	300,00	1,60	1,963	149,78	193,38	80,71	86,08	70,17	1,15	1,23
GRUPO 68	68 x 68 x 20 x 2,0	460,80	1,60	1,949	172,78	222,96	112,87	122,83	*	*	*
	68 x 68 x 20 x 2,2	506,88	1,76	2,144	211,6	271,86	128,89	139,15	117,26	1,10	1,19
	68 x 68 x 20 x 2,4	552,96	1,92	2,333	255,38	327,20	145,30	155,65	135,82	1,07	1,15
	68 x 68 x 20 x 2,6	599,04	2,08	2,527	298,58	391,41	161,08	172,35	148,39	1,09	1,16
	68 x 68 x 20 x 2,8	645,12	2,24	2,722	355,95	453,93	178,44	188,20	163,73	1,09	1,15
GRUPO 75	75 x 65 x 15 x 1,6	352,00	1,28	1,555	87,38	113,66	73,22	81,53	70,89	1,03	1,15
	75 x 65 x 15 x 1,8	396,00	1,44	1,744	112,38	145,30	87,12	96,24	81,92	1,06	1,17
	75 x 65 x 15 x 2,0	440,00	1,60	1,931	141,49	181,60	101,75	111,45	97,90	1,04	1,14
	75 x 65 x 15 x 2,2	484,00	1,76	2,124	174,06	227,70	116,76	127,91	108,39	1,08	1,18
	75 x 65 x 15 x 2,4	528,00	1,92	2,317	211,84	270,50	132,45	143,11	127,98	1,03	1,12
GRUPO 100	100 x 100 x 20 x 1,6	512,00	1,28	1,564	74,78	97,69	83,54	94,77	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 1,8	576,00	1,44	1,757	94,86	126,32	99,54	113,52	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,0	640,00	1,60	1,945	120,08	156,73	117,55	132,36	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,2	704,00	1,76	2,140	147,34	189,78	135,89	151,63	140,10	0,97	1,08
	100 x 100 x 20 x 2,4	768,00	1,92	2,329	177,52	227,96	154,91	172,06	156,42	0,99	1,10

Obs.: * Perfis apresentaram flambagem local.

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 12: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 80% b_w , $f_y=220$ MPa

SEÇÃO ANALISADA (mm)		PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO COM FUROS			GBTUL COM FURO: SALES	GBTUL COM FURO: MOEN 2	MRD SALES	MRD MOEN2	ANSYS	DISPERSÃO	
		A_n	t_{fic}	$t_{web,hole}$	N_{dist}	N_{dist}	$N_{c,Rdist} -$ MRD SALES	$N_{c,Rdist} -$ MRD MOEN2	$N_{c,Rdist} -$ ANSYS	Valor característico da força axial de compressão resistente:	Valor característico da força axial de compressão resistente:
		(mm ²)	(mm)	(mm)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(%)	(%)
GRUPO 50	50 x 45 x 10 x 1,2	180,00	0,96	1,152	48,73	61,90	32,15	34,85	29,52	1,09	1,18
	50 x 45 x 10 x 1,4	210,00	1,12	1,335	67,78	85,49	39,85	42,66	36,53	1,09	1,17
	50 x 45 x 10 x 1,6	240,00	1,28	1,525	91,52	114,04	47,90	50,55	43,53	1,10	1,16
	50 x 45 x 10 x 1,8	270,00	1,44	1,716	118,02	149,16	55,83	58,38	49,59	1,13	1,18
	50 x 45 x 10 x 2,0	300,00	1,60	1,950	149,78	191,85	63,80	65,82	52,53	1,21	1,25
GRUPO 68	68 x 68 x 20 x 2,0	460,80	1,60	1,932	172,78	225,15	91,54	97,60	*	*	*
	68 x 68 x 20 x 2,2	506,88	1,76	2,125	211,6	268,89	103,64	108,93	90,67	1,14	1,20
	68 x 68 x 20 x 2,4	552,96	1,92	2,310	255,38	323,04	115,77	120,39	100,94	1,15	1,19
	68 x 68 x 20 x 2,6	599,04	2,08	2,502	298,58	382,09	127,36	131,42	111,34	1,14	1,18
	68 x 68 x 20 x 2,8	645,12	2,24	2,695	355,95	448,32	139,46	141,93	123,28	1,13	1,15
GRUPO 75	75 x 65 x 15 x 1,6	352,00	1,28	1,540	87,38	112,28	60,88	66,54	56,10	1,09	1,19
	75 x 65 x 15 x 1,8	396,00	1,44	1,725	112,38	143,18	71,94	77,84	66,35	1,08	1,17
	75 x 65 x 15 x 2,0	440,00	1,60	1,907	141,49	178,79	83,40	89,35	76,50	1,09	1,17
	75 x 65 x 15 x 2,2	484,00	1,76	2,098	174,06	219,23	94,99	100,90	81,95	1,16	1,23
	75 x 65 x 15 x 2,4	528,00	1,92	2,288	211,84	265,88	106,86	112,47	95,99	1,11	1,17
GRUPO 100	100 x 100 x 20 x 1,6	512,00	1,28	1,551	74,78	96,61	70,87	79,31	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 1,8	576,00	1,44	1,742	94,86	123,46	84,13	94,05	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,0	640,00	1,60	1,926	120,08	153,13	98,90	109,14	89,93	1,10	1,21
	100 x 100 x 20 x 2,2	704,00	1,76	2,119	147,34	187,43	113,84	124,98	107,86	1,06	1,16
	100 x 100 x 20 x 2,4	768,00	1,92	2,305	177,52	225,48	129,22	141,18	125,39	1,03	1,13

Obs.: * Perfis apresentaram flambagem local.

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 13: Resultado das cargas resistentes pela análise numérica de perfis com furos – 80% b_w , $f_y=300$ MPa

SEÇÃO ANALISADA (mm)		PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO COM FURROS			GBTUL COM FURO: SALES	GBTUL COM FURO: MOEN 2	MRD SALES	MRD MOEN2	ANSYS	DISPERSÃO	
		A_n	t_{fic}	$t_{web,hole}$	N_{dist}	N_{dist}	$N_{c,Rdist} -$ MRD SALES	$N_{c,Rdist} -$ MRD MOEN2	$N_{c,Rdist} -$ ANSYS	Valor característico da força axial de compressão resistente:	Valor característico da força axial de compressão resistente:
		(mm ²)	(mm)	(mm)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(%)	(%)
GRUPO 50	50 x 45 x 10 x 1,2	180,00	0,96	1,152	48,73	61,90	38,84	42,71	37,40	1,04	1,14
	50 x 45 x 10 x 1,4	210,00	1,12	1,335	67,78	85,49	48,63	52,95	46,52	1,05	1,14
	50 x 45 x 10 x 1,6	240,00	1,28	1,525	91,52	114,04	59,14	63,62	53,45	1,11	1,19
	50 x 45 x 10 x 1,8	270,00	1,44	1,716	118,02	149,16	69,71	74,71	63,68	1,09	1,17
	50 x 45 x 10 x 2,0	300,00	1,60	1,950	149,78	191,85	80,71	85,93	67,47	1,20	1,27
GRUPO 68	68 x 68 x 20 x 2,0	460,80	1,60	1,932	172,78	225,15	112,87	123,19	*	*	*
	68 x 68 x 20 x 2,2	506,88	1,76	2,125	211,6	268,89	128,89	138,73	116,38	1,11	1,19
	68 x 68 x 20 x 2,4	552,96	1,92	2,310	255,38	323,04	145,30	155,17	129,98	1,12	1,19
	68 x 68 x 20 x 2,6	599,04	2,08	2,502	298,58	382,09	161,08	171,50	143,07	1,13	1,20
	68 x 68 x 20 x 2,8	645,12	2,24	2,695	355,95	448,32	178,44	187,79	158,45	1,13	1,19
GRUPO 75	75 x 65 x 15 x 1,6	352,00	1,28	1,540	87,38	112,28	73,22	81,14	69,68	1,05	1,16
	75 x 65 x 15 x 1,8	396,00	1,44	1,725	112,38	143,18	87,12	95,72	84,21	1,03	1,14
	75 x 65 x 15 x 2,0	440,00	1,60	1,907	141,49	178,79	101,75	110,86	96,96	1,05	1,14
	75 x 65 x 15 x 2,2	484,00	1,76	2,098	174,06	219,23	116,76	126,41	105,00	1,11	1,20
	75 x 65 x 15 x 2,4	528,00	1,92	2,288	211,84	265,88	132,45	142,40	122,98	1,08	1,16
GRUPO 100	100 x 100 x 20 x 1,6	512,00	1,28	1,551	74,78	96,61	83,54	94,28	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 1,8	576,00	1,44	1,742	94,86	123,46	99,54	112,37	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,0	640,00	1,60	1,926	120,08	153,13	117,55	131,04	*	*	*
	100 x 100 x 20 x 2,2	704,00	1,76	2,119	147,34	187,43	135,89	150,85	135,32	1,00	1,11
	100 x 100 x 20 x 2,4	768,00	1,92	2,305	177,52	225,48	154,91	171,31	158,22	0,98	1,08

Obs.: * Perfis apresentaram flambagem local.

Fonte: Elaborada pela autora (2020).