

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções

Mestrado Profissional em Engenharia das Construções

Dissertação

**Análise numérica da influência
de furos com borda enrijecida
na flambagem da alma em
perfis formados a frio do tipo
rack**

Guilherme Henrique Ferreira

Ouro Preto
2023





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 Engenharia das Construções

Guilherme Henrique Ferreira

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE FUROS COM
BORDA ENRIJECIDA NA FLAMBAGEM DA ALMA EM
PERFIS FORMADOS A FRIO DO TIPO RACK**

Ouro Preto

2023

Análise numérica da influência de furos com borda enrijecida na flambagem da alma em perfis formados a frio do tipo rack

Guilherme Henrique Ferreira

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

Área de concentração: Engenharia das Construções.

Orientadora: Prof. D.Sc. Flávio Teixeira de Souza – IFMG – Ouro Preto

Coorientadora: Prof. D.Sc. Arlene Maria Cunha Sarmanho - UFOP

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F383a Ferreira, Guilherme Henrique.
Análise numérica da influência de furos com borda enrijecida na flambagem da alma em perfis formados a frio do tipo rack. [manuscrito] / Guilherme Henrique Ferreira. - 2023.
87 f.: il.: color., gráf., tab..

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

1. Engenharia de estruturas. 2. Construção metálica - Perfis formados a frio. 3. Construção metálica - Racks. 4. Flambagem (Mecânica). 5. Construção metálica. I. Souza, Flávio Teixeira de. II. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Guilherme Henrique Ferreira

Análise numérica da influência de furos com borda enrijecida na flambagem da alma em perfis formados a frio do tipo rack

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 em Engenharia das Construções

Aprovada em 25 de outubro de 2023

Membros da banca

- D.Sc. - Flávio Teixeira de Souza - Orientador - Instituto Federal de Minas Gerais
- D.Sc. - Arlene Maria Cunha Sarmanho - Coorientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
- D.Sc - Vinicius Nicchio Alves - Universidade Federal de Ouro Preto
- D.Sc - Mário Luís Cabello Russo - Instituto Federal de Minas Gerais

Flávio Teixeira de Souza, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 17/01/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Rovadavia Aline de Jesus Ribas, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/01/2024, às 13:28, 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 **0654371** e o código CRC **D6E677F8**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre me iluminar e capacitar para correr atrás dos meus sonhos.

Agradeço aos meus pais, Helena e Irineu, pelo suporte integral e por me ensinarem a persistir pelos meus objetivos. À minha irmã, Carol, pelo excelente convívio e pela cumplicidade ao longo dos anos. À Paula, por ser parceira de estudos, engenharia e, sobretudo, de vida. Aos amigos, pela motivação e pelas experiências vividas.

Agradeço aos professores que sempre estiverem dispostos a contribuir com a minha formação e aprendizado. À Escola de Minas e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções da Universidade Federal de Ouro Preto pelas oportunidades cedidas.

Agradeço à minha coorientadora Arlene Maria Cunha Sarmanho que se fez presente na minha graduação em 2018 e novamente nesta etapa, transmitindo sempre ensinamentos valiosos.

De forma especial agradeço ao meu orientador Flávio Teixeira de Souza por ensinamentos que me marcaram desde o primeiro contato aluno-professor no IFMG em 2012. Sem o seu imensurável apoio não seria possível a realização deste trabalho.

Agradeço à cidade de Ouro Preto e à Universidade Federal de Ouro Preto por me acolherem e transformarem minha vida ao longo destes 12 anos de convivência.

RESUMO

A utilização de perfis formados a frio pela construção civil e pela indústria tem crescido devido ao seu processo de fabricação produzir peças leves, econômicas e versáteis. O seu uso geralmente requer perfurações nos elementos para viabilizar o encaixe entre peças estruturais e a passagem de sistemas complementares como elétrico, hidráulico e incêndio. Entretanto, estudos apontam que essas aberturas reduzem a capacidade resistente dos perfis. Com o intuito de combater a perda de resistência provocada pelas perfurações tem-se desenvolvido trabalhos que consideram enrijecedores de borda nos furos. Porém, o seu impacto na resistência dos perfis ainda é pouco compreendido, o que pode limitar o seu uso devido à ausência de confiabilidade e replicabilidade dos cálculos. Além disso, as normas vigentes não consideram de maneira concisa a influência dos furos e dos enrijecedores em perfis formados a frio. Por ser uma configuração nova que pode interferir no dimensionamento e no emprego de perfis formados a frio, esta temática demanda novas pesquisas. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar, via método dos elementos finitos, a influência dos enrijecedores de borda simples e duplo na flambagem entre furos em perfis formados a frio do tipo rack com perfurações submetidos à compressão centrada. Utiliza-se um modelo numérico analisado através da Teoria Generalizada de Vigas via GBTul e da análise não linear com base no Método dos Elementos Finitos via ANSYS. A análise consiste em comparar os resultados obtidos por perfis sem perfuração aos alcançados por perfis perfurados: sem enrijecedor, com enrijecedor simples e duplo. Os resultados indicaram que as Cargas Crítica e Última são reduzidas com as perfurações. Os perfis com enrijecedor (simples e duplo) tiveram comportamento similar e em determinado intervalo, obtiveram Carga Crítica superior ao modelo sem furos. Ambos apresentaram Cargas Crítica e Última superiores ao modelo com furo não enrijecido. Ao aumentar a altura das aberturas ocorreu a transição da flambagem local para flambagem entre furos. Os enrijecedores de borda retardaram essa transição, sendo o duplo mais efetivo.

Palavras-chave: estruturas metálicas, perfis formados a frio, racks, flambagem local, flambagem entre furos.

ABSTRACT

The utilization of cold formed profiles in civil construction and industrial sectors has grown thanks to their manufacturing process, which produces light, economical and versatile components. Their use generally requires perforations in elements to facilitate the connection between structural components and the execution of supplementary systems, like electrical, hydraulic, and fire systems. Although, studies indicate that these perforations decrease the resistance capacity of the profiles. To combat the reduction in strength resulting from these perforations, studies have been carried out adding edge stiffeners to the openings. However, the impact of edge stiffeners on profile strength remains insufficiently understood, potentially impeding their adoption due to the absence of reliability and reproducibility in calculations. Besides, current standards do not effectively consider the influence of perforations and stiffeners on cold formed profiles. As it is a new configuration that can affect the sizing and use of cold formed profiles, further research in this area are needed. So, the objective of this study is to evaluate, using the finite element method, the influence of single and double edge stiffeners on buckling between holes in cold formed rack type profiles with perforations subjected to centered compression. A numerical model analyzed through the Generalized Beam Theory using GBTul and non-linear analysis based on the Finite Element Method via ANSYS, is employed. The analysis involves to compare of the results obtained from profiles without perforations to those achieved by perforated profiles: without stiffeners, with single stiffeners, and with double stiffeners. The results indicate that both Critical and Ultimate Loads are reduced when perforations are present. Profiles with stiffeners (both single and double) had similar behavior and, in a certain range, had a higher Critical Load compared to the model without holes. Both demonstrate Critical and Ultimate Loads higher than the model without stiffened hole. As the height of the openings increases, there is a transition from local buckling to buckling between holes. The edge stiffeners mitigate this transition, with double stiffeners proving more effective in this regard.

Key words: steel structures, cold-formed steel, racks, local buckling, buckling between holes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Seções usuais de perfis formados a frio (i) Perfil U enrijecido; (ii) Perfil rack. Fonte: autor.....	15
Figura 2: Seção transversal de perfil rack submetido a compressão axial sofrendo flambagem local.....	16
Figura 3: Flambagem global em elementos submetidos a compressão: (i) por flexão, (ii) por torção, (iii) por flexo-torção.....	17
Figura 4: Seção transversal de perfil rack submetido a compressão axial sofrendo flambagem distorcional.....	18
Figura 5: Componente ortogonal à alma do deslocamento em perfil com modo localizado de placa.....	18
Figura 6: Perfis formados a frio com perfurações empregados. À esquerda no Sistema Light Steel Framing e à direita em sistema de armazenagem industrial.....	19
Figura 7: Perfil U enrijecido com perfuração circular: à esquerda furo sem enrijecedor e à direita furo com enrijecedor de borda. Fonte: Chen et al. (2019).	21
Figura 8: Componentes da seção tipo rack. Fonte: autor.....	29
Figura 9: Seções transversal tipo rack de perfil formado a frio: (i) sem furos; (ii) com furos; (iii) com furos enrijecidos. Fonte: autor.....	30
Figura 10: Seção transversal com perfuração enrijecida: (i) enrijecedor simples; (ii) enrijecedor duplo. Fonte: autor.....	31
Figura 11: Parâmetros utilizados nas perfurações identificados na alma do perfil. Fonte: autor.....	31
Figura 12: Cronologia da evolução do Método dos Elementos Finitos. Fonte: adaptado de Metal Cruzado (2022).....	33
Figura 13: Diagrama Tensão x Deformação Multilinear. Fonte: adaptado de Faria (2016).	35
Figura 14: Malha quadrangular com lado igual a 10% de b_w gerada em perfil rack sem perfuração. Fonte: autor.....	36

Figura 15: Aplicação das restrições nas extremidades do modelo. Fonte: autor.	37
Figura 16: Curva de flambagem do perfil SF100x1,2. Fonte: análise feita pelo autor no GBTuL (2008).	40
Figura 17: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm) do modelo SF-100x1,2. Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).....	41
Figura 18: Carga crítica de flambagem elástica em função da altura do furo. Fonte: autor.....	44
Figura 19: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm). Seções numeradas da esquerda para a direita e de cima para baixo, desde SE-100X1,2-HF0,1 até SE-100X1,2-HF2,0. Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).	46
Figura 20: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm). Seções numeradas da esquerda para a direita e de cima para baixo, desde ES-100X1,2-HF0,1 até ES-100X1,2-HF2,0. Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).	48
Figura 21: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm). Seções numeradas da esquerda para a direita e de cima para baixo, desde ED-100X1,2-HF0,1 até ED-100X1,2-HF2,0. Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).	50
Figura 22: Resistência da seção à flambagem local em função da altura do furo. Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).	52
Figura 23: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm). Seções numeradas da esquerda para a direita e de cima para baixo, desde SE-100X1,2-HF0,1 até SE-100X1,2-HF2,0. Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).	53
Figura 24: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm). Seções numeradas da esquerda para a direita e de cima para baixo, desde ES-100X1,2-HF0,1 até ES-100X1,2-HF2,0. Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).	55
Figura 25: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm). Seções numeradas da esquerda para a direita e de cima para baixo, desde ED-100X1,2-HF0,1 até ED-100X1,2-HF2,0. Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Força axial de flambagem local elástica em função do comprimento do pilar.....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 2: Carga crítica de flambagem elástica (kN) em função da altura do furo (h_f / b_w). Fonte: autor..... 43

Tabela 3: Resistência da seção à flambagem local em função da altura do furo. Fonte: autor..... 51

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	VI
Resumo	VII
Abstract	VIII
Lista de Figuras	IX
Lista de Tabelas	XII
Sumário	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Modos de falha de perfis formados a frio	16
1.2 Perfis formados a frio com perfurações	19
1.3 Perfis formados a frio com perfurações enrijecidas	21
1.4 Objetivos	23
1.5 Justificativa	23
1.6 Metodologia	24
2 DIMENSIONAMENTO DE PERFIS FORMADOS A FRIO.....	25
2.1 Normas técnicas	25
2.2 Métodos de dimensionamento	25
2.3 Métodos numéricos de dimensionamento de perfis formados a frio.....	27
3 ANÁLISE NUMÉRICA - MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	28
3.1 Seção transversal do pilar analisado	28
3.2 Comprimento do pilar	32
3.3 Método dos Elementos Finitos.....	32

3.4	Propriedades mecânicas do aço.....	34
3.5	Tipos de elementos finitos	35
3.6	Malha de elementos finitos (refinamento)	35
3.7	Condições de contorno.....	36
3.8	Linguagem de programação do Ansys	37
3.8.1	Análise linear	37
3.8.2	Análise não linear.....	38
4	RESULTADOS.....	40
4.1	Validação do modelo proposto	40
4.2	Análise linear	42
4.2.1	Perfil com furo não enrijecido	44
4.2.2	Perfil perfurado com enrijecedor simples.....	47
4.2.3	Perfil perfurado com enrijecedor duplo	49
4.3	Análise não linear	51
4.3.1	Perfil com furo não enrijecido	52
4.3.2	Perfil perfurado com enrijecedor simples.....	54
4.3.3	Perfil perfurado com enrijecedor duplo	56
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A.....	65
	APÊNDICE B.....	70
	APÊNDICE C.....	76
	APÊNDICE D.....	82

1 INTRODUÇÃO

As construções com elementos estruturais de aço em geral apresentam três tipos principais: perfis laminados, perfis soldados e perfis formados a frio. A construção civil, a indústria e o comércio têm experimentado uma crescente utilização de estruturas constituídas por perfis formados a frio.

Isto pode ser justificado pelo seu processo de fabricação permitir a formação de perfis leves, além da obtenção de uma variedade de seções adaptáveis a diversas aplicações. Assim, os perfis formados a frio tendem a ser mais econômicos quando comparados com os outros tipos e mais flexíveis às possibilidades de aplicação: estrutura de edificações de pequeno e médio porte, sustentação de galpões e coberturas, estruturas de armazenamento de produtos em massa e outras.

Eles são produzidos através do dobramento, em prensa dobradeira ou pela conformação em matrizes rotativas, de bobinas laminadas ou tiras cortadas de chapas finas de aço, manuseadas em temperatura ambiente (ABNT NBR 14762, 2010). Entre as possibilidades de perfis formados a frio mais usuais, destacam-se as seções abertas do tipo U enrijecido e rack, objeto de estudo deste trabalho, ilustradas na Figura 1.

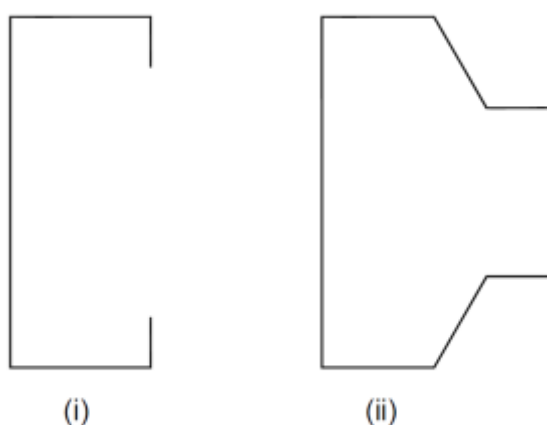


Figura 1: Seções usuais de perfis formados a frio (i) Perfil U enrijecido; (ii) Perfil rack. Fonte: autor.

1.1 Modos de falha de perfis formados a frio

Por serem compostos por elementos de chapa fina, os perfis formados a frio são caracterizados por elevado índice de esbeltez. Como consequência, apresentam modos de falha peculiares, como a flambagem local, global e distorcional (YU, 2000).

Esses modos de instabilidade precisam ser estudados porque reduzem a carga resistente dos elementos estruturais, tornando-a inferior à carga de escoamento do aço (ALMEIDA, 2007). Eles podem ocorrer de forma isolada ou em interação, a depender das características dos perfis e das condições de contorno.

A flambagem local é caracterizada pela flexão das chapas que constituem o perfil e pela manutenção dos ângulos das extremidades de ligação entre chapas adjacentes (AS/NZS 4600, 2018). A Figura 2 demonstra a flambagem local ocorrendo em seção submetida à compressão centrada.

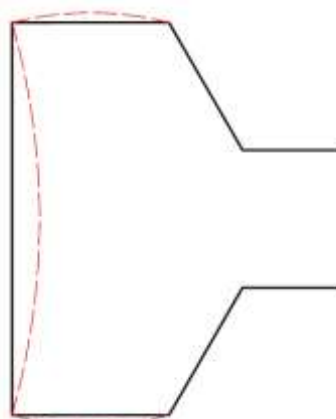


Figura 2: Seção transversal de perfil rack submetido a compressão axial sofrendo flambagem local. Fonte: autor.

Por sua vez a flambagem global é um fenômeno que ocorre em elementos com elevado índice de esbeltez global e não acarreta distorção da seção transversal do perfil. Em elementos comprimidos pode ocorrer por flexão, torção ou flexo-torção (AISI S100-16, 2016), conforme ilustrado pela Figura 3. A AISI S100-16 (2016) define esses 3 modos de flambagem como:

- Flambagem global por flexão: ocorre quando um elemento comprimido deflete lateralmente sem sofrer torção ou mudança na sua seção transversal;
- Flambagem global por torção: ocorre quando um elemento comprimido sofre rotação em torno do seu eixo de cisalhamento central;
- Flambagem global por flexo-torção: ocorre quando um elemento comprimido sofre deflexão e torção de forma simultânea, sem alteração na seção transversal;

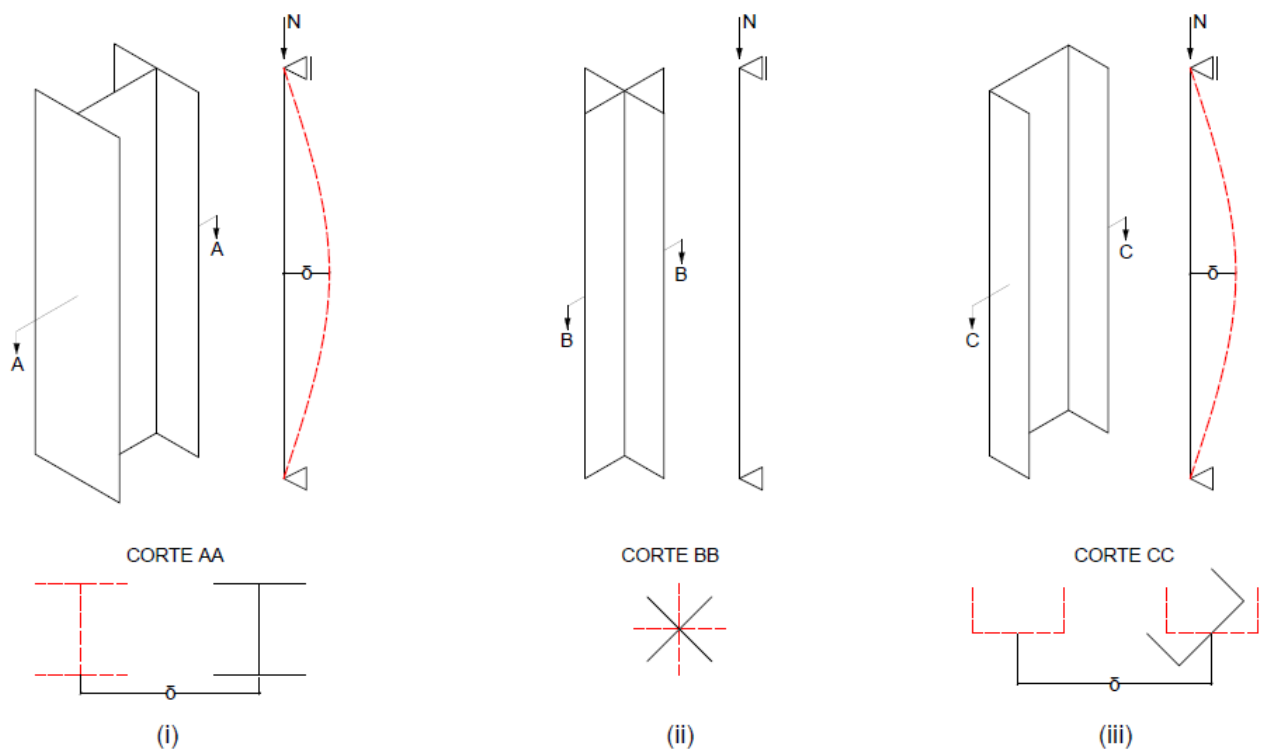


Figura 3: Flambagem global em elementos submetidos a compressão: (i) por flexão, (ii) por torção, (iii) por flexo-torção. Fonte: autor.

Já a flambagem distorcional é caracterizada pela mudança do formato da seção transversal, com deslocamento das arestas (AS/NZS 4600, 2018). Esse modo de falha ocorre em perfis com elevada esbelteza e seção transversal aberta com enrijecedores. Ele é marcado pela presença de ondulações nas paredes, geralmente de pequena espessura (HANCOCK, 1984).

Nele ocorre a distorção da seção com o giro do enrijecedor em torno da aresta entre a alma e o flange, preservando os ângulos entre as arestas (AISI S100-16,

2016). A Figura 4 apresenta a seção transversal de perfil formado a frio do tipo rack submetido à compressão sofrendo flambagem distorcional.

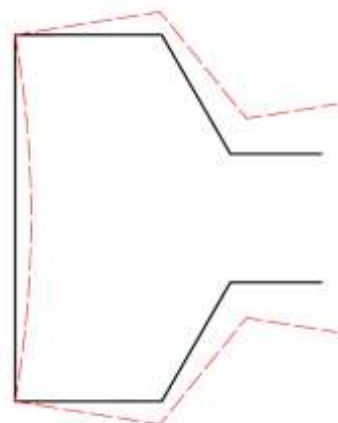


Figura 4: Seção transversal de perfil rack submetido a compressão axial sofrendo flambagem distorcional. Fonte: autor.

Faria (2016) observou um modo de flambagem local centralizado na placa entre perfurações paralelas, o “modo localizado de placa”. Este fenômeno também havia sido observado por Souza (2013), que o caracterizou como um deslocamento perpendicular à alma do perfil e centralizado em relação às perfurações, conforme ilustrado pela Figura 5.

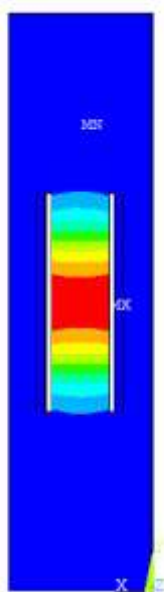


Figura 5: Componente ortogonal à alma do deslocamento em perfil com modo localizado de placa. Fonte: autor.

1.2 Perfis formados a frio com perfurações

A utilização dos perfis formados a frio como estruturas de sustentação para galpões industriais, sistemas de armazenamento e como sustentação de edificações usualmente requer que as peças possuam perfurações, que podem ser necessárias por diversos motivos, como permitir a passagem de sistemas complementares (elétrico, hidráulico e incêndio) e para viabilizar o encaixe e as ligações de elementos estruturais. Exemplos de perfis formados a frio utilizados com perfurações são o sistema Light Steel Framing e os sistemas de armazenagem industrial, exemplificados pela Figura 6.



Figura 6: Perfis formados a frio com perfurações empregados. À esquerda no Sistema Light Steel Framing e à direita em sistema de armazenagem industrial. Fonte: autor.

A existência de perfurações influencia no comportamento dos perfis, reduzindo sua resistência devido à diminuição da área líquida da seção (FREITAS, SOUZA e FREITAS, 2010). Apesar disto, as ferramentas de análise numérica como a análise de faixas finitas pelo CUFMS (SCHAFER e ÁDÁNY, 2006) e a teoria generalizada de vigas pelo GBTul (BEBIANO, SILVESTRE e CAMOTIM, 2008) consideram apenas seções sem perfurações.

Somado a isto, as normas vigentes não consideram de maneira concisa a influência dos furos em perfis formados a frio. Assim, avaliar o desempenho de perfis

com perfurações é um trabalho complexo. Geralmente, eles são analisados numericamente pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e tem sido alvo de diversos estudos da área.

Moen e Schafer (2009) realizaram um estudo numérico utilizando o Método dos Elementos Finitos via software ABAQUS e o Método das Faixas Finitas via software CUFSM. O objetivo central do estudo era viabilizar a utilização do Método da Resistência Direta para dimensionar perfis formados a frio com perfurações. Os resultados da análise de flambagem para elementos de casca fina indicaram que a geometria, o tamanho, a localização e o espaçamento entre furos impactam na resistência dos perfis formados a frio. Além disso, contribuíram com o desenvolvimento de equações de dimensionamento dos perfis formados a frio com perfurações no regime de flambagem elástica.

Souza (2013) avaliou a influência das perfurações na ocorrência dos modos de flambagem isolados e na interação entre eles em perfis formados a frio. Para tanto, realizou um estudo teórico-experimental no qual a Teoria Generalizada de Vigas (GBT) e o Método dos Elementos Finitos (MEF) auxiliaram na definição das seções a serem experimentadas. A análise numérica foi feita combinando o Método dos Elementos Finitos via software ANSYS e o Método das Faixas Finitas via software CUFSM. Posteriormente os resultados foram utilizados para validar um procedimento de análise não linear de perfis formados a frio. Por fim, o trabalho comparou os resultados experimentais e numéricos obtidos com os resultados teóricos do Método da Resistência Direta (MRD), fazendo adaptações para seções perfuradas.

Faria (2016) deu prosseguimento ao estudo realizado por Souza (2013) e realizou um estudo numérico-experimental com o objetivo de avaliar os modos de instabilidade local e distorcional levando em consideração o efeito das perfurações no desempenho estrutural dos elementos. O software ANSYS foi utilizado para a análise numérica via elementos finitos e o software GBTul para calibração dos protótipos via Teoria Generalizada de Vigas. Notou-se que as perfurações resultam em redução da carga última dos pilares e o modo local foi identificado somente entre as perfurações, apesar do modo distorcional ter predominado em todos os casos. O modo localizado de placa entre as perfurações foi identificado como algo novo; então foi feito um estudo

paramétrico variando os furos para observar melhor o fenômeno. No presente trabalho esse modo será tratado por Flambagem entre Furos (FEF).

Neiva (2017) fez um estudo teórico através do Método dos Elementos Finitos com uso do software ANSYS. Foi observado o efeito das perfurações e da excentricidade do carregamento, em pilares de perfis formados a frio com seção rack, na ocorrência de flambagem local e distorcional. Além disso, foram avaliadas a influência do tamanho e inclinação das perfurações ao longo do comprimento do pilar e da largura da alma da seção na obtenção das cargas crítica de flambagem e última.

1.3 Perfis formados a frio com perfurações enrijecidas

De acordo com Chen et al. (2019), a empresa Howick Ltd (2022) desenvolveu uma nova modalidade de perfis formados a frio implementando enrijecedores de borda contínuos ao redor de aberturas circulares, conforme apresentado pela Figura 7. Esta proposta é uma tentativa de combater a redução da capacidade resistente dos perfis causada pelas perfurações.

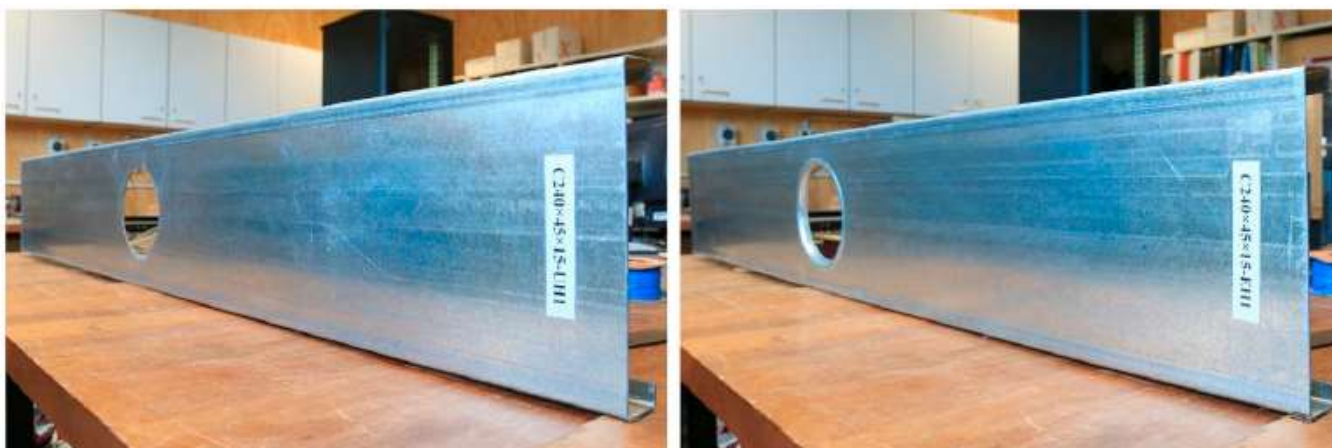


Figura 7: Perfil U enrijecido com perfuração circular: à esquerda furo sem enrijecedor e à direita furo com enrijecedor de borda. Fonte: Chen et al. (2019).

Chen et al. (2020b) apresentaram 162 resultados em um estudo teórico-experimental, sendo 27 ensaios de compressão axial e 135 análises numéricas via Método dos Elementos Finitos. Foram utilizados perfis sem perfuração, com

perfuração simples e com perfuração enrijecida, para efeito de comparação. Os autores desenvolveram um modelo não linear via Método dos Elementos Finitos que foi verificado com resultados experimentais e que mostrou boa correlação. Os resultados de perfis sem perfurações foram comparados com as resistências de projeto obtidas pela AISI S100-16 (2016) e pela AS/NZS 4600 (2018) e para os perfis com perfurações foram contrastados com as equações de projeto de Moen e Schafer (2011). Os resultados apontaram que os perfis com perfurações enrijecidas tiveram sua resistência elevada em média 6,6% quando comparados com os perfis sem perfuração, enquanto os perfis com perfuração simples tiveram perda de 12,4% na resistência média ao serem comparados com os perfis sem perfuração.

Chen et al. (2020a) realizaram um estudo numérico simulando modelos experimentais de perfis formados a frio com furos enrijecidos sob compressão centrada. Foi feito um estudo paramétrico com 348 modelos via método dos elementos finitos. O trabalho foi motivado pelo fato das normas Americana Iron and Steel Institute (AISI S100-16, 2016) e da Australiana/Neozelandesa (AS/NZS 4600, 2018) não fornecerem procedimentos para cálculo de perfis formados a frio com perfurações enrijecidas. Com os resultados, foi possível afirmar que as equações existentes não são suficientes para avaliar o comportamento dos perfis formados a frio com perfurações enrijecidas. Então, foram propostas equações que visam atender a este fim.

Nicolau (2021) realizou um estudo numérico via Método dos Elementos Finitos através do software ANSYS no qual avaliou a resistência de pilares submetidas à compressão centrada quanto aos modos de instabilidade local e distorcional sem interação. O trabalho considerou perfis sem perfurações, com perfurações não enrijecidas e com perfurações enrijecidas; além de variar o diâmetro dos furos e o comprimento dos enrijecedores. A Teoria Generalizada de Vigas (GBT) foi utilizada para apoiar a definição das seções sem furos analisadas. Os resultados apontaram que a utilização de enrijecedores de borda nas perfurações pode elevar a capacidade resistente dos perfis quando comparados a perfis perfurados sem enrijecedores de borda e até mesmo ao comparar com perfis sem perfurações.

Dando continuidade a este estudo, Nicolau, Sarmanho e Souza (2023) avaliaram a influência dos enrijecedores de borda em perfurações circulares na alma ao variar a espessura da chapa, o diâmetro das aberturas e o comprimento dos enrijecedores em perfis U enrijecidos submetidos à compressão. Como resultado, apontaram que a presença dos enrijecedores de borda foi mais eficaz na recuperação da capacidade resistente para a flambagem local do que para a flambagem distorcional.

Seguindo essa linha de pesquisa, Gomes, Sarmanho e Souza (2023) avaliaram a influência dos enrijecedores de borda na resistência de pilares de perfis formados a frio com seção tipo rack com duas linhas de furos retangulares inseridos na alma de forma paralela. Foi feita uma análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos via software ANSYS. Foram considerados dois modelos: com um enrijecedor de largura igual à largura do furo e com dois enrijecedores com largura igual à metade da largura do furo. O estudo concluiu que, em alguns casos, os enrijecedores reduzem o índice de esbeltez dos pilares e podem até mesmo anular a flambagem entre perfurações. Além disso, apontou o uso dos enrijecedores de borda como uma boa alternativa de reduzir as consequências da inserção de perfurações nos perfis.

1.4 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar via método dos elementos finitos a influência dos enrijecedores de borda simples e duplo no desenvolvimento da flambagem entre furos em perfis formados a frio com seção rack com perfurações na alma submetidos à compressão centrada.

1.5 Justificativa

A utilização de perfis formados a frio é uma realidade bastante disseminada na construção civil, na indústria e no comércio em geral. A existência de perfurações nestes perfis vem sendo alvo de diversos estudos na área com o objetivo de entender seus efeitos no comportamento e na resistência dos elementos.

Recentemente, tem sido proposta a utilização de enrijecedores de borda nestas perfurações. O objetivo é combater a perda de resistência do perfil provocada pela existência dos furos.

Entretanto, o impacto que o uso de enrijecedores nas perfurações provoca nos perfis ainda é pouco estudado. Para Chen et al. (2019), a falta de procedimentos normativos consolidados sobre o dimensionamento de perfis formados a frio com perfurações enrijecidas pode limitar o seu uso devido à ausência de confiabilidade e de replicabilidade dos cálculos.

Por se tratar de uma novidade que pode interferir no dimensionamento e no emprego de perfis formados a frio essa temática demanda novos estudos. Esse trabalho insere-se nessa temática, visando avançar sobre a influência dos enrijecedores em perfis sujeitos à Flambagem entre Furos (FEF).

1.6 Metodologia

Inicialmente o modelo numérico foi analisado através da Teoria Generalizada de Vigas, utilizando-se do software GBTul (BEBIANO, SILVESTRE e CAMOTIM, 2008). Nesta etapa foi feita a análise linear dos modelos sem perfurações para obter os modos de flambagem, os comprimentos de meias ondas e as cargas críticas associadas.

Esses valores foram utilizados para obter a força axial de compressão resistente ($N_{c,rk}$) através do Método da Resistência Direta. Por fim, os valores obtidos foram comparados com os resultados numéricos extraídos da análise não linear realizada utilizando o software ANSYS (2021), com o intuito de validar o modelo proposto.

Em seguida, após a definição de um modelo numérico que apresentasse boa correlação com os resultados teóricos, foram inseridas as perfurações não enrijecidas. Então faz-se simulações não lineares através do Método dos Elementos Finitos.

Para análise de perfis com perfurações enrijecidas utilizou-se, de forma análoga, a rotina descrita anteriormente. Foi utilizada a linguagem Ansys Parametric Design Language (APDL) para otimizar as simulações e auxiliar a variação das dimensões das perfurações analisadas.

2 DIMENSIONAMENTO DE PERFIS FORMADOS A FRIO

2.1 Normas técnicas

O projeto de estruturas constituídas por perfis formados a frio deve atender às normas brasileiras: ABNT NBR 14762 (2010) “Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio” e ABNT NBR 6355 (2012) “Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio – Padronização”. Além das normas nacionais, há também normas internacionais que regem o dimensionamento destes perfis: AISI S100 (2016) “North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members” e AS/NZS 4600 (2018) “Australian/New Zealand Standard Cold-Formed Steel Structures”.

O presente trabalho priorizou a utilização da terminologia contida na ABNT NBR 14762 (2010). Ela se baseia no método dos estados limites e, antes da sua elaboração, o dimensionamento destes perfis no Brasil seguia as prescrições de normas internacionais (que foram utilizadas como referencial para a publicação da norma brasileira), como: AISI/96 (1996), Eurocode (2005) e AS/NZS (1996).

Todavia, a norma brasileira carece de prescrições a respeito do cálculo de perfis com perfurações. Assim, este trabalho adotou também algumas recomendações da norma americana AISI S100 (2016), que abrange perfis com perfurações planas, ou seja, sem enrijecedores.

2.2 Métodos de dimensionamento

Os perfis formados a frio e as estruturas compostas por eles têm como característica serem estruturas leves e esbeltas. A elevada esbelteza dos componentes torna a análise e o dimensionamento destes perfis uma tarefa complexa por apresentar métodos de falha particulares. Com isso, foram necessários estudos no sentido de desenvolver técnicas de dimensionamento que demandassem menos esforço, computacional ou humano.

Cronologicamente, Von Kármán, Scheler e Donnell (1932) propuseram o Método da Largura Efetiva. O dimensionamento é uma aproximação e consiste em repartir os componentes (chapas) da seção transversal do perfil e analisá-los de forma isolada,

levando em consideração o efeito da flambagem local em uma das chapas através de uma redução da largura efetiva. O Método da Largura Efetiva foi calibrado por Winter (1947) através de ensaios experimentais. Atualmente, é um dos métodos mais presentes nas normas vigentes e consta na NBR 14762 (2010).

Entretanto, por considerar os elementos da seção de forma isolada, o Método da Largura Efetiva possui restrições teóricas e impossibilita o dimensionamento considerando a flambagem distorcional, que ocorre em seções com enrijecedores nos flanges. Além disso, ele demanda elevado esforço para o cálculo, o que o torna inviável para avaliar seções com geometrias não usuais.

Hancock, Kwon e Bernard (1994) utilizaram uma metodologia de resolução de problemas de flambagem distorcional baseada em curvas de projeto desenvolvidas através de testes experimentais, o Método da Resistência Direta. Eles usaram para o caso específico de peças submetidas à compressão centrada ou à flexão simples.

Schafer e Peköz (1998) expandiram a aplicabilidade do Método da Resistência Direta ao adicionar à análise a flambagem local e global no dimensionamento de barras fletidas ou comprimidas. Diversos estudos e adaptações à norma vêm sendo propostos para ampliar a aplicabilidade do método, incluindo possibilidades de utilização para perfis perfurados, como o realizado por Sales (2017). Porém, o Método da Resistência Direta carece de uma forma de análise da estabilidade elástica da seção.

Para suprimir a análise de estabilidade, Batista (2009) desenvolveu uma metodologia para o cálculo das propriedades elásticas dos perfis pelo Método da Seção Efetiva. Neste método, determina-se uma força ou momento resistente à flambagem local elástica e assim obtêm-se as propriedades reduzidas da seção dos perfis de forma direta. Ao analisar a seção de forma contínua, o Método da Seção Efetiva reduz o esforço operacional de cálculo quando comparado com o Método da Largura Efetiva.

2.3 Métodos numéricos de dimensionamento de perfis formados a frio

O dimensionamento de estruturas em perfis formados a frio é um exercício que demanda elevado esforço de cálculo. Existem diversos softwares que atendem às prescrições normativas vigentes e que são capazes de desenvolver os cálculos utilizando métodos numéricos.

A utilização de programas computacionais que fazem uso de métodos numéricos de dimensionamento estrutural permite analisar o comportamento de perfis esbeltos que possuem modos de flambagem específicos e obter as cargas críticas de flambagem. Também possibilitam analisar seções de perfis não convencionais e variar as seções consideradas em cada análise (SOUZA, 2013).

Dentre os métodos numéricos possíveis, destacam-se: Teoria Generalizada de Vigas (GBT), Método das Faixas Finitas (MFF), Método dos Elementos Finitos (MEF). Este trabalho utilizará a Teoria Generalizada de Vigas via software GBTul (BEBIANO, SILVESTRE e CAMOTIM, 2008) e o Método dos Elementos Finitos (MEF) via software ANSYS (2021). O Método das Faixas Finitas não será adotado.

3 ANÁLISE NUMÉRICA - MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Os estudos numéricos desenvolvidos neste trabalho analisaram perfis formados a frio com seção rack submetidos à compressão centrada. Foram comparados perfis sem furos, com furos sem enrijecedor e com furos enrijecidos.

Sendo os pilares de galpões de armazenamento industrial com perfurações retangulares de extremidades arredondadas um dos principais usos dos perfis formados a frio com seção rack, este estudo considerou furos com formato retangular, da mesma forma como os trabalhos realizados por (SOUZA, 2013), (FARIA, 2016) e (GOMES, 2022).

O modelo teve sua configuração e condições de contorno direcionadas para estudar a ocorrência da flambagem entre furos. Inseriram-se dois furos (paralelos) no modelo, à meia altura dos pilares pois é onde tendem a ocorrer os maiores deslocamentos. Foram consideradas quatro situações:

- Pilar sem furos;
- Pilar com furos sem enrijecedores de borda;
- Pilar com furos com uma borda enrijecida;
- Pilar com furos com duas bordas enrijecidas.

Realizaram-se diversas análises numéricas para comparar os três modelos de enrijecedores considerados e a influência das perfurações com borda enrijecida neles. Adiante são apresentadas as principais considerações feitas para o estudo numérico.

3.1 Seção transversal do pilar analisado

Este trabalho adotou como objeto de estudo os perfis formados a frio com seção do tipo rack. A Figura 8 mostra a nomenclatura dos componentes das seções analisadas.

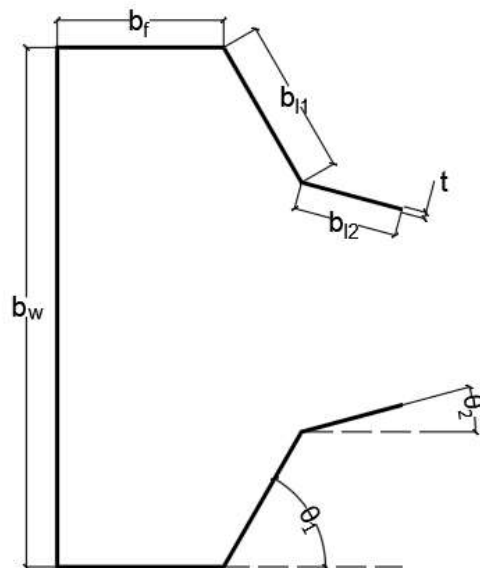


Figura 8: Componentes da seção tipo rack. Fonte: autor

Conforme a nomenclatura apresentada pela Figura 8, as dimensões adotadas foram:

- Largura da alma (b_w) igual a 100mm,
- Largura do flange (b_f) igual a 32mm,
- Largura do enrijecedor (b_{l1}) igual a 30mm,
- Largura do flange de ligação (b_{l2}) igual a 20mm,
- Espessura da chapa (t) igual a 1,2mm,
- Ângulo entre o enrijecedor e a horizontal (θ_1) igual a 60°
- Ângulo entre o flange de ligação e a horizontal (θ_2) igual a 0° ;

As simulações foram realizadas considerando quatro modelos distintos: perfis sem perfurações, com perfurações não enrijecidas, perfis perfurados com enrijecedor simples e perfis perfurados com enrijecedor duplo;

Nos modelos perfurados inseriram-se duas aberturas paralelas na alma. A Figura 9 ilustra a seção transversal tipo rack sem furos (i), com furos não enrijecidos (ii) e com perfurações enrijecidas (iii).

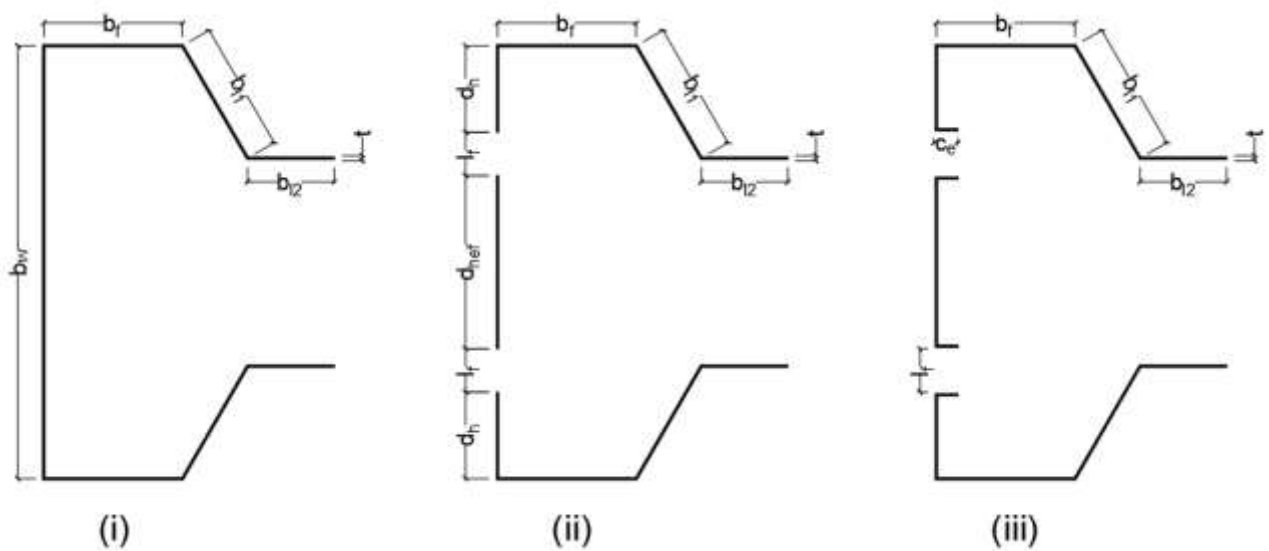


Figura 9: Seções transversal tipo rack de perfil formado a frio: (i) sem furos; (ii) com furos; (iii) com furos enrijecidos. Fonte: autor.

A largura dos furos (l_f) é fixa e igual a $0,1b_w$. A distância horizontal entre a extremidade lateral do perfil e a borda mais próxima do furo (d_h) é fixa e igual a $0,2b_w$. Assim, a distância horizontal entre furos (d_{hef}) é igual a $0,4b_w$.

Dentre os protótipos com perfurações enrijecidas foram avaliados dois casos:

- Enrijecedor simples: apresenta enrijecedor apenas na borda do furo mais próxima do centro da alma, ou seja, um enrijecedor por furo;
- Enrijecedor duplo: apresenta enrijecedor nas duas bordas laterais dos furos, ou seja, dois enrijecedores por furo;

Os enrijecedores (simples e duplo) são configurados durante o processo de perfuração das chapas. Por punção é feito o corte na linha média do furo, dividindo-o em 2 chapas de comprimento igual a metade da largura do furo ($c_e = l_f/2$). Assim, como $l_f = 0,1b_w$, cada enrijecedor é gerado com $c_e = 0,05b_w$. A Figura 10 expõe a seção transversal com enrijecedor simples e duplo.

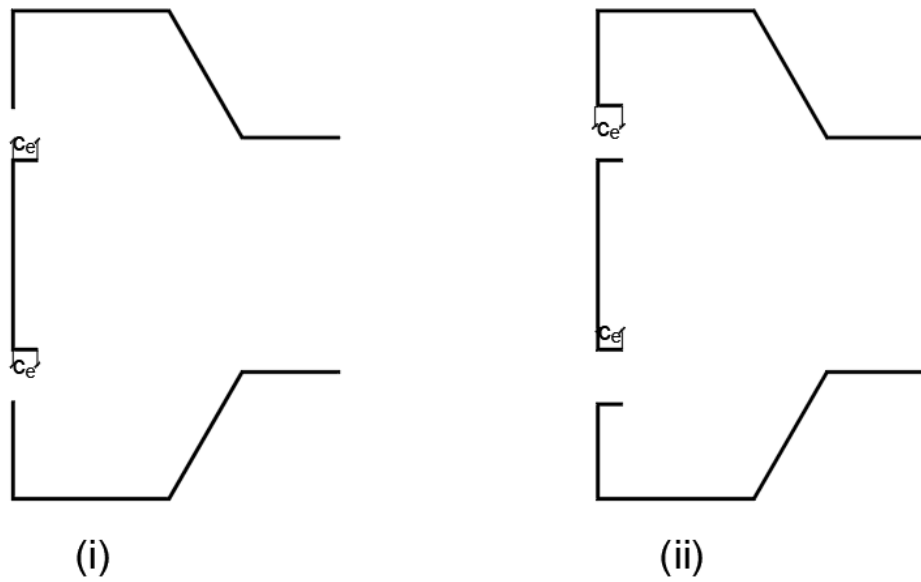


Figura 10: Seção transversal com perfuração enrijecida: (i) enrijecedor simples; (ii) enrijecedor duplo. Fonte: autor.

As perfurações foram posicionadas à meia altura na alma dos perfis. A altura dos furos (h_f) variou de $0,1b_w$ (10 mm) até $2,0b_w$ (200 mm) em múltiplos de $0,1b_w$ (10 mm). A Figura 11 mostra estes parâmetros.

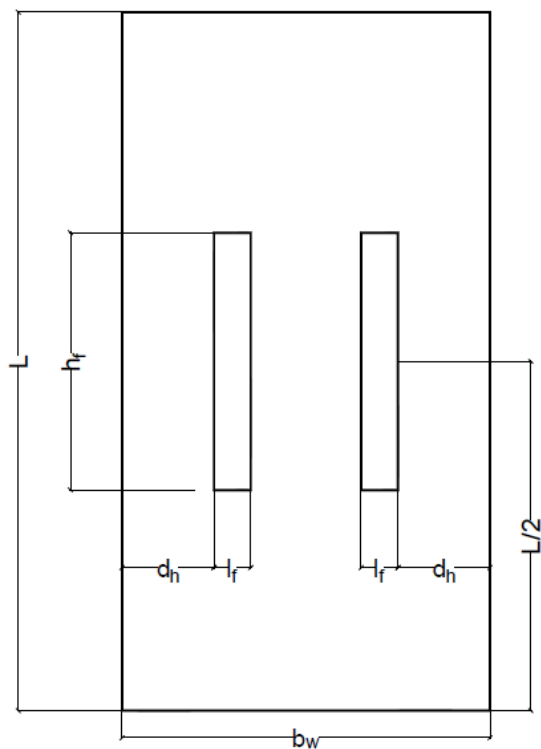


Figura 11: Parâmetros utilizados nas perfurações identificados na alma do perfil. Fonte: autor.

Para facilitar a identificação das amostras simuladas, adotou-se uma nomenclatura que descrevesse as principais características de cada modelo. A terminologia arbitrada foi:

ED-100X1,2-HF0,5

Onde:

- O termo ED indica pilar perfurado com enrijecedor duplo, ES pilar perfurado com enrijecedor simples, SE pilar perfurado sem enrijecedor e SF indica pilar sem furo;
- O termo 100x1,2 indica respectivamente: largura da alma (b_w) e espessura da chapa (t) em milímetros;
- O termo HF0,5 indica que a altura do furo retangular é igual a $0,5b_w$ (50 mm);

3.2 Comprimento do pilar

Para definir o comprimento do pilar simulado foi feita avaliação da seção por meio do software GBTul (BEBIANO, SILVESTRE e CAMOTIM, 2008) considerando o modelo SF-100x1,2. O programa informou o comprimento de meia onda equivalente de 80 mm para a força axial de flambagem local elástica igual a 49,71kN.

Faria (2016) utilizou pilares com comprimento igual a cinco vezes a largura da alma para reduzir o efeito de extremidade. Da mesma forma, no presente trabalho adotou-se o comprimento do pilar igual a cinco vezes o comprimento de meia onda ($L = 400$ mm) obtido no software GBTul.

3.3 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos é um procedimento utilizado para solução de problemas reais através de modelos numéricos. Historicamente, o método passou por diversas adequações até evoluir ao que representa atualmente em termos de análises numéricas, conforme descrito pela Metal Cruzado (2022) e compilado pela Figura 12 a seguir:

- Surge em 1909, sendo utilizado com outro nome pelo matemático suíço Walter Ritz para solucionar problemas da mecânica dos sólidos;
- Em 1943, Richard Courant desenvolveu uma forma computacional de resolução de problemas com este método, que passou a ser conhecido por Método dos Elementos Finitos;
- Já em 1950, Ray William Clough em conjunto com outros pesquisadores de engenharia estrutural colocaram em prática o método;
- Seis anos depois, em 1956, Clough desenvolveu um software capaz de dimensionar aeronaves utilizando o Método dos Elementos Finitos;
- Em 1964, a NASA, em parceria com a McNeal-Schwedler, desenvolveu um software de cálculo estrutural para estruturas em geral, o General Purpose Structural Analysis (GPSA), que posteriormente (1965) viria a ser chamado de Nasa Structure Analysis (NASTRAN);
- Após essa parceria, a McNeal-Schwedler elaborou em 1966 o MSC Nastran que, ainda hoje, é um software disseminado na análise de automóveis e aeronaves;
- Então, no ano 1969, John Swanson, que prestou serviço para o governo norte americano utilizando o Método dos Elementos Finitos em reações nucleares de foguetes, criou a empresa Ansys que é desenvolvedora do software ANSYS, programa muito difundido em análises via elementos finitos.

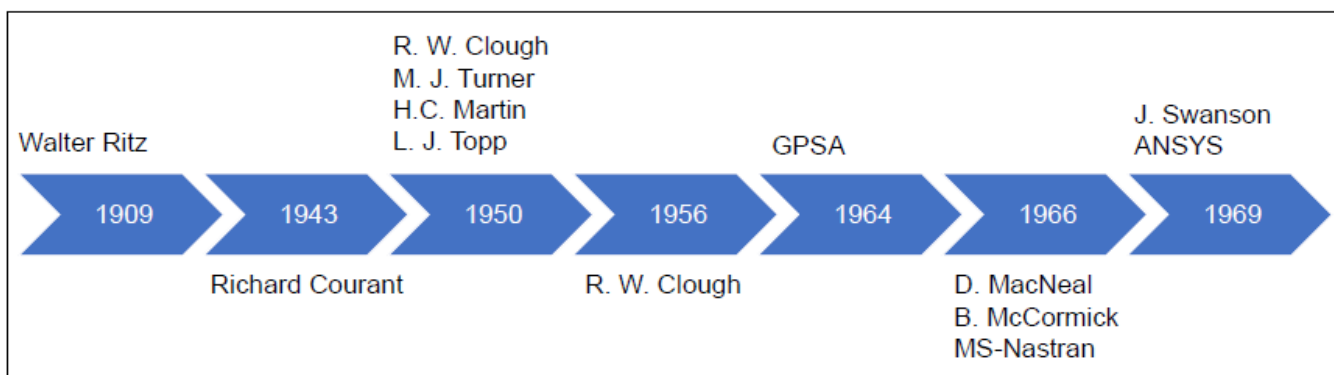


Figura 12: Cronologia da evolução do Método dos Elementos Finitos. Fonte: adaptado de Metal Cruzado (2022).

Atualmente ele é muito disseminado na análise estrutural e sua aplicação consiste na subdivisão dos elementos analisados em um conjunto de frações menores (malha de elementos), muitas vezes infinitesimais. Assim, abre-se uma gama de possibilidades para o seu emprego ao permitir a construção de geometrias diversas e complexas.

Em contrapartida, a utilização do Método dos Elementos Finitos através de softwares de dimensionamento demanda elevado custo computacional. Ao gerar um número elevado de malhas e nós, o modelo numérico precisa resolver sistemas com muitas variáveis e isso pode acarretar demora e dificuldade no processamento das informações.

Assim, é preciso equilibrar precisão e esforço de cálculo nas modelagens. O presente trabalho utilizará o software ANSYS (2021) para realizar análises numéricas de perfis formados a frio via Método dos Elementos Finitos.

3.4 Propriedades mecânicas do aço

Os aços utilizados para as simulações foram adotados procurando estabelecer limites para o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local.

O módulo de elasticidade adotado nas simulações foi $E=200$ GPa e o coeficiente de Poisson $\nu=0,3$. Para desenvolver a análise não linear, adotou-se o diagrama “Tensão x Deformação multilinear” descrito por Faria (2016), e apresentado na Figura 13. As propriedades elastoplásticas do aço foram obtidas através da aproximação Utilizada por Faria (2016), cujas coordenadas são:

- I ($\epsilon_1; 0,7f_y$)
- II ($3\epsilon_y; f_y$)
- III ($10\epsilon_y; 1,01f_y$)
- IV ($100\epsilon_y; f_u$)

A Figura 13 apresenta o gráfico descrito pelas coordenadas acima para o aço CF30 com tensão de escoamento f_y igual a 300 MPa e tensão última f_u igual a 490 MPa. O valor da deformação ϵ_y foi obtido pela divisão do módulo de elasticidade pela tensão de escoamento.

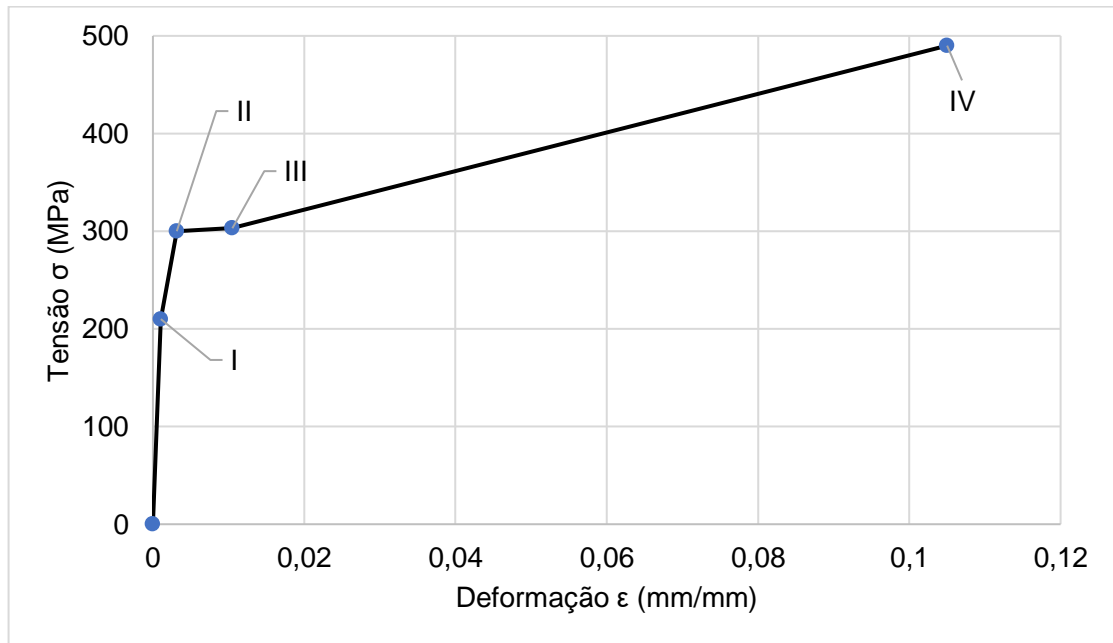


Figura 13: Diagrama Tensão x Deformação Multilinear. Fonte: adaptado de Faria (2016).

3.5 Tipos de elementos finitos

A biblioteca do ANSYS (2021) descreve o tipo de elemento finito SHELL181 como um elemento de casca indicado para análises elastoplásticas que possui quatro nós e seis graus de liberdade em cada nó. A sua utilização foi testada por Silva (2011), Souza (2013), Faria (2016) e Jardim Jr. (2018) como forma de discretizar o perfil analisado.

Os resultados indicaram boas correlações com as análises feitas via Teoria Generalizada de Vigas. Assim, este estudo também fez uso do elemento SHELL181 na formulação do modelo de elementos finitos.

3.6 Malha de elementos finitos (refinamento)

O refinamento das malhas na análise via elementos finitos do ANSYS é de extrema importância por ter relação direta com a sensibilidade dos resultados. É preciso alcançar boas respostas dos modelos sem elevado custo computacional.

Este estudo utilizou malhas quadrilaterais com medida do lado equivalente a 10% da dimensão da alma (10 mm), pois, conforme analisado por Souza (2013), apresentam boa correlação com os resultados obtidos pela Teoria Generalizada de Vigas via software GBTul. A Figura 14 ilustra a malha quadrangular citada em seção rack sem perfuração.

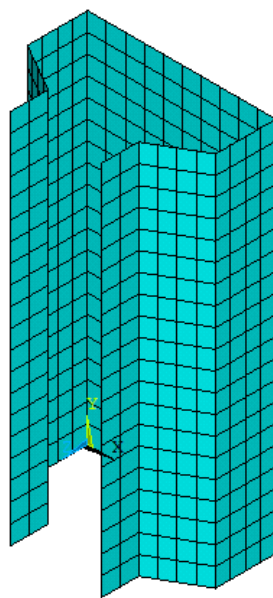


Figura 14: Malha quadrangular com lado igual a 10% de b_w gerada em perfil rack sem perfuração. Fonte: autor.

3.7 Condições de contorno

Os nós das extremidades tiveram os deslocamentos perpendiculares ao eixo do modelo restringidos, assim como a rotação em relação ao eixo longitudinal. Um nó situado à meia altura do modelo teve sua translação impedida na direção axial, para combater o movimento de corpo rígido na direção do carregamento. A Figura 15 apresenta as condições descritas. O carregamento foi aplicado de forma concentrada nos nós mestres das extremidades do pilar.

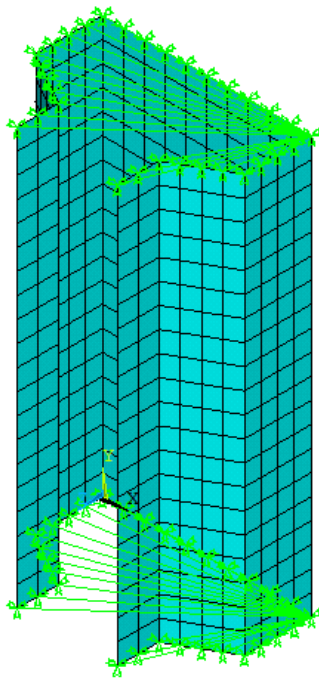


Figura 15: Aplicação das restrições nas extremidades do modelo. Fonte: autor.

3.8 Linguagem de programação do Ansys

Para viabilizar a simulação de diversos modelos com variação de diversos parâmetros foi utilizada a linguagem de programação paramétrica APDL – ANSYS Parametric Design Language. Com ela é possível variar as dimensões das seções analisadas, a quantidade de furos e as medidas das perfurações. Também permite variar os tamanhos dos enrijecedores de borda das perfurações.

A APDL permite construir modelos com geometrias variadas e facilita sua análise. Desta forma, a sua utilização contribuiu para o desenvolvimento do trabalho. Utilizou-se a linguagem de programação para realizar inicialmente a análise de flambagem linear dos perfis e posteriormente para acrescentar ao modelo os efeitos de segunda ordem e as propriedades plásticas do aço.

Nos subitens a seguir são apresentadas as sequências de comandos para realização das análises linear e não linear.

3.8.1 Análise linear

A análise de estabilidade linear segue os passos:

1. Inicializar o software ANSYS Mechanical APDL 2021 R1;
2. Definir o tipo de análise que será realizada: estrutural;
3. Ajustar as opções de visualização;
4. Definir a geometria do modelo avaliado: espessura, largura da alma, flange, enrijecedor e comprimento do pilar;
5. Definir o tipo de elemento e material utilizado na análise do ANSYS: SHELL181;
6. Inserir as propriedades mecânicas do aço: módulo de elasticidade;
7. Modelar o perfil com base na geometria definida no 4º passo:
 - a) Definir os keypoints;
 - b) Criar a sequência dos keypoints e formar as áreas;
 - c) Inserir as perfurações (caso o modelo possua);
 - d) Inserir os enrijecedores de borda nas perfurações (caso o modelo os possua);
8. Definir e gerar a malha de elementos finitos;
9. Aplicar as condições de contorno;
 - a) Restringir o deslocamento e a rotação em um nó na metade da altura do pilar;
 - b) Acoplar os nós;
 - c) Aplicar a carga unitária de compressão;
10. Solucionar o problema de autovalor e autovetor para determinar o valor da carga crítica de flambagem elástica e o modo de falha associado a ela;
11. Ler, armazenar e avaliar os resultados.

3.8.2 Análise não linear

Para avançar na análise, também deve ser feita a análise não linear dos modelos, considerando o modo de flambagem local. Ela considera os efeitos de segunda ordem e o regime elastoplástico do aço. Para tal o método numérico deve atualizar a geometria dos modelos a partir dos deslocamentos obtidos na análise linear, adaptando-a para sua configuração deformada. Este trabalho considera metade do valor da espessura da chapa (t) para introdução das imperfeições geométricas e atualização da geometria.

As simulações também foram feitas seguindo a metodologia de construção da APDL, de forma análoga à análise linear. A seguir é apresentada a sequência de definição das etapas.

1. Dos passos 1 ao 10, a metodologia é a mesma apresentada no item 3.8.1;
2. Introdução das imperfeições geométricas do aço e definir os modos de flambagem:
 - a. A definição do modo de flambagem segue a linha do trabalho realizado por Souza (2013). Inicialmente é feita análise linear e então são inseridos os fatores de imperfeição no modelo;
 - b. O fator de imperfeição foi arbitrado como sendo metade da espessura das chapas (t) do modelo, seguindo a mesma linha do trabalho experimental realizado por Faria (2016);
3. Inserção das propriedades elastoplásticas do aço e do diagrama tensão versus deformação multilinear:
 - a. Aço utilizado: foi definido conforme item 3.4;
 - b. As propriedades não lineares do aço foram adotadas conforme diagrama tensão versus deformação multilinear apresentado anteriormente;
4. Aplicar na estrutura a carga igual ao escoamento da seção bruta do perfil ($A_g f_y$);
5. Resolver o problema de análise não linear. Para isto, o Método do Comprimento de Arco foi adotado a fim de assegurar a convergência da análise. A carga é aplicada gradativamente até alcançar um critério de parada. Neste estudo, este critério foi o estabelecimento de um deslocamento máximo ao qual a estrutura poderia estar submetida. Esse deslocamento é obtido de forma iterativa buscando assegurar que o perfil alcance sua resistência última;
6. Ler, armazenar e avaliar os resultados.

4 RESULTADOS

Neste item são apresentados os resultados das simulações numéricas realizadas através do software ANSYS (2021), baseadas no Método dos Elementos Finitos. A discussão dos resultados é dividida entre análise linear e não linear.

Avaliou-se a influência da variação das dimensões das perfurações na resistência e no comportamento de perfis formados a frio com seção rack, bem como a influência dos enrijecedores de borda (simples e duplo) na flambagem entre furos.

Em um primeiro momento foi feita a validação do protótipo, confrontando os valores obtidos através do Método da Resistência Direta com os aferidos pela análise não linear no software ANSYS (2021) para o pilar sem perfurações. Após a validação do modelo foram inseridas nele perfurações. Finalmente, acrescentaram-se aos perfis os enrijecedores de borda – simples ou duplo.

4.1 Validação do modelo proposto

A análise foi feita para um perfil SF-100x1,2. Inicialmente, o estudo linear realizado no software GBTul (BEBIANO, SILVESTRE e CAMOTIM, 2008) indicou uma força axial de flambagem local elástica (N_l) igual a 49,71 kN e comprimento de meia onda correspondente igual a 80 mm. Os valores foram retirados do gráfico apresentado pela Figura 16 que descreve no eixo das ordenadas os valores das cargas críticas de flambagem e nas abscissas os comprimentos críticos de flambagem.

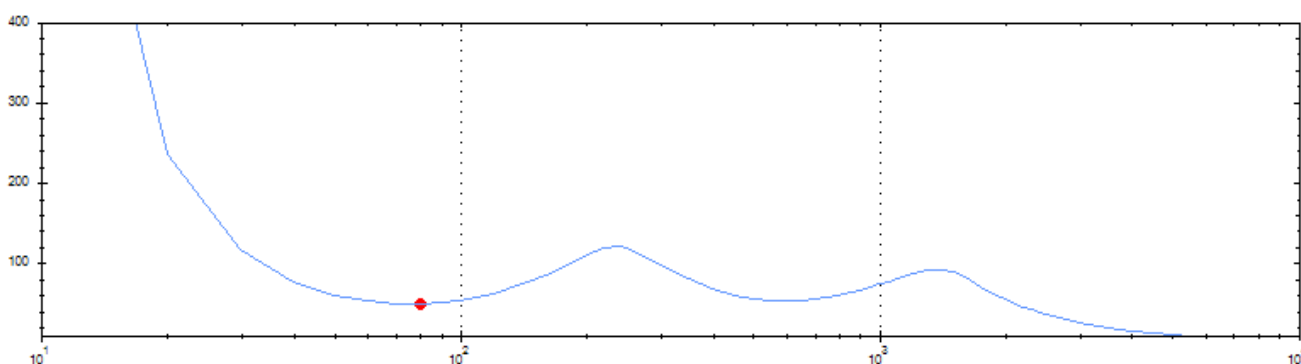


Figura 16: Curva de flambagem do perfil SF100x1,2. Fonte: análise feita pelo autor no GBTul (2008).

Em seguida, foi feita a análise linear do modelo no ANSYS (2021). O protótipo é apresentado pela Figura 17.

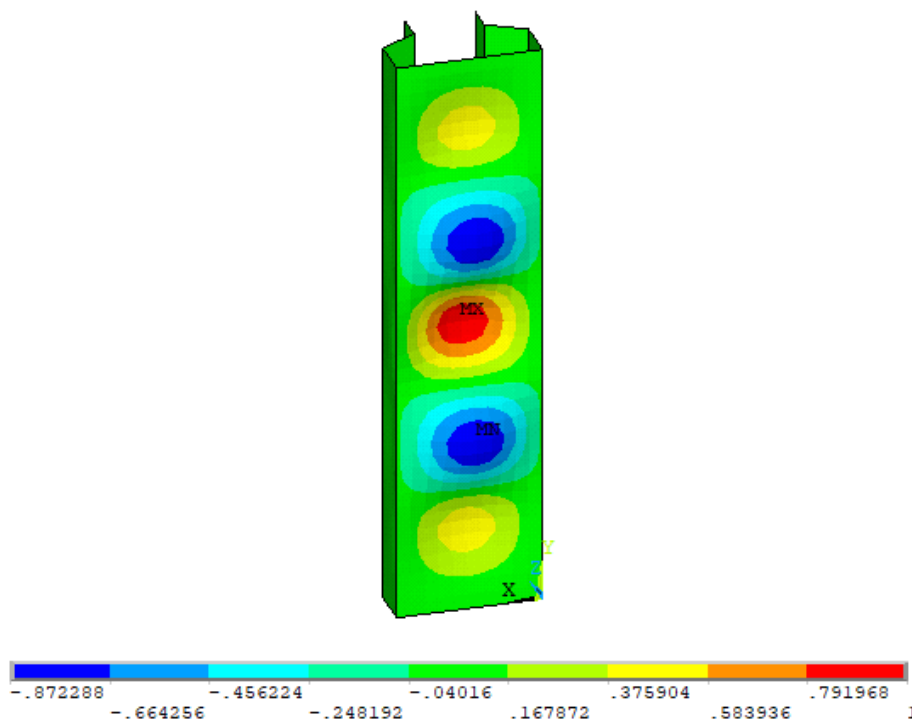


Figura 17: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm) do modelo SF-100x1,2. Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).

A simulação apresentou cinco meias ondas bem definidas e força axial de flambagem local elástica igual a 49,90 kN. A diferença foi de 0,19 kN (0,38%) em relação ao obtido pelo GBTul, indicando assim, boa correlação entre os modelos.

Posteriormente foi feita análise não linear deste mesmo modelo. O aço considerado foi o CF30 ($f_y = 300\text{MPa}$; $f_u = 490\text{MPa}$) e o comprimento do pilar igual a cinco vezes o comprimento de meia onda (400 mm), conforme apresentado no Item 3.2.

Utilizando o N_l , obtido no software GBTul, calculou-se a resistência da seção à flambagem local ($N_{c,rl}$) com as equações do Método da Resistência Direta 7.4, 7.5 e 7.6 apresentadas por Souza (2013), que considera os modos isolados. O resultado obtido foi $N_{c,rl}$ igual a 64,85 kN.

$$N_{c,rl} = Af_y \quad \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \quad (7.4)$$

$$N_{c,rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{N_{c,re}}{\lambda_l^{0,8}} \quad \text{para } \lambda_l > 0,776 \quad (7.5)$$

Sendo:

$$\lambda_l = \left(\frac{Af_y}{N_l}\right)^{0,5} \quad (7.6)$$

Onde:

- A é a área bruta da seção transversal da barra;
- f_y é a tensão de escoamento do aço;
- $N_{c,re}$ é a força axial de compressão resistente associada à flambagem global
- N_l é a força axial de flambagem local elástica.
- λ_l é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local;

Logo depois, foi atualizada a geometria do perfil no ANSYS, com inserção das imperfeições geométricas, adotando o valor de metade da espessura das chapas. O critério de parada definido foi o deslocamento de 4 mm. O resultado obtido foi $N_{c,rl}$ igual a 65,33 kN, com diferença de 0,48 kN (0,74%) em relação ao obtido pelo Método da Resistência Direta, indicando assim, boa correlação entre os modelos.

4.2 Análise linear

Após a validação do protótipo foram realizadas análises lineares em perfis com furos: sem enrijecedor, com enrijecedor simples e com enrijecedor duplo. O intuito foi avaliar o efeito das perfurações na resistência dos modelos e o uso de enrijecedores como uma alternativa de combate à flambagem entre furos.

A Tabela 1 apresenta os valores característicos da força axial de compressão resistente associados à flambagem local elástica obtidos. Vale destacar que, para a seção sem perfuração, obteve-se N_l igual a 49,90 kN.

Tabela 1: Carga crítica de flambagem elástica (kN) em função da altura do furo (h_f / b_w). Fonte: autor.

h_f / b_w	Furo não enrijecido	Enrijecedor simples	Enrijecedor duplo
0,1	49,00	48,91	48,92
0,2	48,31	50,13	50,58
0,3	45,76	51,16	51,64
0,4	42,71	50,55	51,29
0,5	37,32	51,42	52,11
0,6	31,73	51,96	52,62
0,7	26,20	53,11	53,44
0,8	22,28	53,51	53,98
0,9	18,78	54,24	54,63
1,0	16,08	54,67	55,02
1,1	13,72	55,07	55,38
1,2	12,08	54,84	55,82
1,3	10,59	52,45	55,30
1,4	9,39	49,16	52,40
1,5	8,37	45,54	48,58
1,6	7,51	41,96	44,91
1,7	6,77	38,60	41,25
1,8	6,15	35,55	38,05
1,9	5,60	32,81	35,09
2,0	5,13	30,35	32,45

A Figura 18 apresenta em formato gráfico os dados da Tabela 1. As curvas formadas pelos perfis perfurados com enrijecedor simples e duplo possuem comportamentos similares.

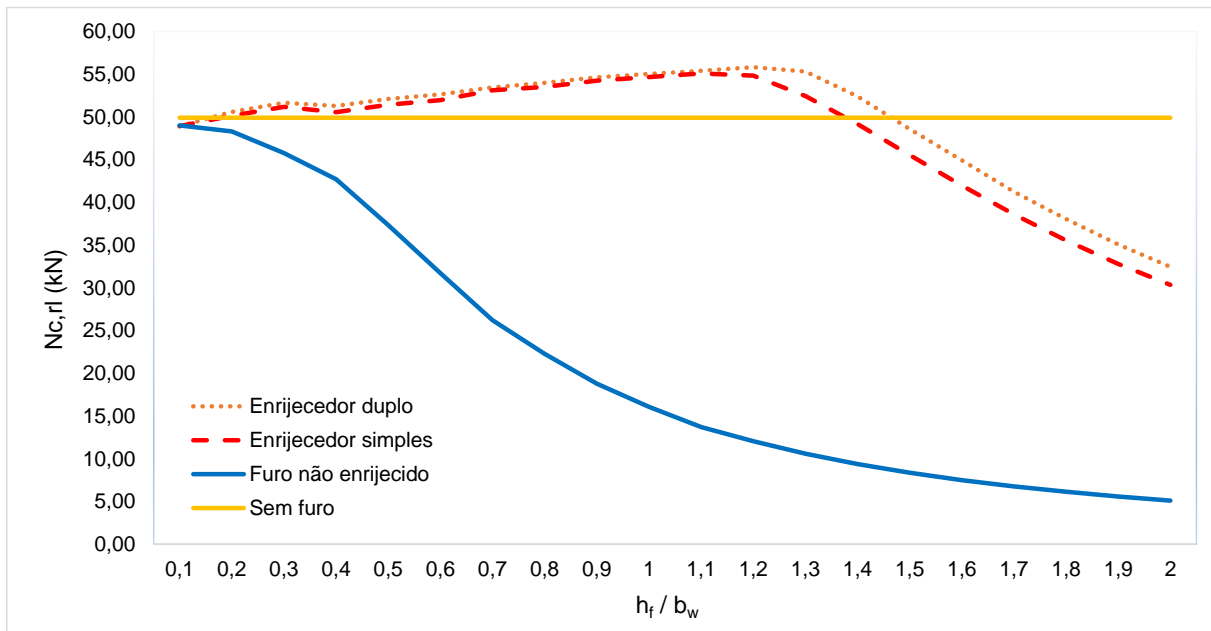


Figura 18: Carga crítica de flambagem elástica em função da altura do furo. Fonte: autor.

Analisando a Figura 18 observa-se que a seção com furo não enrijecido apresentou resultados de Carga Crítica inferiores ao modelo sem furos durante todo o intervalo considerado. Nota-se também que a resistência à flambagem elástica da seção com enrijecedor (simples ou duplo) é superior à seção com furo não enrijecido.

Além disto, o modelo com enrijecedor simples obteve carga crítica superior ao perfil sem furo até ES-100X1,2-HF1,3. Observa-se que a partir de ES-100X1,2-HF1,4 a Carga Crítica de Flambagem Elástica do modelo com enrijecedor simples é inferior ao modelo sem furos.

Por fim, o modelo com enrijecedor duplo apresentou carga crítica superior ao perfil sem furo até ED-100X1,2-HF1,4. Observa-se que a partir de ES-100X1,2-HF1,5 a Carga Crítica de Flambagem Elástica do modelo com enrijecedor simples é inferior ao modelo sem furos.

4.2.1 Perfil com furo não enrijecido

Os valores apresentados na Tabela 1 indicam que, para furos não enrijecidos, quanto maior a relação h_f/b_w , menor a Carga Crítica do modelo. Para a relação de 0,1 (10 mm) houve queda na resistência de 1,81% em comparação com o modelo sem furos; enquanto para relação 2,0 (200 mm) a redução foi de 89,72%.

No intervalo entre SE-100X1,2-HF0,4 e SE-100X1,2-HF0,5 notou-se a transição para flambagem entre furos, além de redução na Carga Crítica de Flambagem Elástica de 14,40% e 25,22% respectivamente. Neste mesmo intervalo percebe-se uma mudança na tendência da curva da Carga Crítica do modelo com furo não enrijecido.

A Figura 19 ilustra essa transição da flambagem local para a flambagem entre furos. No intervalo entre SE-100X1,2-HF0,5 e SE-100X1,2-HF0,6 observa-se a redução de cinco meias ondas para uma única meia onda restrita à região entre as perfurações, caracterizando a Flambagem entre Furos.

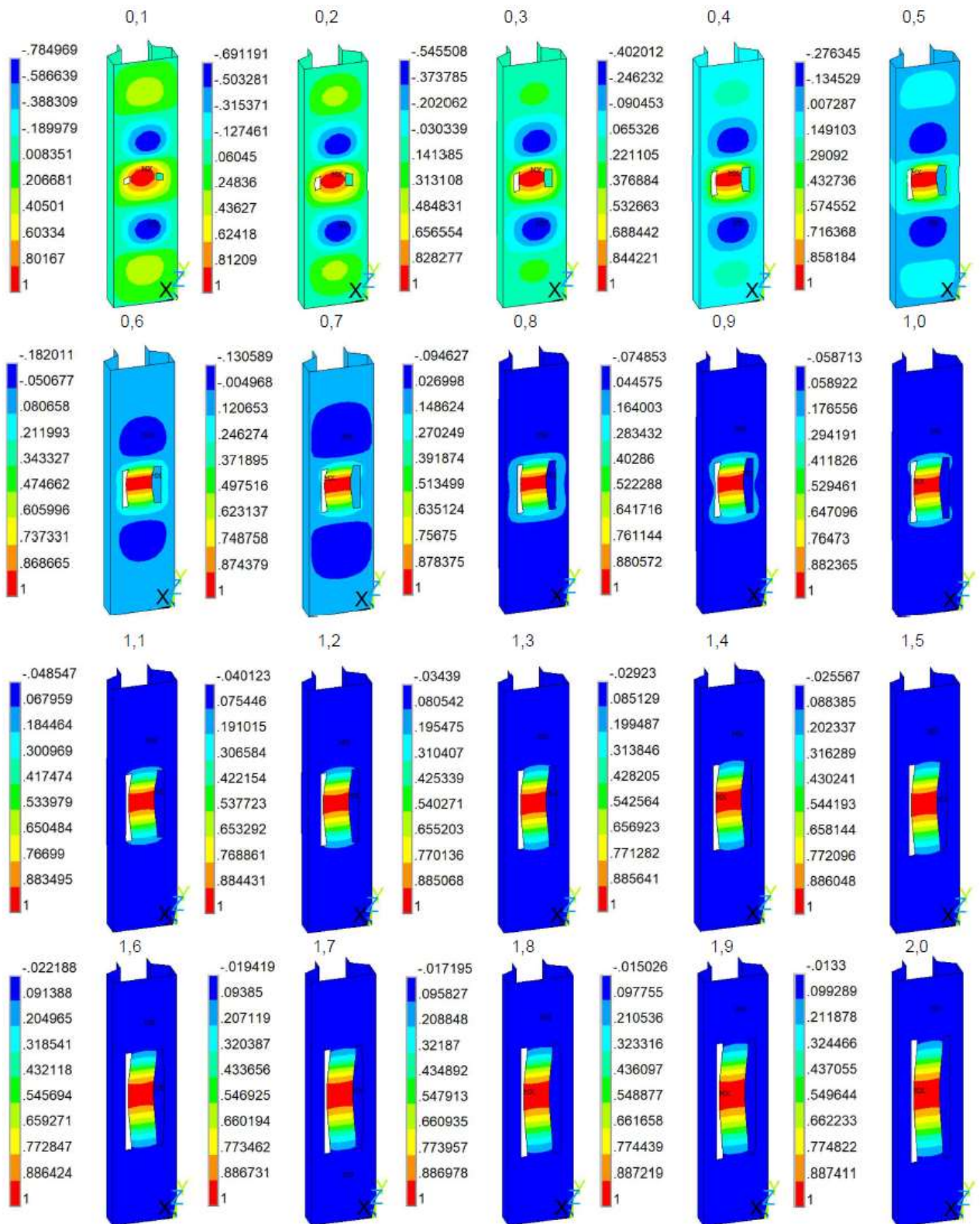


Figura 19: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm). Seções numeradas da esquerda para a direita e de cima para baixo, desde SE-100X1,2-HF0,1 até SE-100X1,2-HF2,0.

Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).

4.2.2 Perfil perfurado com enrijecedor simples

Em relação ao modelo perfurado com enrijecedor simples, a Figura 18 mostra que a carga crítica de flambagem elástica é superior à do perfil sem furo em determinado intervalo. Neste trecho o enrijecedor simples impede o desenvolvimento da flambagem entre furos.

Comparando os resultados com o modelo sem perfurações houve uma perda de resistência de 1,98% para o protótipo ES-100X1,2-HF0,1. Já para ES-100X1,2-HF1,1 houve acréscimo na resistência de 10,37% (incremento máximo observado na análise) e para ES-100X1,2-HF1,3 esse aumento foi de 5,11%. A partir do modelo ES-100X1,2-HF1,3 o modelo com enrijecedor simples possui resistência inferior ao perfil sem furo à medida em que se aumenta h_f/b_w .

De acordo com a Tabela 1 observa-se para furos com enrijecedor simples que:

- no intervalo entre ES-100X1,2-HF0,1 e ES-100X1,2-HF1,1 a Carga Crítica aumenta à medida em que se eleva a relação h_f/b_w ;
- a partir de então, no intervalo entre ES-100X1,2-HF1,2 e ES-100X1,2-HF2,0 a Carga Crítica diminui à medida em que se eleva a relação h_f/b_w ;

A Figura 20 compila as imagens de deslocamento ortogonais à alma obtidas através da análise linear dos modelos variando a altura dos furos. Na mudança do modelo ES-100X1,2-HF0,1 para ES-100X1,2-HF0,2 nota-se a redução de cinco para quatro meias ondas.

No intervalo ES-100X1,2-HF1,1 para ES-100X1,2-HF1,2 notou-se a transição da flambagem local para a flambagem entre furos. Ao compararmos com o perfil perfurado sem enrijecedor, nota-se que a presença do enrijecedor simples retarda a aparição da flambagem entre furos. Percebe-se ainda que, ao iniciar a predominância da flambagem entre furos o enrijecedor perde sua eficiência, ocorrendo o decréscimo da carga crítica observado na Figura 18.

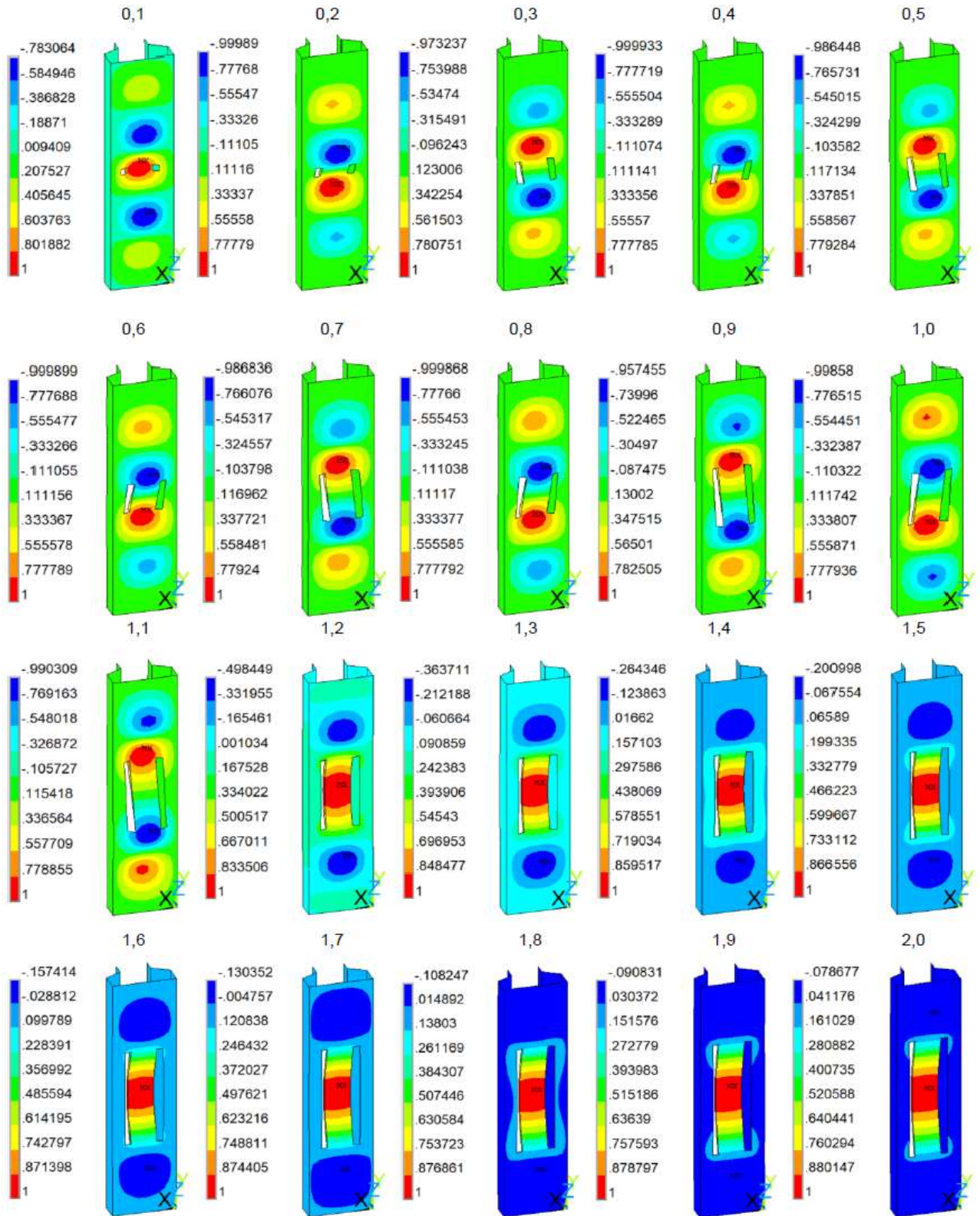


Figura 20: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm). Seções numeradas da esquerda para a direita e de cima para baixo, desde ES-100X1,2-HF0,1 até ES-100X1,2-HF2,0.

Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).

4.2.3 Perfil perfurado com enrijecedor duplo

Finalizando a análise linear, a Figura 18 aponta que o modelo com enrijecedor duplo apresentou carga crítica de flambagem elástica superior ao perfil com furo não enrijecido e ao perfil com enrijecedor simples. Ou seja, o enrijecedor duplo inibiu o desenvolvimento da flambagem entre furos com maior eficiência.

Comparando os resultados com o modelo sem furo houve uma perda da carga crítica de 1,97% para ED-100X1,2-HF0,1. Já para ED-100X1,2-HF1,2 houve acréscimo de 11,86% (incremento máximo observado na análise) e para ED-100X1,2-HF1,4 esse aumento foi de 5,01%. A partir de ED-100X1,2-HF1,5 o perfil perfurado com enrijecedor duplo possui resistência à flambagem local elástica menor do que o modelo sem furos.

De acordo com a Tabela 1 observa-se para furos com enrijecedor duplo que:

- no intervalo entre ED-100X1,2-HF0,1 e ED-100X1,2-HF1,2 a Carga Crítica aumenta à medida em que se eleva a relação h_f/b_w ;
- a partir de então, no intervalo entre ED-100X1,2-HF1,3 e ED-100X1,2-HF2,0 a Carga Crítica diminui à medida em que se eleva a relação h_f/b_w ;

A Figura 21 contém as imagens de deslocamento da alma obtidas pela análise linear dos modelos variando a altura dos furos. Na mudança do modelo ED-100X1,2-HF0,1 para ED-100X1,2-HF0,2 nota-se a redução de cinco para quatro meias ondas.

No intervalo entre ED-100X1,2-HF1,2 e ED-100X1,2-HF1,3 notou-se a transição da flambagem local para a flambagem entre furos. A presença do enrijecedor duplo retardou a aparição da flambagem entre furos, comparando com os demais perfis perfurados. Assim como no caso anterior, o início do trecho com predominância da flambagem entre furos corresponde ao início da redução da carga crítica mostrado na Figura 18. Em ambos os casos do uso dos enrijecedores, eles se mostraram efetivos no combate a esse modo de flambagem, com destaque ao enrijecedor duplo.

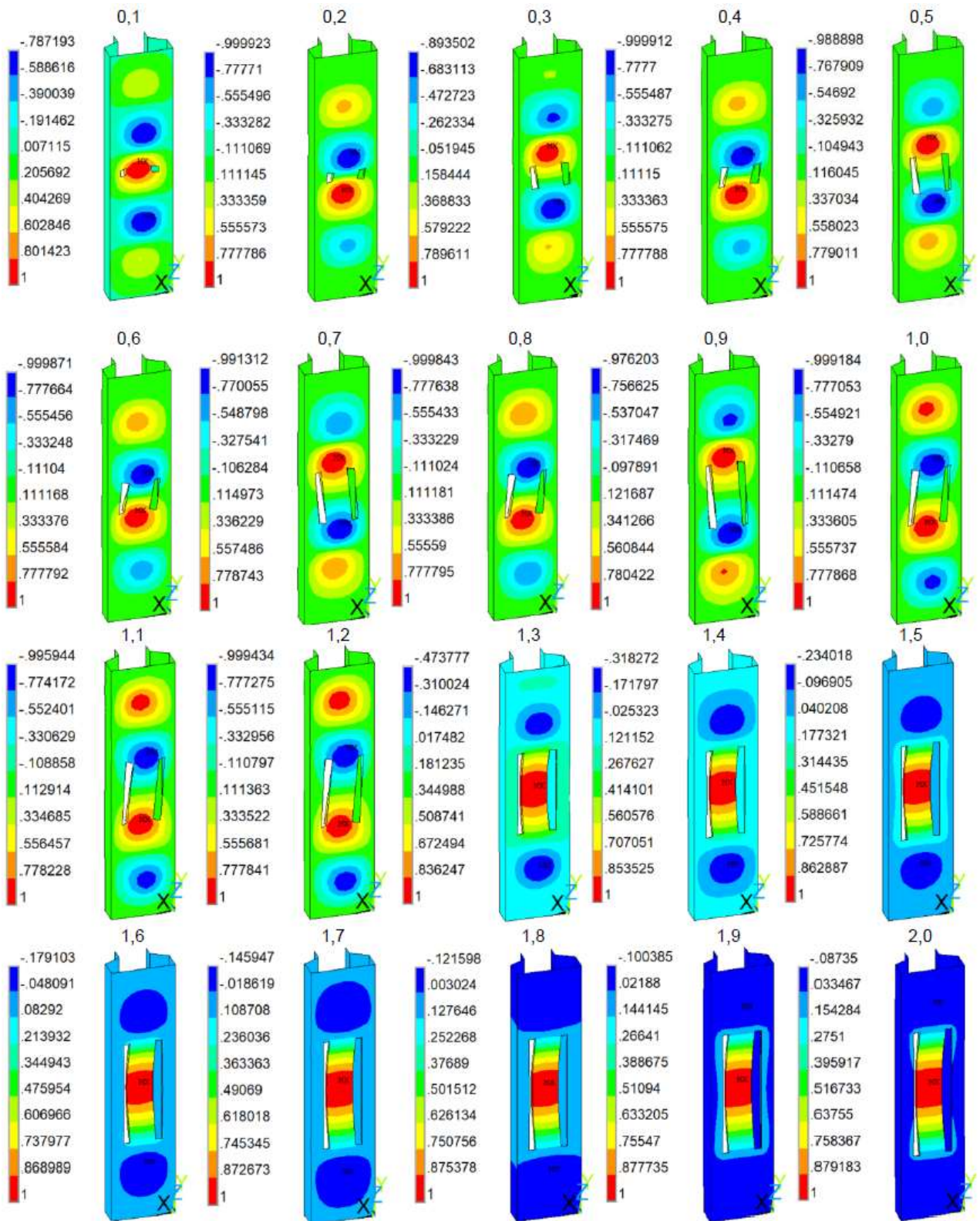


Figura 21: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm). Seções numeradas da esquerda para a direita e de cima para baixo, desde ED-100X1,2-HF0,1 até ED-100X1,2-HF2,0.

Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).

4.3 Análise não linear

Em seguida foi feita a análise não linear dos modelos. De maneira similar, foram considerados perfis com furos: sem enrijecedor, com enrijecedor simples e duplo. A Tabela 2 apresenta os valores da força axial de compressão resistente associada à flambagem local ($N_{c,rl}$).

Tabela 2: Resistência da seção à flambagem local em função da altura do furo. Fonte: autor.

h_f / b_w	Furo não enrijecido	Enrijecedor simples	Enrijecedor duplo
0,1	63,90	63,96	64,21
0,2	62,75	64,48	64,87
0,3	61,43	64,31	64,63
0,4	60,76	63,23	64,40
0,5	61,45	62,96	64,15
0,6	61,16	62,77	63,89
0,7	60,50	62,95	63,66
0,8	60,08	62,44	63,43
0,9	59,96	62,28	63,22
1	59,70	62,33	63,02
1,1	60,11	62,02	62,92
1,2	60,29	61,29	62,63
1,3	60,34	61,26	61,72
1,4	60,34	61,22	61,60
1,5	60,25	61,13	61,48
1,6	60,01	60,92	61,34
1,7	60,08	60,86	61,24
1,8	60,02	60,74	61,11
1,9	59,98	60,69	61,02
2	59,92	60,60	60,96

A Figura 22 apresenta um gráfico compilando os dados da Tabela 2. Para a seção sem perfuração obteve-se $N_{c,rl}$ igual a 65,30 kN.

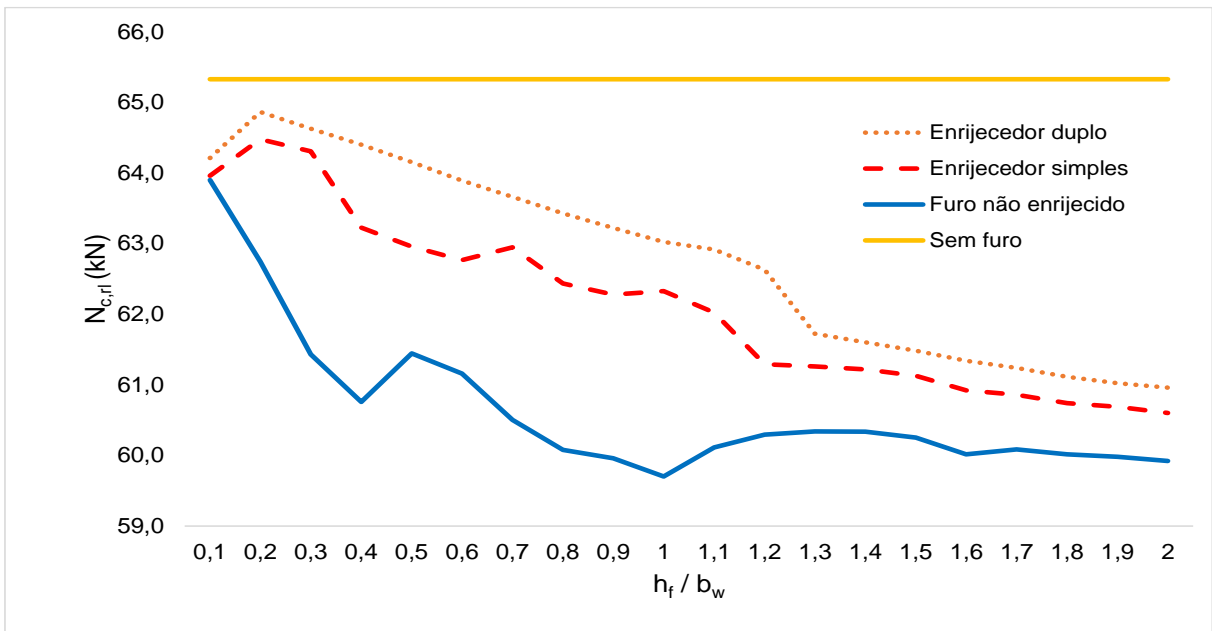


Figura 22: Resistência da seção à flambagem local em função da altura do furo. Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).

Analisando a Figura 22 observa-se que as seções com furo não enrijecido, com enrijecedor simples e duplo apresentaram Carga Última inferior ao modelo sem perfurações. Nota-se também que Carga Última da seção com enrijecedor (simples ou duplo) é superior à seção com furo não enrijecido.

4.3.1 Perfil com furo não enrijecido

Os valores apresentados na Tabela 2 indicam tendência de queda da Carga Última no modelo com furo não enrijecido à medida em que se aumenta a altura do furo. Apesar disto, nota-se na Figura 22 três picos de resistência. A Figura 23 apresenta os deslocamentos na alma.

Observa-se no gráfico dois trechos. No primeiro, com a relação h_f/b_w entre 0,1 e 0,5, que é o trecho com predominância da Flambagem Local, nota-se o decréscimo constante dos valores. A partir desse ponto, com a predominância da flambagem entre furos, observa-se relativa estabilização dos valores indicando o efeito da flambagem entre furos.

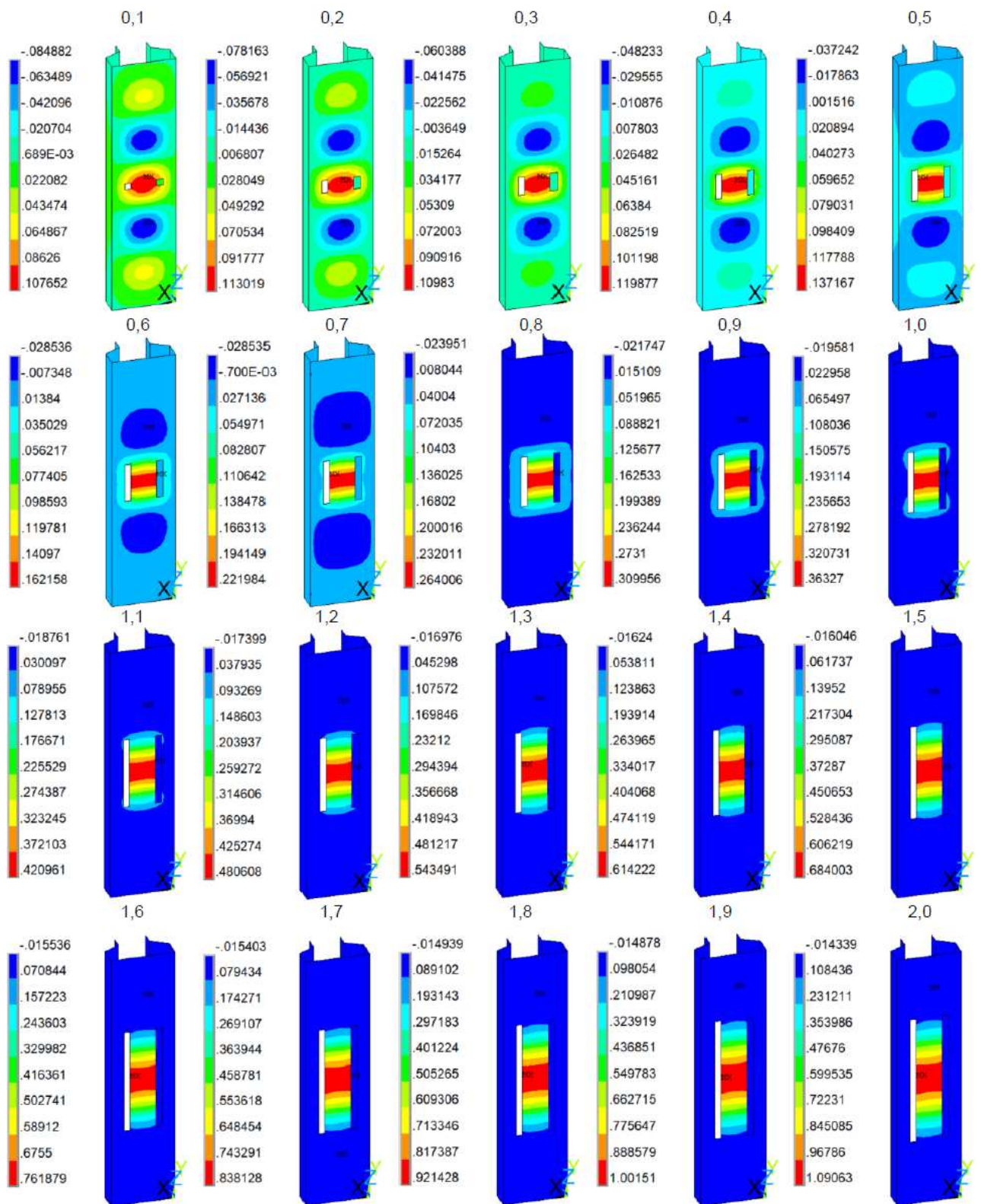


Figura 23: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm). Seções numeradas da esquerda para a direita e de cima para baixo, desde SE-100X1,2-HF0,1 até SE-100X1,2-HF2,0.

Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).

4.3.2 Perfil perfurado com enrijecedor simples

Em relação ao modelo perfurado com enrijecedor simples, a Figura 22 mostra que a Carga Última associada à flambagem local é superior ao perfil com furo não enrijecido durante todo o intervalo analisado. Entretanto, em nenhum momento foi superior ao protótipo sem perfurações.

De forma similar ao perfil com furo não enrijecido o modelo com enrijecedor simples apresentou tendência de queda da Carga Última à medida em que se eleva a altura do furo. Comparando o modelo com o sem furos, houve perda de resistência à flambagem local. Para o perfil ES-100X1,2-HF0,1 essa perda foi de 2,09% e para ES-100X1,2-HF2,0 foi de 7,24%.

No trecho com predominância da flambagem local, ou seja, h_f/bw menor que 1,2, observa-se constante decréscimo da resistência. A partir desse ponto, com a predominância da flambagem entre furos, esse decréscimo é menos acentuado, indicando mais uma vez a influência desse modo de flambagem.

A Figura 24 compila as imagens de deslocamentos na alma obtidas através da análise não linear dos modelos variando a altura dos furos de ES-100X1,2-HF0,1 até ES-100X1,2-HF2,0. Na mudança do modelo ES-100X1,2-HF0,1 para ES-100X1,2-HF0,2 nota-se a redução de cinco para quatro meias ondas.

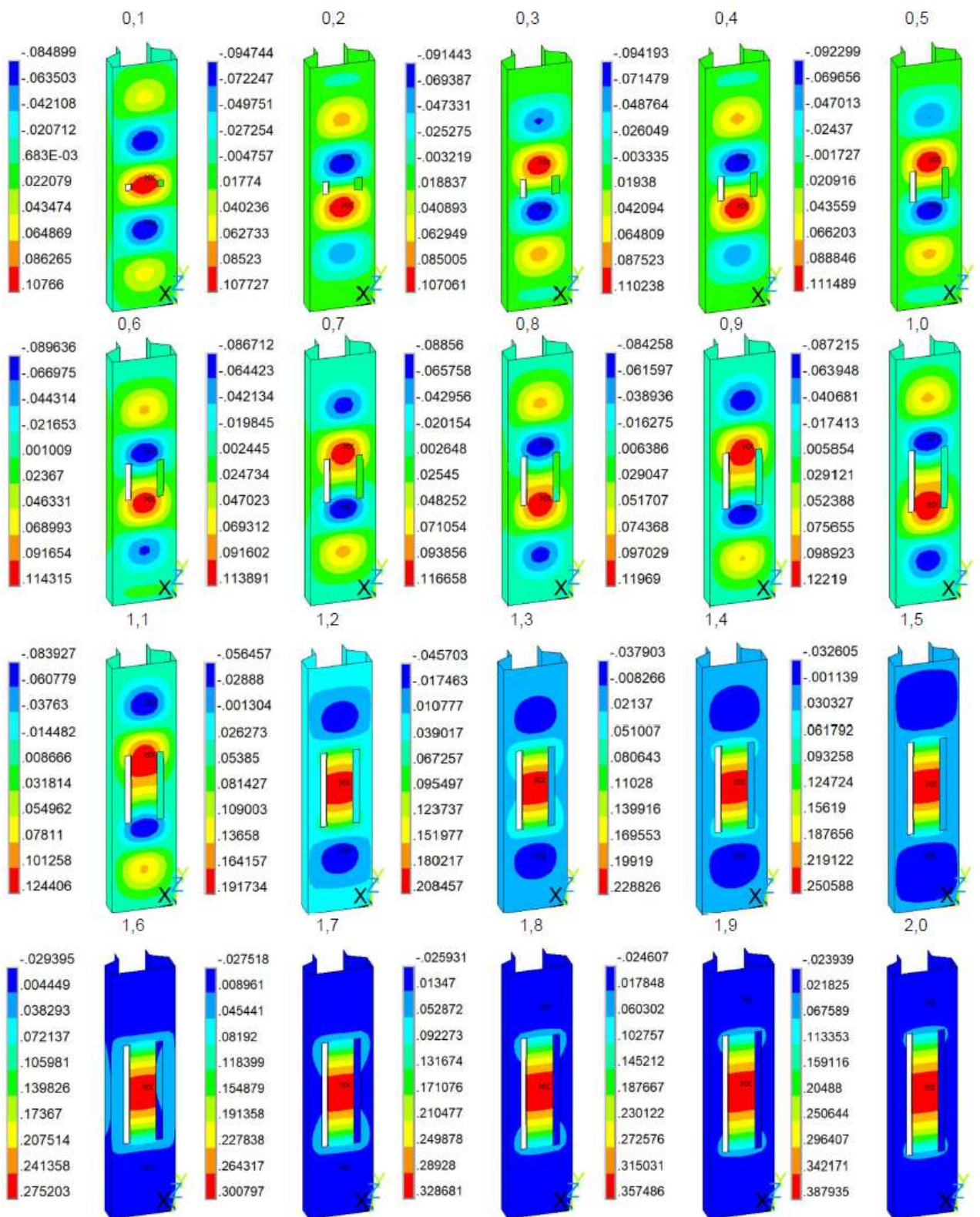


Figura 24: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm). Seções numeradas da esquerda para a direita e de cima para baixo, desde ES-100X1,2-HF0,1 até ES-100X1,2-HF2,0.

Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).

4.3.3 Perfil perfurado com enrijecedor duplo

Analisando o perfil perfurado com enrijecedor duplo, a Figura 22 mostra que a força axial de compressão resistente associada à flambagem local é superior aos perfis com furo não enrijecido e com enrijecedor simples durante todo o intervalo analisado. Porém, em nenhum momento foi superior ao protótipo sem perfurações.

De forma similar aos outros dois modelos, o perfil com enrijecedor duplo apresentou tendência de queda da força resistente à medida em que se eleva a relação h_f/b_w . O comportamento gráfico foi semelhante ao apresentado pelo protótipo com enrijecedor simples.

No trecho com predominância da flambagem local, ou seja, h_f/b_w menor que 1,3, observa-se constante decréscimo da resistência. A partir desse ponto, com a predominância da flambagem entre furos, esse decréscimo é menos acentuado, indicando mais uma vez a influência desse modo de flambagem.

A Figura 25 compila as imagens de deslocamento na alma obtidas através da análise não linear dos modelos variando a altura dos furos ED-100X1,2-HF0,1 até ED-100X1,2-HF2,0. Na mudança do modelo ED-100X1,2-HF0,1 para ED-100X1,2-HF0,2 observa-se a redução de cinco para quatro meias ondas.

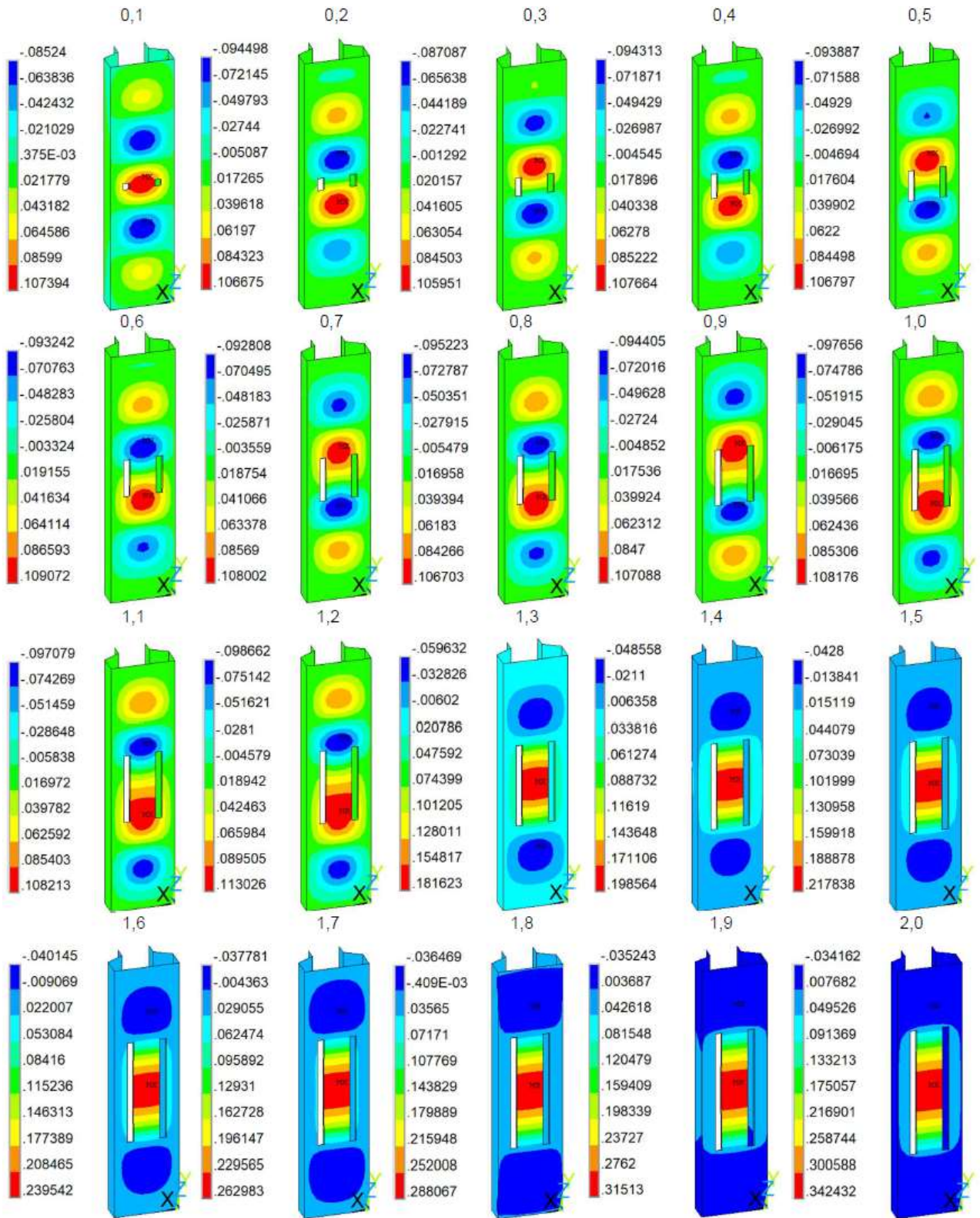


Figura 25: Componente do deslocamento ortogonal à alma (mm). Seções numeradas da esquerda para a direita e de cima para baixo, desde ED-100X1,2-HF0,1 até ED-100X1,2-HF2,0.

Fonte: análise feita pelo autor no ANSYS (2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os mecanismos de produção e a vasta possibilidade de uso dos perfis formados a frio têm feito com que eles ganhem cada vez mais mercado. Geralmente, a sua utilização requer que as peças sejam perfuradas para a montagem dos elementos.

Entretanto, as perfurações na seção reduzem sua área líquida e provocam diminuição da resistência dos perfis (FREITAS, SOUZA e FREITAS, 2010). Mesmo assim, alguns métodos de análise numérica e os procedimentos normativos necessitam de novos estudos para considerar de forma mais efetiva a existência de perfurações em perfis formados a frio.

Em uma tentativa de amenizar o impacto que as perfurações causam nos perfis, Chen et al. (2019) estudaram uma proposta de inserção de enrijecedores de borda em furos circulares. Em seguida, Chen et al. (2020b) e Chen et al. (2020a) apontaram que estes enrijecedores de borda podem tornar a resistência dos perfis perfurados superior até mesmo à de perfis sem furos. Então, diagnosticaram a necessidade de novas equações para dimensionamento destes elementos e trabalharam para propor alternativas, pois a influência das perfurações e dos enrijecedores de borda nos perfis formados a frio ainda demanda novos estudos.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o impacto dos enrijecedores de borda simples e duplo na flambagem entre furos em perfis formados a frio do tipo rack. Para isso foram feitas análises numéricas em pilares submetidos à compressão centrada variando a altura das perfurações e a quantidade de enrijecedores de borda.

O modelo foi definido em continuidade aos trabalhos realizados por Souza (2013) e Faria (2016) buscando analisar separadamente a transição entre a flambagem local para flambagem entre furos. Foram utilizados quatro grupos de pilares curtos: sem furo, com furo não enrijecido, furo com enrijecedor simples e duplo. As medidas da seção transversal e o posicionamento dos furos foram fixos. Variou-se a altura das perfurações (de $0,1b_w$ até $2,0b_w$) e a quantidade de enrijecedores.

Inicialmente a seção transversal e o comprimento do protótipo foram analisados pela Teoria Generalizada de Vigas via software GBTul (BEBIANO, SILVESTRE e

CAMOTIM, 2008). Em seguida, as análises numéricas foram feitas utilizando o Método dos Elementos Finitos via software ANSYS (2021).

Dentro do ANSYS, utilizou-se a linguagem de programação APDL para otimizar as simulações. A malha de elementos finitos utilizada foi quadrada e teve lado equivalente a $0,1b_w$. Foram feitas análises de carácter estrutural utilizando o elemento SHELL181. Impôs-se restrições ao deslocamento e rotação dos modelos. Para as análises não lineares, foi utilizado o diagrama “Tensão x Deformação multilinear” descrito por Faria (2016). O fator de imperfeição adotado foi metade da espessura das chapas e o carregamento aplicado igual ao escoamento da seção bruta do perfil.

As simulações lineares indicaram que a Carga Crítica de Flambagem Elástica dos perfis reduz com as perfurações. Além disso, o comportamento dos perfis com enrijecedor simples foi similar ao duplo; ambos obtiveram carga crítica superior ao modelo com furo não enrijecido. Os enrijecedores de borda (simples e duplo) melhoraram o desempenho dos perfis perfurados, sendo o duplo mais eficaz.

A Carga Crítica do modelo com furo não enrijecido foi inferior ao modelo sem furo. Já o perfil com enrijecedor simples obteve Carga Crítica superior ao sem furo até ES-100X1,2-HF1,3. Por fim, o protótipo com enrijecedor duplo apresentou Carga Crítica superior ao sem furo até ED-100X1,2-HF1,4.

Comparando os resultados com o modelo sem furos, as maiores reduções de Carga Crítica ocorreram para os casos com relação h_i/b_w 2,0 (200 mm). O perfil SE-100X1,2-HF2,0 sofreu redução de 89,72%, o ES-100X1,2-HF2,0 de 39,19% e o ED-100X1,2-HF2,0 de 34,97%.

Nas análises não lineares, as seções perfuradas obtiveram Carga Última inferior ao modelo sem furos. As maiores reduções nos modelos com enrijecedores de borda ocorreram em: ES-100X1,2-HF2,0 (redução de 7,24%) e ED-100X1,2-HF2,0 (redução de 6,69%). Já o modelo perfurado sem enrijecedor com a maior perda foi o SE-100X1,2-HF1,0 com redução de 8,61%. A Carga Última da seção com enrijecedor (simples ou duplo) foi superior à com furo não enrijecido. Ou seja, os enrijecedores de borda melhoraram o desempenho dos perfis. Sendo o duplo mais eficaz.

Aumentando a relação h_f/b_w ocorreu a transição da flambagem local para entre furos. No modelo com furo não enrijecido a mudança foi entre SE-100X1,2-HF0,4 e SE-100X1,2-HF0,5. No protótipo perfurado com enrijecedor simples a passagem aconteceu entre ES-100X1,2-HF1,1 e ES-100X1,2-HF1,2. Por fim, nos perfis perfurados com enrijecedor duplo a transição foi entre ED-100X1,2-HF1,2 e ED-100X1,2-HF1,3. Os enrijecedores simples e duplo retardaram o desenvolvimento da flambagem entre furos, sendo o duplo mais efetivo.

Através das escalas de cores dos deslocamentos na alma identificou-se que aumentando a relação h_f/b_w o deslocamento perpendicular à alma cresce e se concentra na placa entre furos. Confrontando esses deslocamentos com o gráfico das Cargas Críticas, constatou-se que nos intervalos onde ocorrem as transições da flambagem local para entre furos foram justamente os trechos que apontaram mudança nas tendências das curvas.

Pensando em trabalhos futuros, sugere-se:

- Avaliar o impacto dos enrijecedores de borda variando a posição dos furos horizontalmente na alma;
- Avaliar o impacto provocado pela interação entre os modos de falha para o modelo analisado;
- Avaliar o impacto da utilização de enrijecedores de borda simples com comprimento (c_e) igual à largura dos furos ($0,1b_w$);
- Desenvolver estudo experimental para validar o modelo numérico.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 6355: Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio - Padronização**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.], p. 36. 2012.

ABNT NBR 14762. **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Associação brasileira de Normas Técnicas. [S.l.], p. 87. 2010.

AISI S100-16. **North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members**. American Iron and Steel Institute. [S.l.], p. 505. 2016.

ALMEIDA, Saulo J. D. C. **Análise Numérica de Perfis de Aço Formados a Frio Comprimidos Considerando Imperfeições Geométricas Iniciais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP. São Carlos, p. 216. 2007.

ANSYS. **User's Manual for revision 14**. Swanson Analysis Systems Inc. Houston, PA, p. 1286. 2021.

AS/NZS 4600. **2018: Cold-Formed Steel Structures**. AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD. [S.l.], p. 197. 2018.

BATISTA, Eduardo D. M. Local-Global Buckling Interaction Procedures for the Design of Cold Formed Columns: Effective Width and Direct Method Integrated Approach. **Thin-Walled Structures**, 47, 2009. 1218-1231.

BEBIANO, Rui; SILVESTRE, Nuno; CAMOTIM, Dinar. **GBTUL - Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members**. International Conference on Cold-Formed Steel Structures. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 21.

CHEN, Boshan *et al.* Effects of edge-stiffened web openings on the behaviour of cold-formed steel. **Thin-Walled Structures**, 144, Julho 2019. 21.

CHEN, Boshan *et al.* Parametric study and simplified design equations for cold-formed steel channels with edge-stiffened holes under axial compression. **Journal of Constructional Steel Research**, p. 27, Maio 2020a.

CHEN, Boshan *et al.* Axial strength of back-to-back cold-formed steel channels with edge-stiffened holes, un-stiffened holes and plain webs. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 174, p. 22, Novembro 2020b.

EUROCODE. **Design of Steel Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**. The European Union Per Regulation. [S.l.], p. 93. 2005.

FARIA, Vinícius D. O. **Análise de Estabilidade de Perfis Formados a Frio com Perfurações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 109. 2016.

FREITAS, Arlene M. S.; SOUZA, Flávio T.; FREITAS, Marcílio S. R. Analysis and behavior of steel storage drive-in racks. **Thin-Walled Structures**, v. 48, p. 110-117, 2010.

GOMES, Diego M. **Análise numérica via elementos finitos de perfis formados a frio do tipo rack com perfurações de bordas enrijecidas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 66. 2022.

GOMES, Diego M.; SARMANHO, Arlene M. C.; SOUZA, Flávio T. Análise Numérica de Pilares Formados a Frio do Tipo Rack com Perfurações de Bordas Enrijecidas. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 19, p. 1-14, Maio 2023.

HANCOCK, Gregory J. Distortional Buckling of Steel Storage Rack Column. **Journal of Structural Engineering**, v. 111, n. 12, p. 2770-2783, Novembro 1984.

HANCOCK, Gregory J.; KWON, Young B.; BERNARD, E. S. Strength Design Curves for Thin-Walled Sections Undergoing Distortional Buckling. **Journal of Constructional Steel Research**, p. 169-186, Janeiro 1994.

HOWICK. Howick, 2022. Disponível em: <https://www.howickltd.com/products>. Acesso em: 04 Abril 2022.

JARDIM JR., Fausto. **Estudo da Viabilidade do Método da Resistência Direta em Perfis U Enrijecidos Formados a Frio com Perfurações**. Dissertação (Mestrado em Construção Metálica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 77. 2018.

KÁRMÁN, Theodor V.; SECHLER, Ernest E.; DONNELL, L.H. The Strength of Thin Plates in Compression. **The American Society of Mechanical Engineers**, New York, N. Y., v. 54, n. MP54-5, p. 9, 1932.

METAL CRUZADO. Metal Cruzado Engineering. **Metal Cruzado Engineering**, 2022. Disponível em: <https://www.metalcruzado.com.br/artigo-elementos-finitos>. Acesso em: 02 maio 2022.

MOEN, Cristopher D.; SCHAFER, B.W. **Direct Strenght Design of Cold-Formed Steel Members with Perforations**. Washington: American Iron and Stell Institute-Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Struuctural Members. Washington, DC, p. 565. 2009.

MOEN, Cristopher.; SCHAFER, B. W. Direct Strenght Method for Design of Cold-Formed Steel Columns With Holes. **Journal of Structural Engineering**, v. 137, p. 559-570, Maio 2011.

NEIVA, Luiz H. D. A. **Análise da influência da variação de perfurações no comportamento e capacidade de carga de perfis formados a frio de seção tipo rack**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 102. 2017.

NICOLAU, Igor A. N. D. **Análise Numérica do Comportamento de Perfis Formados a Frio com Perfurações Enrijecidas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 75. 2021.

NICOLAU, Igor A. N.; SARMANHO, Arlene M. C.; SOUZA, Flávio T. Análise Numérica de Perfis Formados a Frio do tipo U Enrijecido com Perfurações Enrijecidas Submetidos à Compressão. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 8, p. 1-10, 2023.

SALES, Amaury E. C. A. **Análise da aplicação do método da resistência direta a perfis formados a frio com perfurações submetidos à compressão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 83. 2017.

SCHAFER, B. W.; ÁDÁNY, S. Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. **Internacional Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures**, 18, Orlando, FL, Outubro 2006. 17.

SCHAFFER, Benjamin. 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, Janeiro 1998.

SILVA, Guilherme G. D. **Análise Teórico-Experimental de Colunas Curtas Perfuradas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 114. 2011.

SOUZA, Flávio T. D. **Análise Teórico-Experimental da Estabilidade de Colunas Perfuradas em Perfis de Aço Formados a Frio de Seção Tipo Rack**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 209. 2013.

WINTER, George. Strength of Thin Steel Compression Flanges, v. 112, 1947.

YU, Wei-Wen. **Cold-Formed Steel Design**. 5ª. ed. New York: Wiley, 2000.

APÊNDICE A

APDL SEM FUROS

finish

/clear

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

/NOPR

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

!PARAMETROS

/PREP7

REL=0.1 !RELAÇÃO ENTRE O COMPRIMENTO DO FURO E A LARGURA

ESP=1.2 !ESPESSURA

B=100 !LARGURA DA ALMA

LF1=32 !LARGURA DO FLANGE

LF2=20 !LARGURA DO FLANGE DE LIGAÇÃO

LEX=15 !PROJEÇÃO HORIZONTAL DO ENRIJECEDOR (LE*COS THETA)

LEY=26 !PROJEÇÃO VERTICAL DO ENRIJECEDOR (LE*SEN THETA)

LE=30 !LARGURA DO ENRIJECEDOR

DIF=0

DM=B/10

L=400

!ELEMENTO E MATERIAL

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,,200000

MPDATA,PRXY,1,,0.3

!GERACAO DAS AREAS

K,1,,, ,

K,2,B,,, ,

K,3,B,,LF1, ,

K,4,B-LEY,,LF1+LEX , ,

K,5,B-LEY-DIF/2,,LF1+LEX+LF2, ,

K,6,LEY+DIF/2,,LF1+LEX+LF2, ,

K,7,LEY,,LF1+LEX, ,

K,8,0,,LF1, ,

KGEN,2,1,8,1, ,L , , , 0

A,2,10,11,3

A,4,3,11,12

A,5,4,12,13

A,6,7,15,14

A,8,7,15,16

A,8,1,9,16

A,1,2,10,9

!GERACAO DA MALHA

AESIZE, ALL, B/10,

MSHKEY, 0

AMESH, ALL,,

EPLLOT

!ACOPLAMENTO DOS DESLOCAMENTOS NAS EXTREMIDADES

NSEL,S,LOC,Y,0

CP, NEXT, ALL, ALL

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,L

CP, NEXT, ALL, ALL

ALLSEL,ALL

!APLICAÇÃO DAS RESTRIÇÕES

NSEL,S, , , 1

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

ALLSEL,ALL

NSEL,S, , , 2

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

ALLSEL,ALL

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

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

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

ALLSEL,ALL

!APLICAÇÃO DAS CARGAS: CARGA APLICADA NO NÓ MESTRE

NSEL,S, , , 1

F,ALL,FY,1,

NSEL,S,,2

F,ALL,FY,-1,

ALLSEL,ALL

!SOLUCAO DO PROBLEMA DE FLAMBAGEM ELASTICA

/SOLU

ANTYPE,0

PSTRES,1

SOLVE

FINISH

/SOLU

ANTYPE,1

BUCOPT,LANB,10,0,0

MXPAND,10,0,0,0,0.001,

SOLVE

FINISH

EPLT

!ATUALIZACAO DA GEOMETRIA (INTRODUCAO DE IMPERFEIÇÕES)

/PREP7

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

!INTRODUÇÃO DO DIAGRAMA TENSAO-DEFORMAÇÃO MULTILINEAR

FY= 300 !CF30

FU= 490 !CF30

EY=0.7*FY/200000 !DEFORMAÇÃO NO ESCOAMENTO

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

A=(B+2*LF1+2*LE+2*LF2)*ESP

P= A*FY

/SOL

ANTYPE,0

ANTYPE,0

NLGEOM,1

NSUBST,10,0,

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,ALL

ARCLEN,1,1,0'

ARCTRM,U,4,0,UX

AUTOTS,-1.0

FDELE,ALL

NSEL,S, , , 1

F,ALL,FY,P,

NSEL,S, , , 2

F, ALL, FY,-P,

ALLSEL,ALL

SOLVE

APÊNDICE B

APDL COM FURO NÃO ENRIJECIDO

finish

/clear

/FILENAME, INTRO-IMP, 1

!NOME DO ARQUIVO DE SAÍDA

/NOPR

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

!PARAMETROS

/PREP7

REL=0.1

!RELAÇÃO ENTRE O COMPRIMENTO DO FURO E A LARGURA

ESP=1.2

!ESPESSURA

B=100

!LARGURA DA ALMA

LF1=32

!LARGURA DO FLANGE

LF2=20

!LARGURA DO FLANGE DE LIGAÇÃO

LEX=15

!PROJEÇÃO HORIZONTAL DO ENRIJECEDOR (LE*COS THETA)

LEY=26

!PROJEÇÃO VERTICAL DO ENRIJECEDOR (LE*SEN THETA)

LE=30 !LARGURA DO ENRIJECEDOR
 DIF=0
 DM=B/10
 HF=B*REL !ALTURA DO FURO
 DH1=0.2*B !DISTANCIA HORIZONTAL ENTRE A FACE EXTERNA DO FURO DA
 ESQUERDA E A EXTREMIDADE ESQUERDA
 DH2=DH1+0.1*B !DISTANCIA HORIZONTAL ENTRE A FACE INTERNA DO FURO DA DIREITA
 E A EXTREMIDADE DIREITA
 L=400 !COMPRIMENTO DO PROTOTIPO
 LF=0.1*B !LARGURA DO FURO

!ELEMENTO E MATERIAL

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, , , , , ,
 MPTMP, 1, , , , , ,
 MPDATA,EX,1,,200000
 MPDATA,PRXY,1,,0.3

!GERACAO DAS AREAS

K,1,,,,
 K,2,B,,,
 K,3,B,,LF1,
 K,4,B-LEY,,LF1+LEX ,
 K,5,B-LEY-DIF/2,,LF1+LEX+LF2,
 K,6,LEY+DIF/2,,LF1+LEX+LF2,
 K,7,LEY,,LF1+LEX,

K,8,0,,LF1,
 KGEN,2,1,8,1, ,L , , ,0
 A,2,10,11,3
 A,4,3,11,12
 A,5,4,12,13
 A,6,7,15,14
 A,8,7,15,16
 A,8,1,9,16
 A,1,2,10,9
 *DO, Y, B/2, L-B/2, DF
 BLC4, DH1, (L/2)-(HF/2), LF, HF
 BLC4,(B-(DH2)),(L/2)-(HF/2),LF, HF
 *ENDDO
 ASEL,S,LOC,Z,0
 ASBA,7,ALL
 ALLSEL, ALL
!GERACAO DA MALHA
 AESIZE, ALL, B/10,
 MSHKEY, 0
 AMESH, ALL,,
 EPLOT
!ACOPLAMENTO DOS DESLOCAMENTOS NAS EXTREMIDADES
 NSEL,S,LOC,Y,0
 CP, NEXT, ALL, ALL
 ALLSEL,ALL
 NSEL,S,LOC,Y,L
 CP, NEXT, ALL, ALL
 ALLSEL,ALL
!APLICACAO DAS RESTRIÇÕES


```

NSEL,S,,1
D,ALL,UX,0,,,,UZ,,,,
ALLSEL,ALL
NSEL,S,,2
D,ALL,UX,0,,,,UZ,,,,
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,(L/2)-DM/2,(L/2)+DM/2
NSEL,R,LOC,X,(B/2)-DM/2,(B/2)+DM/2
D,ALL,UY,0,,,,,,,
ALLSEL,ALL

```

!APLICAÇÃO DAS CARGAS: CARGA APLICADA NO NÓ MESTRE

```

NSEL,S,,1
F,ALL,FY,1,
NSEL,S,,2
F,ALL,FY,-1,
ALLSEL,ALL

```

!SOLUCAO DO PROBLEMA DE FLAMBAGEM ELASTICA

```

/SOLU
ANTYPE,0
PSTRES,1
SOLVE
FINISH
/SOLU
ANTYPE,1
BUCOPT,LANB,10,0,0
MXPAND,10,0,0,0,0.001,
SOLVE
FINISH
EPlot

```

!ATUALIZACAO DA GEOMETRIA (INTRODUCAO DE IMPERFEIÇÕES)

/PREP7

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

!INTRODUÇÃO DO DIAGRAMA TENSAO-DEFORMAÇÃO MULTILINEAR

FY= 300 !CF30

FU= 490 !CF30

EY=0.7*FY/200000 !DEFORMAÇÃO NO ESCOAMENTO

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

A=(B+2*LF1+2*LE+2*LF2)*ESP

P= A*FY

/SOL

ANTYPE,0

ANTYPE,0

NLGEOM,1

NSUBST,10,0,

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,ALL

ARCLEN,1,1,0'

ARCTRM,U,8,0,UX

AUTOTS,-1.0

FDELE,ALL

NSEL,S, , , 1

F,ALL,FY,P,

```
NSEL,S,,2  
F,ALL,FY,-P,  
ALLSEL,ALL  
SOLVE
```

APÊNDICE C

APDL COM FURO COM ENRIJECEDOR SIMPLES

finish

/clear

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

/NOPR

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

!PARAMETROS

/PREP7

REL=0.1 !RELAÇÃO ENTRE O COMPRIMENTO DO FURO E A LARGURA

ESP=1.2 !ESPESSURA

B=100 !LARGURA DA ALMA

LF1=32 !LARGURA DO FLANGE

LF2=20 !LARGURA DO FLANGE DE LIGAÇÃO

LEX=15 !PROJEÇÃO HORIZONTAL DO ENRIJECEDOR (LE*COS THETA)

LEY=26 !PROJEÇÃO VERTICAL DO ENRIJECEDOR (LE*SEN THETA)

LE=30 !LARGURA DO ENRIJECEDOR
 DIF=0
 DM=B/10
 HF=B*REL !ALTURA DO FURO
 DH1=0.2*B !DISTANCIA HORIZONTAL ENTRE A FACE EXTERNA DO FURO DA
 ESQUERDA E A EXTREMIDADE ESQUERDA
 DH2=DH1+0.1*B !DISTANCIA HORIZONTAL ENTRE A FACE INTERNA DO FURO DA DIREITA
 E A EXTREMIDADE DIREITA
 L=400 !COMPRIMENTO DO PROTOTIPO
 LF=0.1*B !LARGURA DO FURO

!ELEMENTO E MATERIAL

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, , , , , ,
 MPTMP, 1, , , , , ,
 MPDATA,EX,1,,200000
 MPDATA,PRXY,1,,0.3

!GERACAO DAS AREAS

K,1,,,,
 K,2,B,,,
 K,3,B,,LF1,
 K,4,B-LEY,,LF1+LEX ,
 K,5,B-LEY-DIF/2,,LF1+LEX+LF2,
 K,6,LEY+DIF/2,,LF1+LEX+LF2,
 K,7,LEY,,LF1+LEX,

K,8,0,,LF1,
KGEN,2,1,8,1, ,L , , ,0
A,2,10,11,3
A,4,3,11,12
A,5,4,12,13
A,6,7,15,14
A,8,7,15,16
A,8,1,9,16
A,1,2,10,9
*DO, Y, B/2, L-B/2, DF
BLC4, DH1, (L/2)-(HF/2), LF, HF
BLC4,(B-(DH2)),(L/2)-(HF/2),LF, HF
*ENDDO
ASEL,S,LOC,Z,0

ASBA,7,ALL
ALLSEL, ALL

!CRIAÇÃO DOS ENRIJECEDORES

KGEN,2,18, , , , ,B/20, ,0
KGEN,2,19, , , , ,B/20, ,0
KGEN,2,21, , , , ,B/20, ,0
KGEN,2,24, , , , ,B/20, ,0
A,18,19,26,25
A,21,24,28,27
AGLUE,ALL

!GERACAO DA MALHA

AESIZE, ALL, B/10,
MSHKEY, 0
AMESH, ALL,,
EPlot

!ACOPLAMENTO DOS DESLOCAMENTOS NAS EXTREMIDADES

NSEL,S,LOC,Y,0

CP, NEXT, ALL, ALL

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,L

CP, NEXT, ALL, ALL

ALLSEL,ALL

!APLICAÇÃO DAS RESTRIÇÕES

NSEL,S, , , 1

D, ALL, UX, 0, , , , UZ, , , , !RETIREI A ROTAÇÃO EM Y

ALLSEL,ALL

NSEL,S, , , 2 !

D, ALL, UX, 0, , , , UZ, , , , !RETIREI A ROTAÇÃO EM Y

ALLSEL,ALL

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

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

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

ALLSEL,ALL

!APLICAÇÃO DAS CARGAS: CARGA APLICADA NO NÓ MESTRE

NSEL,S, , , 1

F,ALL,FY,1,

NSEL,S, , , 2

F, ALL, FY,-1,

ALLSEL,ALL

!SOLUCAO DO PROBLEMA DE FLAMBAGEM ELASTICA

/SOLU

ANTYPE,0

PSTRES,1

SOLVE

```
FINISH  
/SOLU  
ANTYPE,1  
BUCOPT,LANB,10,0,0  
MXPAND,10,0,0,0,0.001,  
SOLVE  
FINISH  
EPLOT  
!ATUALIZACAO DA GEOMETRIA (INTRODUCAO DE IMPERFEIÇÕES)
```

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

!INTRODUÇÃO DO DIAGRAMA TENSAO-DEFORMAÇÃO MULTILINEAR

```
FY= 300                !CF30  
FU= 490                !CF30  
EY=0.7*FY/200000      !DEFORMAÇÃO NO ESCOAMENTO  
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

```
A=(B+2*LF1+2*LE+2*LF2)*ESP  
P= A*FY  
/SOL  
ANTYPE,0  
ANTYPE,0  
NLGEOM,1  
NSUBST,10,0,
```



```
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
ARCLEN,1,1,0'
ARCTRM,U,8,0,UX
AUTOTS,-1.0
FDELE,ALL
NSEL,S,,1
F,ALL,FY,P,
NSEL,S,,2
F,ALL,FY,-P,
ALLSEL,ALL
SOLVE
```

APÊNDICE D

APDL COM FURO COM ENRIJECEDOR DUPLO

finish

/clear

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

/NOPR

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

!PARAMETROS

/PREP7

REL=0.1 !RELAÇÃO ENTRE O COMPRIMENTO DO FURO E A LARGURA

ESP=1.2 !ESPESSURA DA CHAPA

B=100 !LARGURA DA ALMA

LF1=32 !LARGURA DO FLANGE

LF2=20 !LARGURA DO FLANGE DE LIGAÇÃO

LEX=15 !PROJEÇÃO HORIZONTAL DO ENRIJECEDOR

LEY=26 !PROJEÇÃO VERTICAL DO ENRIJECEDOR

$LE=30$!LARGURA DO ENRIJECEDOR
 $DIF=0$
 $DM=B/10$
 $HF=B*REL$!ALTURA DO FURO
 $DH1=0.2*B$!DISTANCIA HORIZONTAL ENTRE A FACE EXTERNA DO FURO DA
 ESQUERDA E A EXTREMIDADE
 $DH2=DH1+0.1*B$!DISTANCIA HORIZONTAL ENTRE A FACE INTERNA DO FURO DA DIREITA
 E A EXTREMIDADE DIREITA
 $L=400$!COMPRIMENTO DO PROTOTIPO
 $LF=0.1*B$!LARGURA DO FURO

!ELEMENTO E MATERIAL

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, , , , , ,
 MPTMP, 1, , , , , ,
 MPDATA,EX,1,,200000
 MPDATA,PRXY,1,,0.3

!GERACAO DAS AREAS

K,1,,,,
 K,2,B,,,
 K,3,B,,LF1,
 K,4,B-LE,Y,,LF1+LEX ,
 K,5,B-LE,Y-DIF/2,,LF1+LEX+LF2,
 K,6,LE,Y+DIF/2,,LF1+LEX+LF2,
 K,7,LE,Y,,LF1+LEX,

K,8,0,,LF1,
KGEN,2,1,8,1, ,L , , ,0
A,2,10,11,3
A,4,3,11,12
A,5,4,12,13
A,6,7,15,14
A,8,7,15,16
A,8,1,9,16
A,1,2,10,9
*DO, Y, B/2, L-B/2, DF
BLC4, DH1, (L/2)-(HF/2), LF, HF
BLC4,(B-(DH2)),(L/2)-(HF/2),LF, HF
*ENDDO
ASEL,S,LOC,Z,0
ASBA,7,ALL
ALLSEL, ALL

!CRIAÇÃO DOS ENRIJECEDORES

KGEN,2,17, , , , ,B/20, ,0
KGEN,2,18, , , , ,B/20, ,0
KGEN,2,19, , , , ,B/20, ,0
KGEN,2,20, , , , ,B/20, ,0
KGEN,2,21, , , , ,B/20, ,0
KGEN,2,22, , , , ,B/20, ,0
KGEN,2,23, , , , ,B/20, ,0
KGEN,2,24, , , , ,B/20, ,0
A,21,24,32,29
A,22,23,31,30
A,18,19,27,26
A,17,20,28,25

AGLUE,ALL

!GERACAO DA MALHA

AESIZE, ALL, B/10,

MSHKEY, 0

AMESH, ALL,,

EPLLOT

!ACOPLAMENTO DOS DESLOCAMENTOS NAS EXTREMIDADES

NSEL,S,LOC,Y,0

CP, NEXT, ALL, ALL

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,L

CP, NEXT, ALL, ALL

ALLSEL,ALL

!APLICAÇÃO DAS RESTRIÇÕES

NSEL,S, , , 1

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

ALLSEL,ALL

NSEL,S, , , 2

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

ALLSEL,ALL

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

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

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

ALLSEL,ALL

!APLICAÇÃO DAS CARGAS: CARGA APLICADA NO NÓ MESTRE

NSEL,S, , , 1

F,ALL,FY,1,

NSEL,S, , , 2

F, ALL, FY,-1,

ALLSEL,ALL

!SOLUCAO DO PROBLEMA DE FLAMBAGEM ELASTICA

/SOLU

ANTYPE,0

PSTRES,1

SOLVE

FINISH

/SOLU

ANTYPE,1

BUCOPT,LANB,10,0,0

MXPAND,10,0,0,0,0.001,

SOLVE

FINISH

EPLOT

!ATUALIZACAO DA GEOMETRIA (INTRODUCAO DE IMPERFEIÇÕES)

/PREP7

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

!INTRODUÇÃO DO DIAGRAMA TENSAO-DEFORMAÇÃO MULTILINEAR

FY= 300 !CF30

FU= 490 !CF30

EY=0.7*FY/200000 !DEFORMAÇÃO NO ESCOAMENTO

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

A=(B+2*LF1+2*LE+2*LF2)*ESP

```
P= A*FY
/SOL
ANTYPE,0
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,10,0,
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
ARCLen,1,1,0'
ARCTRM,U,8,0,UX
AUTOTS,-1.0
FDELE,ALL
NSEL,S,,1
F,ALL,FY,P,
NSEL,S,,2
F,ALL,FY,-P,
ALLSEL,ALL
SOLVE
```