

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO PEDRO DE LIMA MIYAZAKI

**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE AS FLAMBAGENS
DISTRACIONAL-GLOBAL EM PERFIS FORMADOS A FRIO
PERFURADOS DE SEÇÃO RACK**

MARINGÁ

2022

JOÃO PEDRO DE LIMA MIYAZAKI

**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE AS FLAMBAGENS
DISTRORCIONAL-GLOBAL EM PERFIS FORMADOS A FRIO
PERFURADOS DE SEÇÃO RACK**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins

MARINGÁ

2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

M685a

Miyazaki, João Pedro de Lima

Avaliação da interação entre as flambagens distorcional-global em perfis formados a frio perfurados de seção rack / João Pedro de Lima Miyazaki. -- Maringá, PR, 2022.
269 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

1. Perfis formados a frio. 2. Método da resistência direta. 3. Análise não linear. 4. Seção rack. I. Martins, Carlos Humberto, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 23.ed. 624.1821

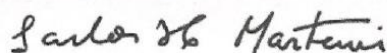
Ademir Henrique dos Santos - CRB-9/1065

JOÃO PEDRO DE LIMA MIYAZAKI

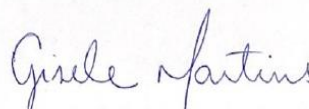
**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE AS FLAMBAGENS
DISTRORCIONAL-GLOBAL EM PERFIS FORMADOS A FRIO
PERFURADOS DE SEÇÃO RACK**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 22/02/2022, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

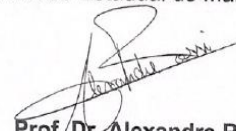
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Carlos Humberto Martins
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Orientador



Profa. Dra. Gisele Cristina Antunes Martins
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá



Prof. Dr. Alexandre Rossi
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

A minha família e amigos, por todo o apoio incondicional que me deram durante o período da dissertação.

Ao meu orientador e Amigo, Professor Doutor Carlos Humberto Martins, por todo empenho e dedicação para que a pesquisa fosse concluída da melhor maneira.

Aos funcionários e professores do PCV, por toda ajuda e conhecimento passado durante o período do mestrado.

Aos colegas de turma das aulas do PCV, grato pelo companheirismo e todo apoio durante as aulas.

À CAPES, pela bolsa de mestrado concedida.

RESUMO

Uma das maiores utilizações dos perfis formados a frio (PFFs) são em estruturas dos sistemas de estocagem. As colunas desses sistemas são geralmente formadas por perfis de seção rack e têm como principal característica a presença de furos uniformemente distribuídos por todo seu comprimento. A ruptura desses perfis é governada pela ação das flambagens local, distorcional e global, sendo que essas flambagens podem agir isoladamente ou em conjunto, resultando no fenômeno de interação entre as flambagens, esta pode ocorrer na forma de interação local-global (L-G), local-distorcional (L-D), distorcional-global (D-G) e local-distorcional-global (L-D-G). A interação com a flambagem distorcional ainda não é inteiramente conhecida, devido a isso, diversas pesquisas vêm sendo conduzidas para buscar o entendimento dessas estruturas, principalmente em perfis sem furos. Além disso, a presença dos furos nas colunas dos sistemas de estocagem dificulta o dimensionamento desses perfis, e devido a isso, as principais normas de sistemas de estocagem denominadas EN 15512:2019, RMI (2012) e AS/NSZ 4084:2012 determinam que são necessários a realização de ensaios experimentais para dimensionamento desses perfis. Em virtude deste problema, diversos estudos vêm sendo realizados para simular o comportamento dessas estruturas por meio de análises não lineares utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), com principal objetivo de aproximar o comportamento numérico do experimental. Além das simulações numéricas, os autores vêm tentando enquadrar o dimensionamento dessas estruturas em procedimentos analíticos, principalmente por meio do Método da Resistência Direta (MRD). O MRD vem sendo muito utilizado para o dimensionamento de perfis sem furos sujeitos à compressão, recentemente na norma americana de PFFs denominada AISI S100:2016, o MRD foi expandido para o caso de perfis com furos pontuais, no entanto, esse método ainda não foi validado para o caso de perfis rack perfurados de sistemas de estocagem. Logo, este trabalho tem como objetivo avaliar a interação entre as flambagens do tipo D-G em colunas de perfis rack perfurados de sistemas de estocagens sujeitos à compressão centrada. O estudo será feito a partir de simulações numéricas por meio do MEF utilizando o software comercial ABAQUS 6.14, onde serão realizadas análises lineares e não lineares de flambagem. A seleção de colunas com interação será feita a partir das curvas de flambagem linear elástica obtidas via ABAQUS, onde foram selecionadas 235 colunas com interação D-G. Um modelo numérico foi proposto no ABAQUS 6.14 para realização das análises numéricas, o qual foi validado a partir de dois ensaios experimentais realizados em perfis rack perfurados presentes na literatura. A avaliação da interação D-G foi feita na análise não linear, onde as configurações deformadas dos modos de flambagem distorcional e global obtidas na análise linear foram combinadas e utilizadas como imperfeição geométrica na análise não linear. Para cada coluna selecionada foram realizadas 13 análises não lineares combinando os dois modos de flambagem e variando os valores de magnitude dessas imperfeições, com um total de 3055 análises não lineares realizadas, e em cada análise determinando sua carga de ruptura, curvas de equilíbrio e configurações deformadas. As análises não lineares foram realizadas nas condições apoiada, engastada e apoiada com torção restringida. Por fim, o Método da Resistência Direta foi utilizado e seus resultados foram comparados com os obtidos pela análise não linear. O MRD apresentou grande variabilidade nos resultados, sendo que para as condições engastada e apoiada com torção restringida, os melhores resultados foram obtidos.

Palavras-chave: Perfil Formado a Frio, Seção Rack, Análise não linear, Método da Resistência Direta.

ABSTRACT

One of the biggest uses of cold formed steel is in the structures of storage systems. The columns of these systems are generally formed by rack section profiles and their main characteristic is the presence of holes evenly distributed throughout their length. The rupture of these profiles is governed by the action of local, distortional and global buckles, and these buckles can act alone or together, resulting in the phenomenon of interaction between the buckles, which can occur in the form of local-global interaction (LG), local-distortional (LD), distortional-global (DG) and local-distortional-global (LDG). The interaction with distortional buckling is not entirely known, due to this, several researches have been conducted to seek an understanding of these structures, mainly in profiles without holes. In addition, the presence of holes in the columns of storage systems makes it difficult to dimension these profiles, and because of this, the main standards of storage systems called EN 15512:2019, RMI (2012) and AS/NSZ 4084:2012 determine that it is necessary to carry out experimental tests for dimensioning these profiles. Due to this problem, several studies have been carried out to simulate the behavior of these structures through nonlinear analyzes using the Finite Element Method (FEM), with the main objective of approaching the numerical behavior of the experimental one. In addition to numerical simulations, the authors have been trying to frame the design of these structures in analytical procedures, mainly through the Direct Strength Method (DSM). The DSM has been widely used for the profiles without holes subject to compression, recently in the American cold formed steel standard called AISI S100:2016, the DSM was expanded to the case of profiles with punctual holes, however, this method has not yet been validated for the case of perforated rack profiles of storage systems. Therefore, this work aims to evaluate the interaction between type D-G buckling in columns of perforated rack profiles of storage systems subjected to centric compression. The study will be done from numerical simulations using the MEF using the commercial software ABAQUS 6.14, where linear and non-linear buckling analysis will be performed. The selection of columns with interaction will be made from the linear elastic buckling curves obtained via ABAQUS, where 235 columns with D-G interaction were selected. A numerical model was proposed in ABAQUS 6.14 to perform the numerical analysis, which was validated from two experimental tests performed on perforated rack profiles present in the literature. The evaluation of the D-G interaction was made in the nonlinear analysis, where the deformed configurations of the distortional and global buckling modes obtained in the linear analysis were combined and used as geometric imperfection in the nonlinear analysis. For each selected column, 13 non-linear analyzes were performed, combining the two buckling modes and varying the magnitude values of these imperfection, with a total of 3055 non linear analyses performed, and in each analysis determining their failure load, equilibrium curves and deformed configurations. Non-linear analyzes were performed under supported, crimped and supported with restrained torsion conditions. Finally, the Direct Strength Method was used and its results were compared with those obtained by non-linear analysis. The DSM showed high variability in the results, and for the crimped and supported conditions with restricted torsion, where the best results were obtained.

Key words: Cold formed steel, Rack section, Non-Linear Analysis, Direct Strength Design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo de utilização de PFFs.....	27
Figura 1.2 – a) Perfil U; b) Perfil Hat; c) Perfil Zed; d) Perfil Rack; e) Perfil WSLC; f) Perfil WFSLC.....	28
Figura 1.3 – a) Perfil Rack; b) Flambagem local; c) Flambagem distorcional; d) Flexo-torção; e) Flexão.	28
Figura 1.4 – Curva padrão de análise de flambagem linear elástica.....	29
Figura 1.5 – Interação entre as flambagens do tipo L-D.....	30
Figura 1.6 – a) Perfil Rack; b) Ligação entre coluna de perfil rack perfurado e viga.....	31
Figura 2.1 – Evidências experimentais da interação L-D.....	37
Figura 2.2 – a) Curva de equilíbrio elástico de interação do tipo TI, b) Curva de equilíbrio elástico de interação do tipo SDI.....	38
Figura 2.3 – a) Curva de flambagem elástica da seção C; b) Configuração deformada para comprimento com interação L-D.....	39
Figura 2.4 – a) Representação das imperfeições geométricas para interação L-D; b) Modos de flambagem para ângulos de 0°, 90°, 180° e 270°.....	40
Figura 2.5 – Curvas de equilíbrio elástico não linear; a) P/Pcr por deformação nas mesas; b) P/Pcr por deformação na alma.....	41
Figura 2.6 – a) Curva de equilíbrio de Pcr x Deformações na mesa; b) Evolução da deformação plástica do elemento para $f_y/f_{cr}=2$	42
Figura 2.7 – Comparação resultados numéricos e experimentais; a) Carga x Deslocamento nas almas; b) Carga x deslocamento axial; c) Configurações deformadas.....	43
Figura 2.8 – a) Curva de flambagem elástica seção C; b) Configuração deformada no comprimento da interação.....	45
Figura 2.9 – a) Representação das imperfeições geométricas para interação D-G b) Modos de flambagem para ângulos de 0°, 90°, 180° e 270.....	46
Figura 2.10 – Curva de equilíbrio elástico não linear; a) P/Pcr por deformação na alma; b) P/Pcr por deformação devido a rotação; c) Configurações deformadas.....	47
Figura 2.11 – Curva de equilíbrio elástico não linear de P/Pcr por deformação nas mesas.....	48
Figura 2.12 – a) Curva de comportamento elasto-plástico nas mesas; b) Deformação plástica para diversos f_y/f_{cr}	49
Figura 2.13 – a) Curva de equilíbrio elástico de interação do tipo TI, b) Curva de equilíbrio para interação com flambagem secundária.....	50

Figura 2.14 – a) Representação das imperfeições geométricas para interação L-D-G; b) Deformadas dos modos de flambagem puros	51
Figura 2.15 – a) Curvas de flambagem elástica para seleção de colunas com interação L-G-D; b) Modos de flambagem local, distorcional e global.....	52
Figura 2.16 – Comparação resultados experimentais e numéricos; a) Curvas de carga x deformação; b) Configurações deformadas.....	53
Figura 2.17 – Evidências experimentais da interação L-G-D.....	54
Figura 2.18 – Comparação resultados numéricos e experimentais; a1) Carga x deformação na alma; a2) Carga x deformação axial; c) Configurações deformadas	55
Figura 3.1 – Composição dos ensaios de Koen (2008).....	57
Figura 3.2 – Tipos de seções rack ensaiadas na Universidade Politécnica da Catalunha.....	58
Figura 3.3 – Curvas de flambagem elástica para as seções engastadas via MEF.....	59
Figura 3.4 – Curvas de carga por rotação para as seções apoiadas.....	59
Figura 3.5 – Colunas com interação entre os modos de flambagens D-G.....	60
Figura 3.6 – a) Posicionamento dos furos; b) Tipo de seção rack ensaiada.....	62
Figura 3.7 – Seções ensaiadas na Universidade de Sidney; a) Seção sem mesa adicional; b) Seção com mesa adicional.....	64
Figura 3.8 – Evolução das deformações; a) Interação L-D b) Carga de ruptura; c) Modo de falha global.....	64
Figura 3.9 – Exemplo de utilização de PFF Seção rack e posicionamento dos furos utilizado nos ensaios de Souza (2013).....	65
Figura 3.10 – Comparação entre as flambagens elásticas via ANSYS e GBTUL.....	66
Figura 3.11 – Curva carga x deslocamentos na alma em uma coluna curta com furos de 60%.....	66
Figura 3.12 –Curva carga x deslocamentos na mesa em uma coluna curta com furos de 60%.....	67
Figura 3.13 – Comparação comportamento experimental x numérico de coluna média com furos de 80%.....	67
Figura 3.14 – a) Seções Ensaaiadas; b) Vista das colunas.....	68
Figura 3.15 – Curvas de carga por deslocamento; a) Flambagem distorcional; b) Interação distorcional e flexão; c) Flexo-torção; d) Flexo torção.....	69
Figura 3.16 – Evidências experimentais da interação D-G nas colunas de Zhao, Ren e Qin (2017)	70
Figura 3.17 – Comparações experimentos x simulações numéricas; a) Curvas de equilíbrio; b) modos de falha	71
Figura 3.18 – Seções utilizadas e disposição dos furos dos perfis de Elias et al. (2018).....	72
Figura 3.19 – Resultados dos ensaios experimentais de Elias et al. (2018).....	73

Figura 3.20 – Seção utilizada por Baldassino et al. (2019).....	74
Figura 4.1 – Parâmetros das Equações 4.58, 4.59 e 4.60.....	91
Figura 5.1 – Modelagem numérica Seção Rack perfurada.....	95
Figura 5.2 – Aplicação da malha na seção de seção de Faria (2016).....	96
Figura 5.3 – Diagrama tensão por deformação para comportamento elasto-plástico implementado no ABAQUS.....	97
Figura 5.4 – Simulação da condição apoiada com torção restringida no ABAQUS.....	98
Figura 5.5 – Simulação da condição apoiada no ABAQUS.....	99
Figura 5.6 – Simulação da condição engastada no ABAQUS.....	99
Figura 5.7 –1° modo de flambagem obtido no ABAQUS.....	101
Figura 5.8 –Comparação entre estrutura real e ideal.....	102
Figura 5.9 –Trajetórias de equilíbrio com pontos limites: a) Snap-through; b) Snap-back;.....	103
Figura 5.10 – Comparação entre as curvas de flambagem obtidas pelo GBTUL e CUFSM.....	104
Figura 5.11 –a) Decomposição modal das curvas de flambagem; b) Participação modal de cada flambagem;.....	105
Figura 5.12 – Seção de Souza (2013) no CUFSM com espessura reduzida nos furos.....	106
Figura 5.13 –Modos de flambagem induzidos para imperfeição da CC 80%.....	109
Figura 5.14 – Curva de equilíbrio da CC 80% de Souza (2013).....	109
Figura 5.15 –Modo de flambagem induzido para imperfeição da CC 80%.....	111
Figura 5.16 – Curva de equilíbrio da CC 80% de Faria (2016).....	111
Figura 6.1 – Seções Rack	114
Figura 6.2 – Furos Seção S1 e S2.....	115
Figura 6.3 – Furos seção S3.....	116
Figura 6.4 – Esquema análise linear.....	116
Figura 6.5 – Esquema análise não linear.....	117
Figura 7.1 – Curva de flambagem seção S1 sem furos, condição apoiada, $t=2$	119
Figura 7.2 – Curva de flambagem seção S1 sem furos, condição apoiada para todas as espessuras	120
Figura 7.3 – Curva de flambagem seção S1 com furos, condição apoiada, $t=2$	121
Figura 7.4 – Modos de flambagem global e distorcional – Seção S1, apoiada	122
Figura 7.5 – Curva de flambagem seção S1 com furos, condição apoiada para todas as espessuras	122
Figura 7.6 – Curva de flambagem seção S1 sem furos, condição engastada, $t=2$	124
Figura 7.7 – Curva de flambagem seção S1 sem furos, condição engastada para todas as espessuras	125
Figura 7.8 – Curva de flambagem seção S1 com furos, condição engastada, $t=2$	126
Figura 7.9 – Modos de flambagem global e distorcional – Seção S1, engastada	127

Figura 7.10 – Curva de flambagem seção S1 com furos, condição engastada para todas as espessuras.....	128
Figura 7.11 – Curva de flambagem seção S1 sem furos, condição apoiada com torção restringida para todas as espessuras.....	129
Figura 7.12 – Curva de flambagem seção S1 com furos, condição apoiada com torção restringida para todas as espessuras	130
Figura 7.13 – Modos de flambagem global e distorcional – seção S1 apoiada com torção restringida.....	131
Figura 7.14 – Curva de flambagem seção S2 sem furos, condição apoiada, $t=2$	133
Figura 7.15 – Curva de flambagem seção S2 sem furos, condição apoiada para todas as espessuras.....	134
Figura 7.16 – Curva de flambagem seção S2 com furos, condição apoiada, $t=2$	135
Figura 7.17 – Modos de flambagem global e distorcional – Seção S2, apoiada	136
Figura 7.18 – Curva de flambagem seção S2 com furos, condição apoiada para todas as espessuras.....	136
Figura 7.19 – Curva de flambagem seção S2 sem furos, condição engastada, $t=2$	138
Figura 7.20 – Curva de flambagem seção S2 sem furos, condição engastada para todas as espessuras	139
Figura 7.21 – Curva de flambagem seção S2 com furos, condição engastada, $t=2$	140
Figura 7.22 – Modos de flambagem global e distorcional – Seção S2 engastada	141
Figura 7.23 – Curva de flambagem seção S2 com furos, condição engastada para todas as espessuras.....	141
Figura 7.24 – Curva de flambagem seção S2 sem furos, condição apoiada com torção restringida para todas as espessuras	143
Figura 7.25 – Curva de flambagem seção S2 com furos, condição apoiada com torção restringida para todas as espessuras.....	143
Figura 7.26 – Modos de flambagem global e distorcional – Seção S2 apoiada com torção restringida.....	144
Figura 7.27 – Curva de flambagem seção S3 sem furos, condição apoiada, $t=2$	146
Figura 7.28 – Curva de flambagem seção S3 sem furos, condição apoiada para todas as espessuras.....	147
Figura 7.29 – Curva de flambagem seção S3 com furos, condição apoiada, $t=2$	148
Figura 7.30 – Curva de flambagem seção S3 apoiada, furos 30%, todas as espessuras.....	149
Figura 7.31 – Modos de flambagem global e distorcional – seção S3 apoiada.....	149
Figura 7.32 – Curva de flambagem seção S3 sem furos, condição engastada, $t=2$	151

Figura 7.33 – Curva de flambagem seção S3 sem furos, condição engastada para todas as espessuras	152
Figura 7.34 – Curva de flambagem seção S3 com furos, condição engastada, $t=2$	153
Figura 7.35 – Curva de flambagem seção S3 engastada, furos 30%, todas as espessuras.....	154
Figura 7.36 – Modos de flambagem global e distorcional – seção S3 engastada.....	154
Figura 7.37 – Curva de flambagem seção S3 sem furos, condição apoiada com torção restringida para todas as espessuras	156
Figura 7.38 – Curva de flambagem seção S3 com furos, condição apoiada com torção restringida, $t=2$	157
Figura 7.39 – Modos de flambagem global e distorcional – Seção S3 apoiada com torção restringida.....	158
Figura 7.40 – Curva de flambagem seção S4 sem furos, condição apoiada, $t=2$	160
Figura 7.41 – Curva de flambagem seção S4 sem furos, condição apoiada para todas as espessuras.....	161
Figura 7.42 – Curva de flambagem seção S4 com furos, condição apoiada, $t=2$	162
Figura 7.43 – Curva de flambagem seção S4 apoiada, furos 30%, todas as espessuras.....	162
Figura 7.44 – Modos de flambagem global e distorcional – seção S4 apoiada.....	163
Figura 7.45 – Curva de flambagem seção S4 sem furos, condição engastada, $t=2$	165
Figura 7.46 – Curva de flambagem seção S4 sem furos, condição engastada para todas as espessuras	166
Figura 7.47 – Curva de flambagem seção S4 com furos, condição engastada, $t=2$	166
Figura 7.48 – Curva de flambagem seção S4 engastada, furos 30%, todas as espessuras.....	167
Figura 7.49 – Modos de flambagem global e distorcional – seção S4 engastada.....	167
Figura 7.50 – Curva de flambagem seção S4 sem furos, condição apoiada com torção restringida para todas as espessuras	169
Figura 7.51 – Curva de flambagem seção S4 com furos, condição apoiada com torção restringida, $t=2$	169
Figura 7.52 – Modos de flambagem global e distorcional – Seção S4 apoiada com torção restringida.....	170
Figura 8.1 – Metodologia para inserção das imperfeições geométrica com interação D-G.....	173
Figura 8.2 – Pontos para determinação das curvas de equilíbrio para as seções S1 e S2.....	175
Figura 8.3 – Curvas de equilíbrio, Seção S1, condição apoiada, $L=1800\text{mm}$, $t=2\text{mm}$, ponto V1....	176
Figura 8.4 – Curvas de equilíbrio, Seção S1, condição apoiada, $L=1800\text{mm}$, $t=2\text{mm}$, ponto V2.....	177
Figura 8.5 – Configurações deformadas, Seção S1, condição apoiada, $L=1800\text{mm}$, $t=2$	178
Figura 8.6 – Curvas de equilíbrio, Seção S1, condição engastada, $L=3000\text{mm}$, $t=2,5\text{mm}$, ponto V1.....	180

Figura 8.7 – Curvas de equilíbrio, Seção S1, condição engastada, L=3000mm, t=2,5mm, ponto V2.....	181
Figura 8.8 – Configurações deformadas, Seção S1, condição engastada, L=3000mm, t=2,5.....	182
Figura 8.9 – Curvas de equilíbrio, Seção S1, condição apoiada com torção restringida, L=1400mm, t=3mm, ponto V1.....	184
Figura 8.10 – Curvas de equilíbrio, Seção S1, condição apoiada com torção restringida, L=1400mm, t=3mm, ponto V2.....	185
Figura 8.11 – Configurações deformadas, Seção S1, condição apoiada com torção restringida, L=1400mm, t=3mm.....	186
Figura 8.12 – Curvas de equilíbrio, Seção S2, condição apoiada, L=1300mm, t=2mm, ponto V1..	189
Figura 8.13 – Curvas de equilíbrio, Seção S2, condição apoiada, L=1300mm, t=2mm, ponto V2...	189
Figura 8.14 – Configurações deformadas, Seção S2, condição apoiada, L=1300mm, t=2mm.....	190
Figura 8.15 – Curvas de equilíbrio, Seção S2, condição engastada, L=2100mm, t=2,5mm, ponto V1.....	192
Figura 8.16 – Curvas de equilíbrio, Seção S2, condição engastada, L=2100mm, t=2,5mm, ponto V2.....	193
Figura 8.17 – Configurações deformadas, Seção S2, condição engastada, L=2100mm, t=2,5.....	194
Figura 8.18 – Curvas de equilíbrio, Seção S2, condição apoiada com torção restringida, L=1200mm, t=2mm, ponto V1.....	196
Figura 8.19 – Curvas de equilíbrio, Seção S2, condição apoiada com torção restringida, L=1200mm, t=2mm, ponto V2.....	197
Figura 8.20 – Configurações deformadas, Seção S2, condição apoiada com torção restringida, L=1200mm, t=3mm.....	198
Figura 8.21 – Pontos para determinação dos deslocamentos nas seções S3 e S4.....	200
Figura 8.22 – Curvas de equilíbrio, Seção S3, condição apoiada, L=1202.4mm, t=2mm, ponto V1.....	201
Figura 8.23 – Curvas de equilíbrio, Seção S3, condição apoiada, L=1202.4mm, t=2mm, ponto V2.....	202
Figura 8.24 – Configurações deformadas, Seção S3, condição apoiada, L=1202.4mm, t=2mm.....	203
Figura 8.25 – Curvas de equilíbrio, Seção S3, condição engastada, L=2705.4mm, t=1.5mm, ponto V1.....	205
Figura 8.26 – Curvas de equilíbrio, Seção S3, condição engastada, L=2705.4mm, t=1,5mm, ponto V2.....	206
Figura 8.27 – Configurações deformadas, Seção S3, condição engastada, L=2705.4mm, t=2,5.....	207
Figura 8.28 – Curvas de equilíbrio, Seção S3, condição apoiada com torção restringida, L=1703.4mm, t=2mm, ponto V1.....	209

Figura 8.29 – Curvas de equilíbrio, Seção S3, condição apoiada com torção restringida, L=1703.4mm, t=2mm, ponto V2.....	209
Figura 8.30 – Configurações deformadas, Seção S3, condição apoiada com torção restringida, L=1703.4mm, t=2mm.....	210
Figura 8.31 – Curvas de equilíbrio, Seção S4, condição apoiada, L=1185.6mm, t=3mm, ponto V1.....	212
Figura 8.32 – Curvas de equilíbrio, Seção S4, condição apoiada, L=1185.6mm, t=3mm, ponto V2.....	213
Figura 8.33 – Configurações deformadas, Seção S4, condição apoiada, L=1185.6mm, t=3mm.....	214
Figura 8.34 – Curvas de equilíbrio, Seção S4, condição engastada, L=3319.68mm, t=1.5mm, ponto V1.....	216
Figura 8.35 – Curvas de equilíbrio, Seção S4, condição engastada, L=3319.68mm, t=1,5mm, ponto V2.....	217
Figura 8.36 – Configurações deformadas, Seção S4, condição engastada, L=3319.68mm, t=1,5mm.....	218
Figura 8.37 – Curvas de equilíbrio, Seção S4, condição apoiada com torção restringida, L=1817.92mm, t=3mm, ponto V1.....	220
Figura 8.38 – Curvas de equilíbrio, Seção S4, condição apoiada com torção restringida, L=1817.92mm, t=3mm, ponto V2.....	221
Figura 8.39 – Configurações deformadas, Seção S4, condição apoiada com torção restringida, L=1817.92mm, t=3mm.....	222
Figura 9.1 – Resultados MRD para seção engastada, considerando área bruta.....	227
Figura 9.2 – Resultados MRD para seção engastada, considerando área líquida.....	228
Figura 9.3 – Resultados MRD para seção engastada, considerando área líquida e interação DG....	229
Figura 9.4 – Resultados MRD com furos, condição engastada.....	229
Figura 9.5 – Resultados MRD para seção apoiada com torção restringida, considerando área bruta.....	235
Figura 9.6 – Resultados MRD para seção apoiada com torção restringida, considerando área líquida.....	235
Figura 9.7 – Resultados MRD para seção apoiada com torção restringida, considerando área líquida e interação DG.....	236
Figura 9.8 – Resultados MRD com furos para condição apoiada com torção restringida.....	236
Figura 9.9 – Resultados MRD para seção apoiada, considerando área bruta.....	239
Figura 9.10 – Resultados MRD para seção apoiada, considerando área líquida.....	240
Figura 9.11 – Resultados MRD para seção apoiada, considerando área líquida e interação DG.....	240
Figura 9.12 – Resultados MRD com furos para seção apoiada.....	241

Figura 9.13 – Resultados método espessura equivalente para seção apoiada, modo distorcional.....	249
Figura 9.14 – Resultados método espessura equivalente para seção apoiada, modo global.....	249
Figura 9.15 – Resultados método espessura equivalente para seção engastada, modo distorcional..	250
Figura 9.16 – Resultados método espessura equivalente para seção engastada, modo global.....	251

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores recomendados de imperfeição geométrica.....	77
Tabela 5.1 – Estudo de sensibilidade de tamanho da malha dos elementos no ABAQUS.....	96
Tabela 5.2 – Comparação carga crítica para os perfis S1 e S2 sem furos.....	106
Tabela 5.3 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais das CC de Souza (2013).....	107
Tabela 5.4 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais das CM de Souza (2013)....	108
Tabela 5.5 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais das CC de Faria (2016).....	110
Tabela 5.6 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais das CM de Faria (2016).....	110
Tabela 7.1 – Perfis selecionados com interação D-G na seção S1 com furos e condição apoiada.	123
Tabela 7.2 – Perfis selecionados com interação D-G na seção S1 sem furos e condição apoiada..	123
Tabela 7.3 – Perfis selecionados com interação D-G na seção S1 com furos e condição engastada.....	128
Tabela 7.4 – Perfis selecionados com interação D-G na seção S1 sem furos e condição engastada.....	129
Tabela 7.5 – Perfis selecionados com interação D-G na seção S1 com furos e condição apoiada com torção restringida.....	131
Tabela 7.6 – Perfis selecionados com interação D-G na seção S1 sem furos e condição apoiada com torção restringida.....	132
Tabela 7.7 – Perfis selecionados com interação D-G na seção S2 com furos e condição apoiada.	137
Tabela 7.8 – Perfis selecionados com interação D-G na seção S2 sem furos e condição apoiada..	137
Tabela 7.9 – Perfis selecionados com interação D-G na seção S2 com furos e condição engastada.....	142
Tabela 7.10 – Perfis selecionados com interação D-G na seção S2 sem furos e condição engastada.....	142
Tabela 7.11 – Perfis selecionados com interação D-G na seção S2 com furos e condição apoiada com torção restringida.....	145
Tabela 7.12 – Perfis selecionados com interação D-G na seção S2 sem furos e condição apoiada com torção restringida.....	145
Tabela 7.13 – Perfis selecionados com interação D-G seção S3 com condição apoiada.....	150
Tabela 7.14 – Perfis selecionados com interação D-G seção S3 com condição engastada.....	155
Tabela 7.15 – Perfis selecionados com interação D-G seção S3 com condição apoiada com torção restringida.....	159
Tabela 7.16 – Perfis selecionados com interação D-G seção S4 com condição apoiada.....	164

Tabela 7.17 – Perfis selecionados com interação D-G seção S4 com condição apoiada engastada	168
Tabela 7.18 – Perfis selecionados com interação D-G seção S4 com condição apoiada com torção restringida.....	171
Tabela 8.1 – Carga de ruptura perfil sem furos, L=1800, t=2.....	174
Tabela 8.2 – Carga de ruptura perfil com furos, L=1800, t=2.....	174
Tabela 8.3 – Carga de ruptura perfil sem furos, L=3000, t=2,5.....	179
Tabela 8.4 – Carga de ruptura perfil com furos, L=3000, t=2,5.....	179
Tabela 8.5 – Carga de ruptura perfil sem furos, L=1400, t=3.....	183
Tabela 8.6 – Carga de ruptura perfil com furos, L=1400, t=3.....	183
Tabela 8.7 – Carga de ruptura perfil sem furos, L=1300, t=2.....	187
Tabela 8.8 – Carga de ruptura perfil com furos, L=1300, t=2.....	188
Tabela 8.9 – Carga de ruptura perfil sem furos, L=2100, t=2,5.....	191
Tabela 8.10 – Carga de ruptura perfil com furos, L=2100, t=2,5.....	191
Tabela 8.11 – Carga de ruptura perfil sem furos, L=1200, t=3.....	195
Tabela 8.12 – Carga de ruptura perfil com furos, L=1200, t=3.....	195
Tabela 8.13 – Carga de ruptura perfil com furos, L=1202.4, t=2.....	199
Tabela 8.14 – Carga de ruptura para perfil com furos e sem furos utilizando o modo distorcional puro com imperfeição; Seção S3; condição apoiada; t=2.....	199
Tabela 8.15 – Carga de ruptura perfil com furos, L=2705.4, t=1,5.....	204
Tabela 8.16 – Carga de ruptura para perfis S3 com condição engastada e com e sem furos utilizando o modo global como imperfeição.....	204
Tabela 8.17 – Carga de ruptura perfil com furos, L=1703.4, t=2.....	208
Tabela 8.18 – Carga de ruptura para perfis S3 com condição apoiada com torção restringida, com e sem furos utilizando o modo global puro como imperfeição.....	208
Tabela 8.19 – Carga de ruptura perfil com furos, L=1185.6, t=3.....	211
Tabela 8.20 – Carga de ruptura para perfis S4; condição apoiada; com e sem furos utilizando o modo distorcional puro como imperfeição.....	212
Tabela 8.21 – Carga de ruptura perfil com furos, L=3319.68, t=1,5.....	215
Tabela 8.22 – Carga de ruptura para perfis S4 com condição engastada, com e sem furos utilizando o modo global como imperfeição.....	215
Tabela 8.23 – Carga de ruptura perfil com furos, L=1817.92, t=3.....	219
Tabela 8.24 – Carga de ruptura para perfis S4 com condição apoiada com torção restringida, com e sem furos utilizando o modo global puro como imperfeição.....	219
Tabela 9.1 – MRD considerando a área bruta na seção S1 com furos e condição engastada.....	225
Tabela 9.2 – MRD considerando a área líquida na seção S1 com furos e condição engastada.....	226

Tabela 9.3 – MRD considerando a área líquida e interação D-G na seção S1 com furos e condição engastada.....	226
Tabela 9.4 – MRD com furos na seção S1 e condição engastada.....	227
Tabela 9.5 – MRD na seção S1 sem furos e condição engastada.....	230
Tabela 9.6 – MRD na seção S1 sem furos e condição engastada considerando a interação D-G...	230
Tabela 9.7 – MRD considerando a área bruta na seção S3 com furos e condição apoiada com torção restringida.....	231
Tabela 9.8 – MRD considerando a área líquida na seção S3 com furos e condição apoiada com torção restringida.....	232
Tabela 9.9 – MRD considerando a área líquida e interação D-G na seção S3 com furos e condição apoiada com torção restringida.....	233
Tabela 9.10 – MRD com furos na seção com condição apoiada com torção restringida.....	234
Tabela 9.11 – MRD considerando a área bruta na seção S2 com furos e condição apoiada.....	237
Tabela 9.12 – MRD considerando a área líquida na seção S2 com furos e condição apoiada.....	238
Tabela 9.13 – MRD considerando a área líquida e interação D-G na seção S2 com furos e condição apoiada.....	238
Tabela 9.14 – MRD com furos na S2 e condição apoiada.....	239
Tabela 9.15 – MRD para seção S2 sem furos e condição apoiada.....	241
Tabela 9.16 – MRD para seção S2 sem furos e interação D-G e condição apoiada.....	242
Tabela 9.17 – Formulação de espessura equivalente para a seção S3, condição apoiada.....	243
Tabela 9.18 – Formulação de espessura equivalente para a seção S4, condição apoiada.....	244
Tabela 9.19 – Formulação de espessura equivalente para a seção S3, condição engastada.....	245
Tabela 9.20 – Formulação de espessura equivalente para a seção S4, condição engastada.....	246
Tabela 9.21 – Formulação de espessura equivalente para a seção S1, condição apoiada.....	247
Tabela 9.22 – Formulação de espessura equivalente para a seção S2, condição apoiada.....	247
Tabela 9.23 – Formulação de espessura equivalente para a seção S1, condição engastada.....	248
Tabela 9.24 – Formulação de espessura equivalente para a seção S2, condição engastada.....	248

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD	-Flambagem Antissimétrica Distorcional
AISI	-American Iron and Steel Institute
AS/NSZ	-Australian Standard
D-G	-Interação entre as Flambagens Distorcional e Global
ECBL	-Método da Erosão da carga de Bifurcação crítica
EN	-European Standard
FSM	-Método das Faixas Finitas
GBT	-Teoria Generalizada de Vigas
L-D	-Interação entre as Flambagens Local e Distorcional
L-D-G	-Interação entre as Flambagens Local, Distorcional e Global
L-G	-Interação entre as Flambagens Local e Global
MEF	-Método dos Elementos Finitos
MRD	-Método da Resistência Direta
PFFs	-Perfis Formados a Frio
RMI	-Rack Manufactures Institute
SD	-Flambagem Simétrica Distorcional
TF	-Flambagem Global com Flexo-Torção



LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

b_f	-Comprimento da mesa;
b_w	-Comprimento da alma;
f_{cr}	-Tensão crítica
f_y	-Tensão de escoamento;
t	-Espessura do perfil
t_{eq}	-Espessura equivalente do furo
t_{web}	-Espessura da alma
$t_{web,hole}$	-Espessura equivalente da alma
t_{rL}	-Espessura equivalente do furo para flambagem local
t_{rD}	-Espessura equivalente do furo para flambagem distorcional
t_{rG}	-Espessura equivalente do furo para flambagem global
ν	-Coeficiente de Poisson
ν_L	-Magnitude da imperfeição local
ν_G	-Magnitude da imperfeição global
w_D	-Magnitude da imperfeição distorcional;

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

A_g	-Área bruta;
A_{net}	-Área líquida;
C_D	-Coeficiente para combinação da imperfeição distorcional;
C_L	-Coeficiente para combinação da imperfeição local;
C_G	-Coeficiente para combinação da imperfeição global;
E	-Módulo de elasticidade transversal;
L	-Comprimento da coluna;
L_{crD}	-Comprimento de meia onda distorcional
L_{crL}	-Comprimento de meia onda local
L_{hole}	-Comprimento do furo
P	-Carga genérica
P_{cr}	-Carga crítica

$P_{cr,máx}$	-Carga crítica máxima
$P_{cr,min}$	-Carga crítica mínima
P_{crD}	-Carga crítica de flambagem elástica distorcional
P_{crL}	-Carga crítica de flambagem elástica local
P_{crG}	-Carga crítica de flambagem elástica global
P_{nD}	-Carga última distorcional
P_{nDG}	-Carga última da interação da flambagem distorcional-global
P_{nLD}	-Carga última da interação da flambagem local-distorcional
P_{nL}	-Carga última local
P_{nLDG}	-Carga última da interação da flambagem local-distorcional-global
P_{nLG}	-Carga última da interação da flambagem local-global
P_{nG}	-Carga última global
$P_{ult,exp}$	-Carga última experimental
$P_{ult,num}$	-Carga última numérica
P_y	-Carga de escoamento
P_{ynet}	-Carga de escoamento da seção líquida
RDL	-Coeficiente para cálculo da interação L-D
RGD	-Coeficiente para cálculo da interação D-G

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

λ_{cr}	-Esbeltez crítica;
λ_D	-Esbeltez distorcional;
λ_L	-Esbeltez local;
λ_g	-Esbeltez global;
λ_{LG}	-Esbeltez da interação local-global;
λ_{DG}	-Esbeltez da interação distorcional-global;
λ_{GD}	-Esbeltez da interação global-distorcional;
λ_{LD}	-Esbeltez da interação local-distorcional;
λ_{DL}	-Esbeltez da interação distorcional-local;
λ_{LDG}	-Esbeltez da interação local-distorcional-global;
ε	-Deformação;
σ	-Tensão;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 JUSTIFICATIVA	32
1.2 OBJETIVOS	33
1.3 METODOLOGIA	33
1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	34
2 INTERAÇÃO ENTRE OS MODOS DE FLAMBAGENS FLAMBAGENS EM PERFIS FORMADOS A FRIO.....	36
2.1 INTERAÇÃO L-D	36
2.2 INTERAÇÃO D-G	44
2.3 INTERAÇÃO L-D-G	50
3 SEÇÕES RACK PERFURADAS	56
3.1 ESTUDOS DE SEÇÃO RACK PERFURADAS SUJEITAS À COMPRESSÃO	56
3.2 IMPERFEIÇÕES PARA SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	75
3.2.1 Imperfeições geométricas	75
3.2.2 Tensões residuais	77
4 MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA (MRD)	79
4.1 MRD EM PERFIS SEM FUROS	79
4.2 PROPOSTAS DO MRD EM PERFIS COM INTERAÇÃO ENTRE AS FLAMBAGENS	81
4.3 MRD EM PERFIS COM FUROS PONTUAIS	85
4.4 MRD EM SEÇÕES RACKS PERFURADAS	88
4.4.1 Formulações para utilização de espessura reduzida.....	90
5 DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	93
5.1 MODELO NUMÉRICO EM ELEMENTOS FINITOS	93
5.1.1 Definição do tipo de elemento e malha.....	94
5.1.2 Definição das propriedades mecânicas	96
5.1.3 Definição das condições de contorno e aplicação de carga	97
5.1.4 Definição das imperfeições geométricas	100
5.1.5 Métodos de solução do problema linear e não linear.....	101
5.2 O MODELO NUMÉRICO NO GBTUL E CUFSM.....	103
5.3 VALIDAÇÕES DO MODELO NUMÉRICO (ABAQUS).....	107
5.3.1 Seções rack perfuradas ensaiadas por Souza (2013)	107
5.3.2 Seções rack perfuradas ensaiadas por Faria (2016)	110
6 ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	113

6.1	DEFINIÇÃO DAS SEÇÕES RACK	113
6.2	PARAMETRIZAÇÃO DAS ANÁLISES	116
7	ANÁLISE LINEAR	118
7.1	CURVAS DE FLAMBAGEM PARA SEÇÃO S1	119
7.1.1	Curvas de flambagem com condição apoiada para seção S1	119
7.1.2	Curvas de flambagem com condição engastada para seção S1	123
7.1.3	Curvas de flambagem com condição apoiada com torção restringida para seção S1 ..	129
7.2	CURVAS DE FLAMBAGEM PARA SEÇÃO S2	132
7.2.1	Curvas de flambagem com condição apoiada para seção S2	132
7.2.2	Curvas de flambagem com condição engastada para seção S2	137
7.2.3	Curvas de flambagem com condição apoiada com torção restringida para seção S2 ..	142
7.3	CURVAS DE FLAMBAGEM PARA SEÇÃO S3	145
7.3.1	Curvas de flambagem com condição apoiada para seção S3	146
7.3.2	Curvas de flambagem com condição engastada para seção S3	150
7.3.3	Curvas de flambagem com condição apoiada com torção restringida para seção S3 ..	155
7.4	CURVAS DE FLAMBAGEM PARA SEÇÃO S4	159
7.4.1	Curvas de flambagem com condição apoiada para seção S4	159
7.4.2	Curvas de flambagem com condição engastada para seção S4	164
7.4.3	Curvas de flambagem com condição apoiada com torção restringida para seção S4 ..	168
8	ANÁLISE NÃO LINEAR.....	172
8.1	ANÁLISES NÃO LINEARES SEÇÃO S1	173
8.1.1	Análise não linear seção S1 com condição apoiada	173
8.1.2	Análise não linear seção S1 com condição engastada	179
8.1.3	Análise não linear seção S1 com condição apoiada com torção restringida	183
8.2	ANÁLISES NÃO LINEARES SEÇÃO S2	187
8.2.1	Análise não linear seção S2 com condição apoiada	187
8.2.2	Análise não linear seção S2 com condição engastada	191
8.2.3	Análise não linear seção S2 com condição apoiada com torção restringida	194
8.3	ANÁLISES NÃO LINEARES SEÇÃO S3	198
8.3.1	Análise não linear seção S3 com condição apoiada	199
8.3.2	Análise não linear seção S3 com condição engastada	203
8.3.3	Análise não linear seção S3 com condição apoiada com torção restringida	207
8.4	ANÁLISES NÃO LINEARES SEÇÃO S4	211
8.4.1	Análise não linear seção S4 com condição apoiada	211
8.4.2	Análise não linear seção S4 com condição engastada	214
8.4.3	Análise não linear seção S4 com condição apoiada com torção restringida	218
9	APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA	224

SUMÁRIO

9.1	APLICAÇÃO DO MRD NA CONDIÇÃO ENGASTADA	225
9.2	APLICAÇÃO DO MRD NA CONDIÇÃO APOIADA COM TORÇÃO RESTRINGIDA	231
9.3	APLICAÇÃO DO MRD NA CONDIÇÃO APOIADA	237
9.4	APLICAÇÃO DA FORMULAÇÃO DE ESPESSURA EQUIVALENTE	242
10	CONCLUSÕES	252
10.1	CONCLUSÕES GERAIS	252
10.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	254
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	255

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os perfis formados a frio (PFFs) são elementos estruturais obtidos a partir do dobramento ou perfilagem, em temperatura ambiente, de chapas metálicas. Esses perfis têm sido muito utilizados em construções metálicas devido a seu baixo custo de produção, fácil montagem e baixo peso. As principais utilizações desse tipo de perfil são em coberturas metálicas, edifícios de pequenos portes e sistemas de estocagens industriais. A Figura 1.1 mostra um sistema de armazenagem industrial chamado porta-pallet.

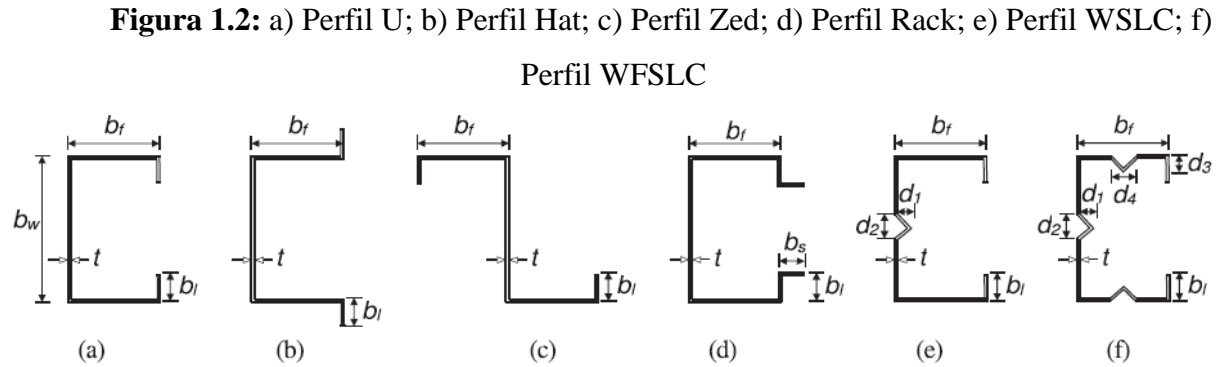
Figura 1.1: Exemplo de utilização de PFFs



Fonte: Zhang e Alan (2017)

Os perfis formados a frio são tipicamente formados por seções abertas e com um eixo de simetria. As seções mais utilizadas são do tipo U, Hat, Zed, Rack, WSLC e WFSLC, sendo que as duas últimas seções possuem enrijecedores intermediários nas paredes do elemento, que

têm como função minimizar os efeitos da flambagem local, aumentando a capacidade resistente da seção. A Figura 1.2 mostra essas seções.

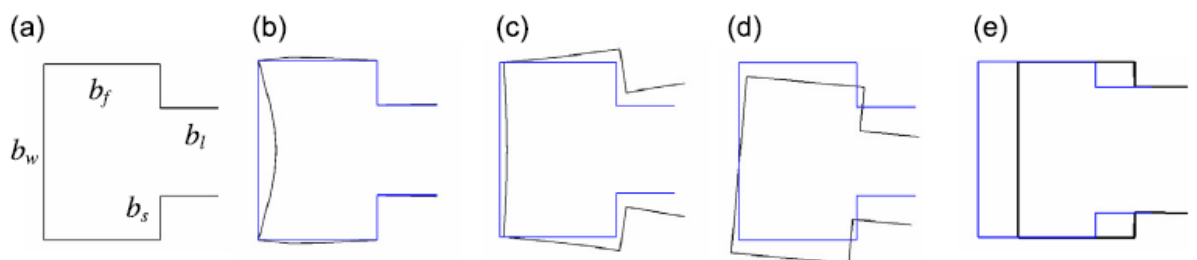


Fonte: Martins, Camotim e Dinis (2017)

Apesar das vantagens da utilização dos perfis formados a frio já citadas, os mesmos possuem elevada esbelteza, por isso, são propensos a sofrer instabilidades. Logo, o comportamento dos PFFs é extremamente influenciado pelo fenômeno de flambagem, esta pode ocorrer na forma de flambagem local, distorcional ou global.

A flambagem local é uma instabilidade que ocorre quando a seção de uma parede do perfil se desloca para fora do plano, porém, os ângulos entre essas paredes permanecem inalterados. A flambagem distorcional é uma instabilidade que ocorre em perfis de paredes abertas e que a seção sofre deslocamentos das arestas, resultando em uma abertura ou fechamento das mesas. A flambagem global ocorre devido à perda de estabilidade devido a deslocamentos que ocorrem por todo seu comprimento, podendo ocorrer na forma de flexão, torção ou flexo-torção. A Figura 1.3 mostra os três tipos de instabilidades para uma seção tipo rack.

Figura 1.3: a) Perfil rack; b) Flambagem local; c) Flambagem distorcional; d) Flexo-torção; e) Flexão

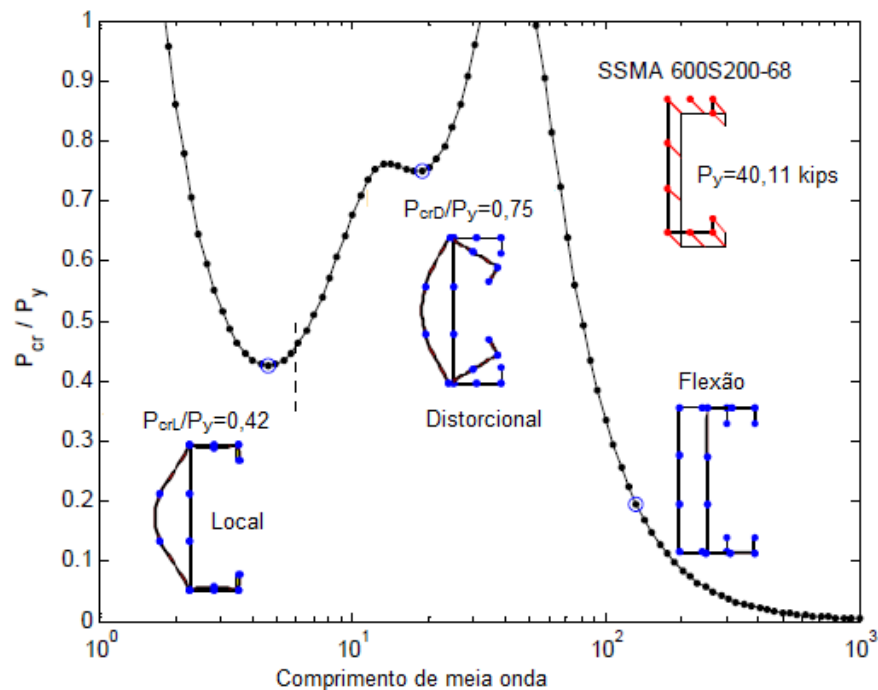


Fonte: Dinis, Young e Camotin (2014)

O Método da Resistência Direta (MRD) está presente na norma Brasileira denominada ABNT NBR 14762:2010 e Americana intitulada AISI S100:2016 de dimensionamento de PFFs. A partir desse método é possível calcular a carga de ruptura dos modos de flambagem de colunas e vigas sujeitos à compressão e flexão. Para utilização do MRD, é necessário determinar as cargas críticas de flambagem elástica local, distorcional e global e seus respectivos valores de esbeltez. Atualmente, as cargas críticas de flambagem podem ser obtidas com a utilização dos *softwares* gratuitos GBTUL 2.06 e CUFSM 5.04.

O *software* GBTUL 2.06 (Bebiano et al., 2016) se baseia na Teoria Generalizada de Vigas (GBT), enquanto que o *software* CUFSM 5.04 se baseia no Método das Faixas Finitas (FSM) e foi desenvolvido por Schafer e Ádani (2006). Os dois softwares apesar de possuírem formulações diferentes, realizam análises lineares de flambagem elástica em PFFs. Os dois programas determinam a curva de flambagem linear elástica do perfil, que é uma curva de carga crítica por comprimento, onde é possível determinar as cargas críticas de flambagem dos modos local, distorcional e global e suas configurações deformadas. A Figura 1.4 mostra uma curva típica de flambagem realizada pelo *software* CUFSM para uma coluna com ação de compressão centrada e condição apoiada, onde o primeiro mínimo da curva corresponde à flambagem local, o segundo mínimo corresponde à flambagem distorcional, e a curva descendente corresponde a flambagem global.

Figura 1.4: Curva padrão de análise de flambagem linear elástica



Fonte: Li e Schafer (2010), adaptado

A flambagem nos perfis formados a frio pode ocorrer de maneira isolada ou pela interação entre os modos de flambagem, resultando nas flambagens local-global (L-G), local-distorcional (L-D), distorcional-global (D-G) e local-distorcional-global (L-G-D). A interação entre os modos de flambagem modifica o comportamento e a resistência da estrutura. A interação do tipo L-G já tem seu comportamento conhecido, pois também ocorre nos perfis laminados e soldados, e o MRD leva em conta os efeitos dessa interação na sua formulação. Os outros tipos de interação entre as flambagens têm sido alvo de pesquisas, como os trabalhos feitos em perfis sem furos por Dinis, Camotim e Silvestre (2007), Martins et al. (2015), Silvestre et al. (2012) e Martins, Camotim e Dinis (2017) para interação L-D, os trabalhos de Dinis e Camotim (2011), Martins e Camotim e Dinis (2018) para a interação D-G, e os trabalhos de Young, Dinis e Camotim (2018), Dinis et al. (2018) e Santos et al. (2014) para interação L-D-G. O comportamento dessas interações ainda não é inteiramente conhecido e a formulação do MRD ainda não prevê os efeitos das interações L-D, D-G e L-D-G. A Figura 1.5 mostra evidências da interação L-D, sendo que a partir desta imagem é possível observar os deslocamentos na alma devido à flambagem local e o deslocamento das mesas devido à flambagem distorcional.

Figura 1.5: Interação entre as flambagens do tipo L-D



Fonte: Camotim et al. (2018), adaptado

Este trabalho tem como foco o estudo das interações entre as flambagens D-G em PFFs do tipo rack, que são muito utilizados nos sistemas de estocagem industrial. Os perfis racks geralmente são utilizados nas colunas desses sistemas, e têm como principal característica a presença de furos distribuídos por todo seu comprimento. Os furos facilitam a ligação entre as colunas e outros elementos dos sistemas de estocagem, e podem ser posicionados na alma e mesas do perfil. A Figura 1.6 mostra um tipo comum dessa seção e uma ligação entre coluna e viga em um sistema de estocagem.

Figura 1.6: a) Perfil rack; b) Ligação entre coluna de perfil rack perfurado e viga

Fonte: Elias et al. (2018), adaptado

A presença dos furos por todo o comprimento nas colunas de seção rack representa a maior dificuldade no dimensionamento da mesma, pois, influencia no comportamento de flambagem da estrutura e na carga de colapso da mesma. Em consequência dessa dificuldade, de acordo com Casafont et al. (2011) nenhuma solução analítica para a determinação de cargas de ruptura de seções rack perfuradas foi totalmente aceita, devido a isso, as normas Europeia EN 15512:2009, Australiana AS/NSZ 4084:2012 e Americana RMI (2012) de dimensionamento de sistemas de estocagem determinam a necessidade de ensaios experimentais para o dimensionamento de colunas perfuradas sobre compressão. Ainda assim, diversos autores como Elias et al (2018), Neiva et al (2018), Ren, Wang e Zhao (2018), Zhao, Ren e Qin (2017), Souza (2013), Casafont et al. (2013), Casafont et al. (2011) realizaram simulações numéricas por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), e principalmente ensaios experimentais com o intuito de estudar o comportamento das seções racks com furos e buscar soluções analíticas para o dimensionamento destes perfis, principalmente por meio do MRD. Outra dificuldade no dimensionamento desses perfis é que os softwares GBTUL e CUFSM não realizam análises em perfis perfurados.

O Método da Resistência Direta para elementos com furos foi proposto por Moen e Schafer (2011) e atualmente está contido na norma AISI S100:2016. No entanto, este método é válido apenas para seções com furos pontuais no elemento, ou seja, ele não é válido para elementos de seções racks, que possuem furos por todo seu comprimento.

Dessa forma, este trabalho irá estudar as interações entre os modos de flambagens do tipo D-G em colunas de perfis racks perfurados de sistemas de estocagem por meio de simulações numéricas com o *software* ABAQUS 6.14, o qual utiliza o MEF, e além disso, também serão realizadas análises complementares de flambagem com os softwares GBTUL 2.06 e CUFSM 5.04, onde serão realizadas análises lineares e não lineares nas colunas rack

perfuradas para analisar o comportamento das seções com interação D-G. Por fim, a qualidade do MRD será verificada nos perfis analisados.

1.1 JUSTIFICATIVA

As normas de dimensionamento de sistemas de estocagem determinam que sejam feitos ensaios experimentais para dimensionamento de colunas rack perfuradas, devido a isso, diversos autores como Casafont et al. (2011), Crisan, Ungureanu e Dubina (2012a e 2012b), Bonada et al. (2012), Souza (2013), Pastor et al. (2014), Trouncer e Rasmussen (2014), Zhao, Ren e Qin (2017), Elias et al. (2018), Ren, Wang e Zhao (2019) e Baldasino et al. (2019) realizaram ensaios experimentais e simulações numéricas em seções rack perfuradas sujeitas à compressão, com o objetivo de determinar a capacidade resistente desses elementos. Além disso, alguns desses autores observaram casos de interações entre os modos de flambagem do tipo L-D, D-G ou L-D-G. A interação entre as flambagens pode diminuir a capacidade de carga das seções rack, no entanto, poucos estudos foram inteiramente focados nas interações entre os modos de flambagem do tipo D-G para as seções rack perfuradas, diferentemente do caso de perfis formados a frio sem furos.

No caso de perfis formados a frio de seções não perfuradas, diversos estudos já foram realizados com foco nas interações entre as flambagens. Martins et al. (2015), Dinis e Camotim (2015), Dinis, Young e Camotim (2014), Martins, Camotim e Dinis (2017), Martins, Dinis e Camotim (2016), Dinis e Camotim (2011) e Martins, Camotim e Dinis (2018) realizaram ensaios experimentais e principalmente simulações numéricas em seções do tipo C, Hat, Zed, Rack, WSLC e WSFLC que sofrem da interação L-D ou D-G. Nesses estudos, o primeiro passo era selecionar uma vasta quantidade de colunas com interação. Essa seleção foi feita por um método de tentativa e erro pelo *software* GBTUL, o qual utiliza a teoria generalizada de vigas (GBT) e gera curvas de flambagem elásticas dos perfis, onde é possível estudar o comportamento das flambagens local, distorcional e global, e determinar comprimentos onde ocorra a interação entre as flambagens. Após a seleção de colunas, foram feitas análises não lineares por meio do MEF e ensaios experimentais para confirmar e estudar o comportamento dessa interação. Estes estudos têm como principal objetivo verificar se o atual MRD é capaz de prever corretamente as cargas de ruptura para colunas com interação entre os modos de flambagem. No entanto, o *software* GBTUL não aceita perfis perfurados, portanto, a seleção de elementos que possam ter interação se torna mais onerosa para seções racks perfuradas de sistemas de estocagem. Logo, devido a todas as dificuldades impostas, é essencial a realização

de um estudo com foco nas interações entre as flambagens para colunas de seções rack perfuradas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é simular e estudar o comportamento de colunas perfuradas de seções rack sujeitas à compressão centrada e que possuam interação entre os modos de D-G por meios de análises numéricas, utilizando para tal o Método dos Elementos Finitos (MEF) com a utilização do *software* ABAQUS 6.14, onde serão realizadas análises lineares e não lineares de flambagem para simular o comportamento das colunas com interação D-G. Além disso, a teoria generalizada de vigas (GBT) e o método das faixas (FSM) com auxílio dos softwares GBTUL 2.06 e CUFSM 5.04 serão utilizados para análises preliminares de flambagem linear elástica.

Outro objetivo deste trabalho é verificar a qualidade do Método da Resistência Direta nos perfis rack perfurados analisados neste trabalho. Por fim, a qualidade da Metodologia da Espessura Equivalente proposto por Casafont et al. (2012, 2013) será verificada nos perfis perfurados analisados, este é um método onde os furos são substituídos por uma parede com espessura equivalente, e os softwares GBTUL e CUFSM possam ser utilizados em perfis perfurados para determinação da carga crítica de flambagem elástica.

1.3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como foco a simulação numérica de perfis formados a frio de seção rack perfurados em que ocorra a interação entre os modos de flambagem D-G. A seguir é exposta a sequência metodológica do trabalho:

- a) Revisão bibliográfica de estudos sobre interações entre as flambagens em perfis formados a frio e de estudos sobre colunas de perfis racks perfurados sujeitos à compressão;
- b) Definição do modelo numérico em elementos finitos no *software* ABAQUS 6.14 para realização das análises linear e não linear;
- c) Seleção das colunas com interação D-G com a mesma metodologia utilizada nos trabalhos de perfis formados a frio sem furos. A seleção será feita a partir de análises das curvas de flambagem linear elástica, obtidas com utilização do MEF no *software* ABAQUS 6.14, onde os furos podem ser modelados;

-
- d) A partir da seleção colunas com interação D-G, será feita a realização da análise linear elástica de flambagem com utilização do software ABAQUS 6.14, onde serão determinados os modos de flambagem do perfil, e as configurações deformadas dos modos distorcional e global serão combinados para serem utilizados como imperfeição geométrica para realização da análise não linear;
 - e) Realização da análise não linear elasto-plástica, determinando a carga de ruptura, curvas de equilíbrio e configurações deformadas das colunas.
 - f) A partir da análise numérica e determinação da carga de ruptura dos perfis analisados, será verificada a qualidade do MRD para esses perfis;

1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

No Capítulo 2 é apresentado uma revisão bibliográfica com estudos sobre colunas sem furos de PFFs com interações entre as flambagens do tipo L-D, D-G e L-D-G.

No Capítulo 3 são apresentados estudos sobre colunas de seção rack perfurados de PFFs, com maior ênfase em ensaios experimentais e simulações numéricas utilizando o MEF. Além disso, em relação as simulações numéricas, são mostradas estratégias para realização de análises não lineares de flambagem.

O Capítulo 4 mostra a formulação do MRD presente na norma AISI S100:2016 para perfis sem furos e com furos pontuais para os casos de flambagem local, distorcional, global e local-global. Por fim, são apresentadas propostas do MRD para os casos de interação entre as flambagens do tipo L-D, D-G e L-D-G e também para perfis racks perfurados.

No Capítulo 5 é mostrado a definição do modelo numérico pelo Método dos Elementos Finitos com a utilização do *software* ABAQUS 6.14, sendo que esse modelo será utilizado para realização das análises linear e não linear de flambagem. Os modelos numéricos utilizados nos softwares GBTUL 2.06 e CUFSM 5.04 também são definidos, sendo que esses programas serão utilizados para a realização de análises lineares de flambagem elástica. Por fim, o modelo proposto no ABAQUS foi validado a partir de dois ensaios experimentais realizados em colunas perfuradas de seção rack por Souza (2013) e Faria (2016).

No Capítulo 6 são mostradas as seções utilizadas no trabalho, bem como os tipos de furos, espessuras e condições de contorno. Nesse capítulo também será mostrado as etapas do trabalho e como as análises serão desenvolvidas.

No Capítulo 7 são realizadas as análises lineares nas seções racks, onde serão determinadas as curvas de flambagem elásticas das seções e por fim selecionando colunas com

possível interação do tipo D-G. As análises lineares nas seções rack perfuradas serão feitas utilizando o Método dos Elementos Finitos por meio do software ABAQUS. Por fim, na análise linear também serão determinados os modos de flambagem distorcional e global que serão utilizados como imperfeições geométricas na análise não linear.

No Capítulo 8 serão realizadas as análises não lineares nas colunas com interação D-G selecionadas no Capítulo 7. Nessas análises serão determinadas a carga de ruptura, as curvas de equilíbrio e as configurações deformadas das seções analisadas.

No Capítulo 9 será verificada a qualidade do Método da Resistência Direta (MRD) para as seções rack perfuradas analisadas neste trabalho. Os resultados obtidos no MRD serão comparados com os resultados de carga de ruptura obtidos pela análise não linear. Por fim, a metodologia de espessura equivalente foi utilizada nos perfis com furos para determinação da carga crítica de flambagem no CUFSM, e os valores foram comparados com os obtidos no ABAQUS.

CAPÍTULO 2

INTERAÇÕES ENTRE OS MODOS DE FLAMBAGEM EM PERFIS FORMADOS A FRIO

Camotim et al. (2018) realizaram uma revisão com as pesquisas realizadas sobre perfis formados a frio sem furos com interação entre os modos de flambagem. Esse trabalho abordou as interações L-D, D-G e L-D-G em colunas e vigas, mostrando diversos ensaios experimentais e simulações numéricas conduzidos por outros autores com relação a interação entre as flambagens. O comportamento destas estruturas foi estudado a partir de análises não lineares de flambagem elástica e elasto-plástica, determinação da carga de ruptura e das configurações deformadas. Segundo os autores, a interação L-D em colunas é a que mais possui pesquisas realizadas, contemplando experimentos e simulações numéricas em diversos tipos de seções. A interação L-D-G em colunas também possui ensaios experimentais e simulações numéricas, porém em menor quantidade que a interação L-D, e a interação D-G é que menos possui pesquisas. Nos próximos tópicos, o comportamento das interações L-D, D-G e L-D-G em PFFs sem furos é mostrado.

2.1 INTERAÇÃO L-D

A interação L-D pode ser observada visualmente pela associação de deformações distorcionais, que são caracterizadas pela abertura ou fechamento das mesas, e por deformações

locais, que são caracterizadas por deformações na alma do elemento. A Figura 2.1 mostra evidências experimentais da interação L-D.

Figura 2.1: Evidências experimentais da interação L-D



Fonte: Young, Silvestre e Camotim (2013)

A interação L-D ocorre quando os valores das cargas críticas de flambagem local (P_{crL}) e distorcional (P_{crD}) são iguais ou possuem valores próximos, neste caso a interação é chamada de TI (“*true interaction*”). Além disso, a interação L-D também pode ocorrer quando o valor das cargas críticas local e distorcional estão distantes, e o valor da tensão de escoamento é tão alto que permite o desenvolvimento de uma flambagem secundária, que passará a interagir com a flambagem que já atuava na peça. A interação L-D é chamada de SDI (“*Secondary Distortional Bifurcation*”) quando a flambagem secundária é distorcional, e de SLI (“*Secondary Local Bifurcation*”) quando a flambagem secundária é local. Para classificar os tipos de interação L-D numericamente, foi proposto o coeficiente R_{DL} , que é calculado pela razão entre as cargas críticas distorcional e local, mostrada na Equação 2.1

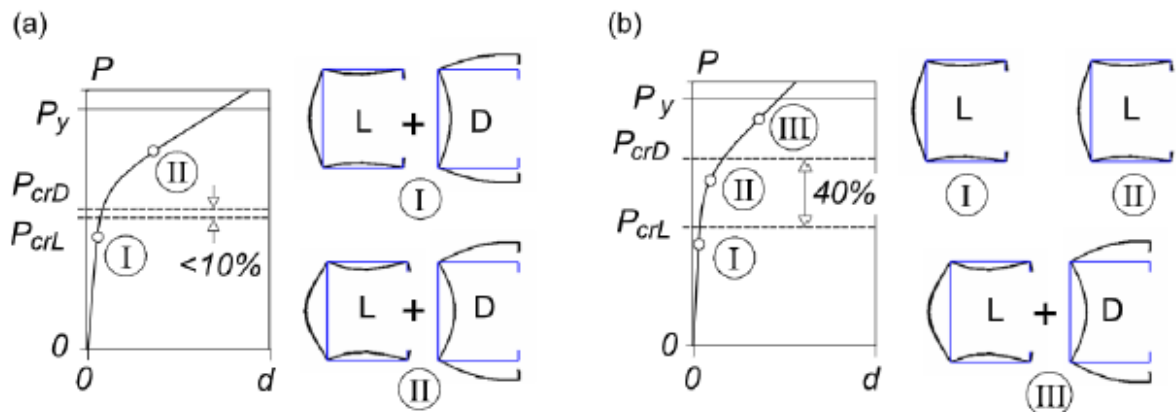
$$R_{DL} = \frac{P_{crD}}{P_{crL}} \quad (2.1)$$

De acordo com o estudo feito por Martins et al. (2015), a interação do tipo TI ocorre para valores de R_{DL} variando entre 0,8 e 1,3. A interação SLI pode ocorrer para valores de R_{DL} menores que 0,8, e a interação SDI pode ocorrer para valores de R_{DL} maiores que 1,3.

A interação do tipo TI pode ser considerada como uma característica intrínseca da coluna, sendo que neste caso a interação entre as flambagens ocorre gradualmente com o incremento das cargas aplicadas. No caso da interação SDI, a flambagem crítica distorcional é maior que a local, logo, nos estágios iniciais, ocorre apenas a flambagem local, e a interação L-D só irá ocorrer quando a carga aplicada se aproximar da carga crítica distorcional. Na interação

LDI ocorre o inverso que na interação SDI. (Martins et al., 2015). A Figura 2.2 mostra curvas de equilíbrio elástico de seções rack com interações L-D dos tipos TI e SDI.

Figura 2.2: a) Curva de equilíbrio elástico de interação do tipo TI, b) Curva de equilíbrio elástico de interação do tipo SDI.



Fonte: Dinis, Young e Camotim (2014)

A seção transversal da parte a) da Figura 2.2 sofre interação do tipo TI, em que as cargas críticas local e distorcional são próximas, e percebe-se que a interação L-D ocorre em todas as etapas do carregamento. A parte b) da Figura 2.2 mostra um perfil rack que sofre interação L-D do tipo SDI, em que a carga distorcional tem valor 40% maior que a carga crítica local, e percebe-se que nos estágios I e II de carregamento, ocorre somente a flambagem local, e apenas no estágio III em que a carga atuante se aproxima da carga crítica distorcional é que ocorre a interação entre as flambagens. Neste caso, a interação só ocorreu devido ao alto valor da carga de escoamento que permitiu que a interação acontecesse.

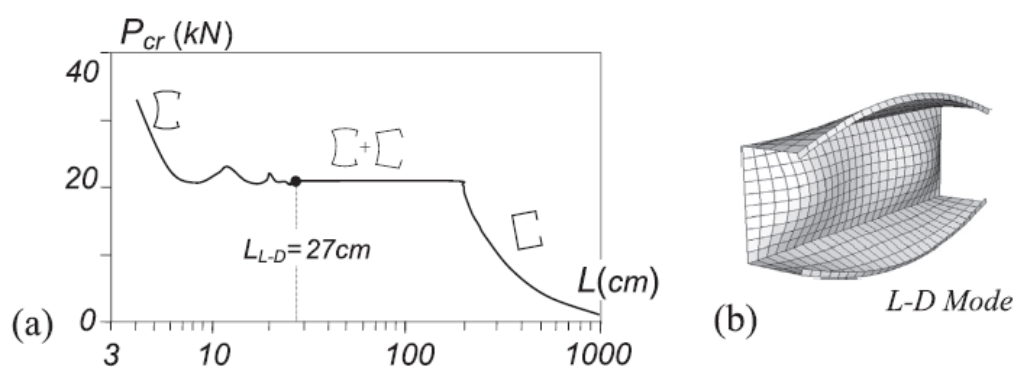
A norma Americana de perfis formados a frio denominada AISI S100:2016 ainda não prevê nas equações do Método da Resistência Direta a interação entre as flambagens do tipo L-D. Devido a isso, diversos autores vêm realizando ensaios experimentais e principalmente simulações numéricas em perfis onde ocorre a interação entre as flambagens L-D.

Nos trabalhos de Silvestre, Camotim e Dinis (2012), Martins, Camotim e Dinis (2017), Dinis e Camotim (2015), Martins et al. (2015), Martins, Camotim e Dinis, (2017) e Martins, Dinis e Camotim (2016) foram realizadas uma vasta quantidade de simulações numéricas por meio do software de elementos finitos ABAQUS. Nestes estudos foram feitas análises não lineares de flambagem elástica e elásto-plástica dos perfis do tipo C, Rack, Zed, Hat, WFSLC e WSLC, com o intuito de estudar o comportamento e determinar a carga de ruptura desses

perfis. Outro objetivo dessas pesquisas era verificar se o atual MRD consegue prever corretamente as cargas de ruptura para os casos de interação entre flambagens, e caso isso não ocorra prever alterações na formulação do MRD para que as interações entre as flambagens fossem consideradas. Todos estes estudos possuem basicamente a mesma metodologia, consistindo em selecionar colunas com interação L-D, determinar os modos de flambagem a partir da análise elástica, estes serão utilizados como imperfeições geométricas para realizar as análises não lineares de flambagem elástica e elasto-plástica, e por fim determinar a carga de ruptura da coluna. Nas simulações numéricas realizadas pelos autores, os efeitos de tensão residual e encruamento foram desprezados.

O passo inicial dessas pesquisas era selecionar uma grande quantidade de colunas com interação L-D, para isso, foi utilizado um método de tentativa e erro com auxílio do software GBTUL. Este programa gera para cada seção transversal uma curva de flambagem linear elástica de carga crítica por comprimento, e a partir desta curva é possível determinar para qual comprimento as cargas críticas local e distorcional são iguais, comprimento onde ocorre interação L-D do tipo TI. Por fim, a partir desta coluna com interação, são selecionadas colunas com outros níveis de interação L-D. A Figura 2.3 mostra a curva de flambagem elástica para uma seção C, e a configuração deformada no comprimento da interação

Figura 2.3: a) Curva de flambagem elástica seção C; b) Configuração deformada para comprimento com interação L-D;



Fonte: Camotim et. al (2018)

Pode ser observada na Figura 2.3 que a seção C possui interação L-D para um comprimento de 27 cm, comprimento onde as cargas críticas local e distorcional tem mesmo valor, além disso, pode ser observada na parte b) da Figura 2.3 a configuração deformada da

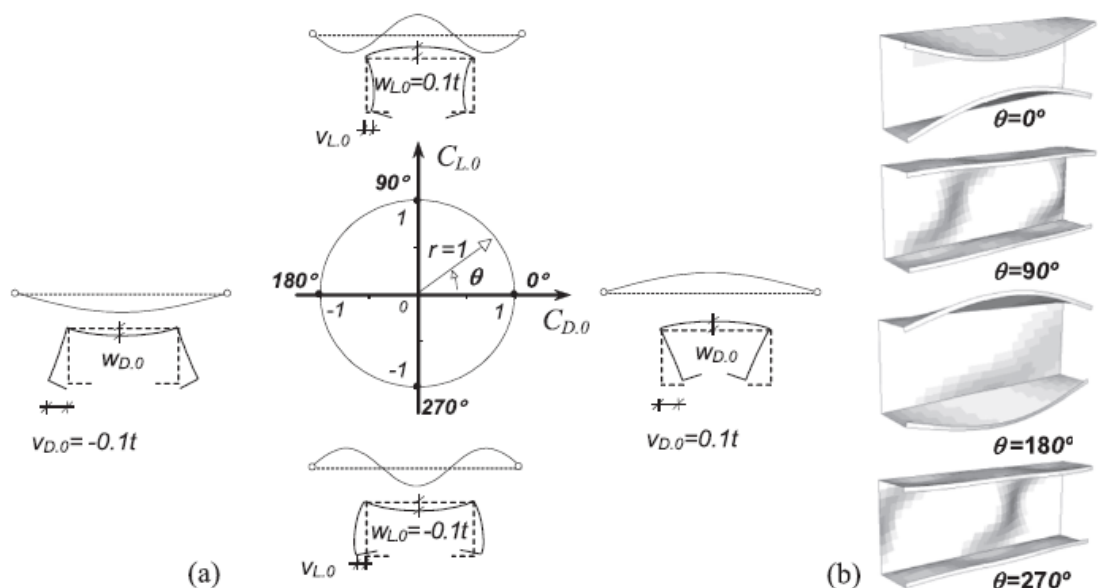
seção nesse comprimento, onde ocorrem deformações locais na alma e distorcionais nas mesas, caracterizando a interação L-D.

Nas simulações numéricas de PFFs é necessário introduzir imperfeições geométricas no modelo numéricas para realizar a análise não linear e assim determinar o comportamento do elemento e sua carga de ruptura. De acordo com Camotim e Dinis (2011), no caso da interação L-D, a imperfeição geométrica a ser inserida no modelo numérico é definida pela combinação linear dos modos puros de flambagem local e distorcional. O valor da magnitude da imperfeição local (w_L) e distorcional (v_D) adotados neste estudo foram de $0.1t$, sendo t a espessura do elemento. Logo, as magnitudes das imperfeições geométricas locais e distorcionais seguem relação da Equação 2.2.

$$(C_L)^2 + (C_D)^2 = 1 \quad (2.2)$$

Sendo que $C_L = \text{Sen}\theta$ e $C_D = \text{Cos}\theta$. O entendimento desta relação fica visível a partir da criação de um círculo com raio unitário. Este círculo mostra a representação de todas as possibilidades de combinações de imperfeições geométricas. A Figura 2.4 mostra este círculo para seções C e suas configurações deformadas.

Figura 2.4: a) Representação das imperfeições geométricas para interação L-D b) Modos de flambagem para ângulos de 0° , 90° , 180° e 270°

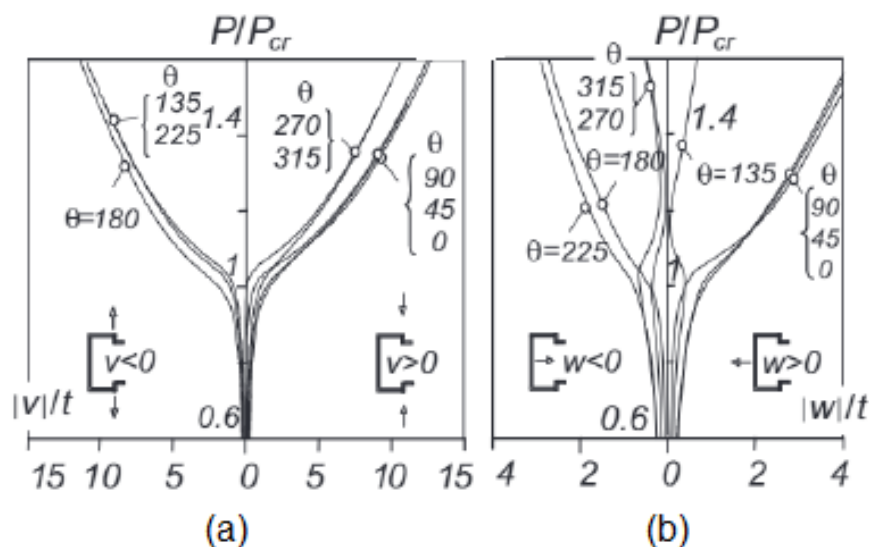


Fonte: Camotim e Dinis (2011)

Percebe-se pela Figura 2.4 que para os ângulos de 0° e 180° são utilizados modos de flambagem puramente distorcionais com imperfeições geométricas com magnitude de $0,1t$, sendo que para 0° a imperfeição tende a fechar as mesas, e para 180° a imperfeição tende a abrir as mesas. Para os ângulos de 90° e 270° são utilizados modos de flambagem puramente locais, com magnitude de $0,1t$. Para qualquer outro valor de ângulo, o valor da imperfeição será a combinação linear dos modos de flambagem local e distorcional, e os valores das magnitudes das imperfeições de cada modo de flambagem são determinados a partir da Equação 2.2.

Todas as análises não lineares elásticas realizadas nas seções mostraram que as imperfeições geométricas com modos de flambagem puramente distorcionais levam a coluna a menor carga de ruptura, e essa imperfeição foi inserida para a posterior análise não linear elasto-plástica. De acordo com Martins et al. (2015), isso ocorre pelo fato da flambagem local possuir uma maior reserva de resistência pós flambagem se comparado a flambagem distorcional. A Figura 2.5 mostra curvas de equilíbrio com comportamento elástico não linear de deslocamentos na alma e nas mesas considerando várias combinações de imperfeições geométricas, sendo possível observar que imperfeições puramente distorcionais levam o elemento ao comportamento mais crítico, com menores cargas de ruptura.

Figura 2.5: Curvas de equilíbrio elástico não linear; a) P/P_{cr} por deformação nas mesas; b) P/P_{cr} por deformação na alma

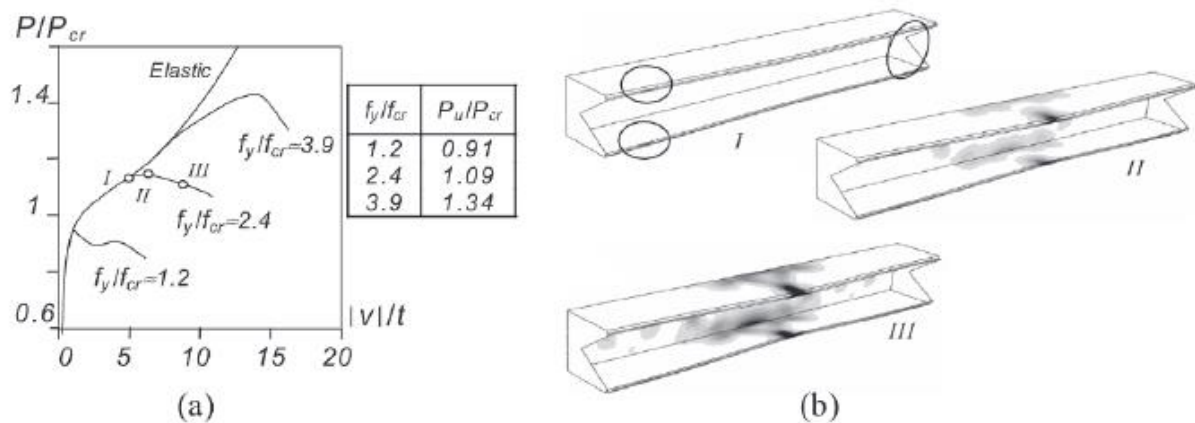


Fonte: Dinis e Camotim (2015)

Por fim, a Figura 2.6 mostra a curva de equilíbrio de uma seção rack considerando comportamento não linear elasto-plástico, considerando diferentes valores da relação carga de

tensão de escoamento (f_y) por tensão crítica (f_{cr}) e com a inserção de imperfeições geométricas com modo de flambagem puramente distorcional. Além disso, a figura mostra a evolução das deformações plásticas da seção para valor de $f_y/f_{cr}=2.4$.

Figura 2.6: a) Curva de equilíbrio de P_{cr} x Deformações na mesa b) Evolução da deformação plástica do elemento para $f_y/f_{cr}=2.4$



Fonte: Dinis e Camotim (2015), adaptado

A partir da figura 2.6 é possível observar que o comportamento elasto-plástico é influenciado pela relação f_y/f_{cr} . Para valores de f_y/f_{cr} próximos a 1, de acordo com Dinis e Camotim (2015), o escoamento ocorre quando a distribuição de tensão é uniforme, e leva a seção a um colapso frágil. Para os valores de f_y/f_{cr} iguais a 2,4 e 3,9, a distribuição de tensão no momento do escoamento é não uniforme, e não leva a estrutura a um colapso imediato, ocorrendo um aumento de resistência até um ponto limite, esse efeito é denominado *snap through*. A parte b) da Figura 2.6 mostra a evolução das deformações para o caso de $f_y/f_{cr} = 2.4$, e se observa que o escoamento se inicia nas extremidades das mesas e da alma. Posteriormente a plasticidade se espalha para as regiões de extremidade superior e inferior, onde ocorre um fechamento das mesas. Por fim, o colapso ocorre com o total escoamento da região de ligação das mesas e alma no meio da seção.

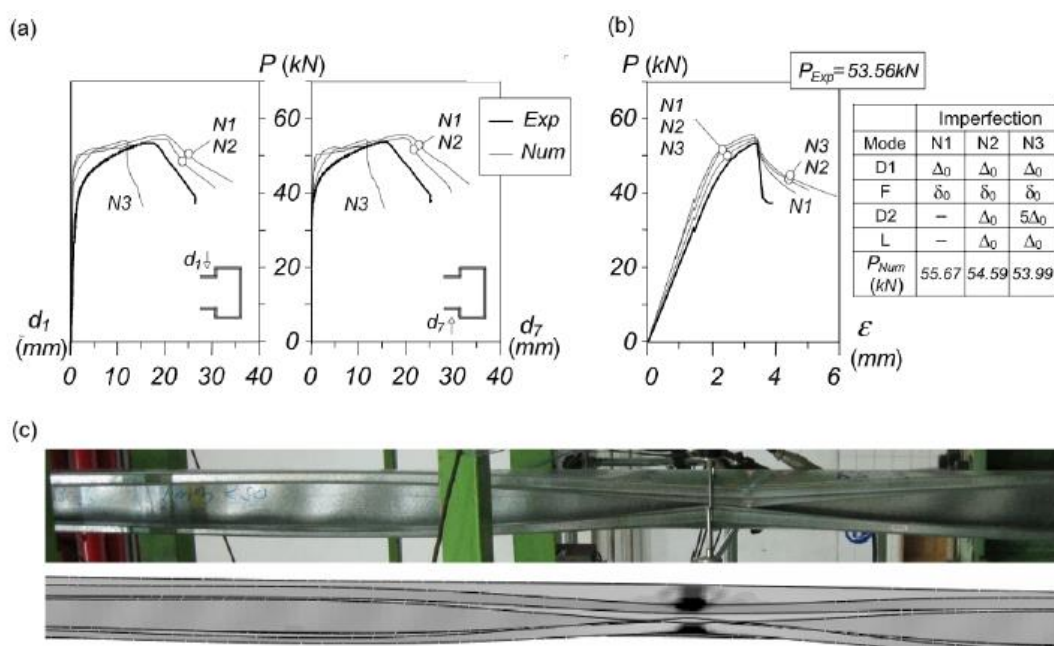
Existe um número menor de ensaios experimentais de colunas de PFFs com interação L-D se comparado as simulações numéricas desenvolvidas. De acordo com a revisão feita por Camotim et al. (2018), existem apenas 6 ensaios em protótipos com interação LDI, 42 protótipos ensaios com interação TI e 64 ensaios com interação SDI.

Dinis, Young e Camotim (2014) realizaram ensaios experimentais e simulações numéricas em colunas engastadas de seção rack com interação L-D. Foram ensaiadas 10

CAPÍTULO 2 – INTERAÇÃO ENTRE OS MODOS DE FLAMBAGENS EM PERFIS FORMADOS A FRIO

colunas com o R_{DL} variando entre 1,31 e 1,46. Os resultados dos testes experimentais incluíram medição das imperfeições geométricas, curvas de equilíbrio, cargas de ruptura e seus respectivos modos de falha. As deformações na estrutura foram medidas com 7 transdutores posicionados nas mesas e na alma. As simulações numéricas das colunas ensaiadas foram feitas com o software ABAQUS, onde as imperfeições geométricas consistiam de combinações de imperfeições locais, distorcionais e globais, sendo que os valores de imperfeição inseridos nos modelos foram obtidos nos ensaios experimentais. Foram determinados três tipos de imperfeições denominados N1, N2 e N3, gerando assim três modelos numéricos que foram comparados com os resultados experimentais. A Figura 2.7 mostra as comparações das curvas de equilíbrio e dos modos de falha obtidos experimentalmente e por simulações numéricas com os três tipos de imperfeições geométricas.

Figura 2.7: Comparação resultados numéricos e experimentais; a) Carga x Deslocamento nas almas; b) Carga x deslocamento axial; c) Configurações deformadas



Fonte: Dinis, Young e Camotim (2014)

A partir da Figura 2.7 é possível observar que a carga obtida numericamente pelas três imperfeições se aproxima do valor experimental. Além disso, a configuração deformada da simulação é parecida com a experimental.

2.2 INTERAÇÃO D-G

A interação D-G pode ser observada visualmente pela associação de deformações distorcionais e globais, sendo que as deformações globais são causadas pela flexão, torção ou flexo-torção.

A interação D-G ocorre da mesma maneira que a interação L-D, ou seja, ela pode ocorrer quando as cargas críticas de flambagem distorcional (P_{crD}) e global (P_{crG}) forem iguais ou próximas, esta interação também é denominada TI, com valor de R_{GD} próximo a 1, sendo que este coeficiente é calculado pela Equação 2.3

$$R_{GD} = \frac{P_{crG}}{P_{crD}} \quad (2.3)$$

A interação D-G também pode ocorrer quando os valores das cargas críticas não são próximos, e a carga de escoamento tem valor maior que as cargas críticas e permite o desenvolvimento de uma flambagem secundária. Caso o valor de R_{GD} seja maior que 1, a flambagem secundária é a global, sendo denominada de SGI (“*Secondary Global Interaction*”), e caso o valor de R_{DG} for menor que 1, a flambagem secundária é distorcional, e esta interação é denominada de SDI (“*Secondary Distortional Interaction*”).

Existe uma quantidade menor de ensaios experimentais e simulações numéricas em PFFs com interações do tipo D-G se comparado a interação L-D. A maioria destes estudos se referem a seções racks perfuradas de porta-pallets. As seções racks perfuradas são o foco deste trabalho, e os estudos experimentais e numéricos desses perfis serão mostrados no Capítulo 3.

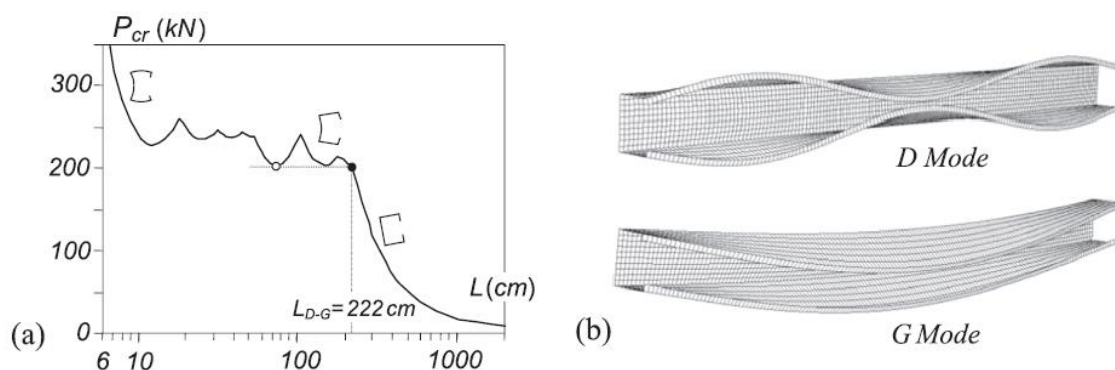
De acordo com a revisão feita sobre as interações entre as flambagens por Camotim et al. (2018), existe apenas um ensaio experimental em PFFs sem furos com interação D-G. O mesmo foi realizado por Anbarasu e Murugapandian (2016) em perfis WSLC. Neste estudo, foram ensaiados 15 protótipos sujeitos à compressão centrada e com condição de apoio simplesmente apoiada. Todas as colunas ensaiadas tiveram interação entre os modos de flambagem D-G, sendo que em relação ao modo global, 6 das colunas falharam em relação apenas a flexão, e as outras 9 colunas falharam em relação a flexo-torção.

Dinis e Camotim (2011) e Martins, Camotim e Dinis (2018) realizaram simulações numéricas via ABAQUS em PFFs com interação D-G. Enquanto que os primeiros simularam colunas com seção transversal do tipo C com condição simplesmente apoiada e com interação

D-G do tipo TI, os últimos realizaram simulações em colunas engastadas nas seções C, Z e WSLC englobando todos os tipos de interação D-G. De acordo Martins, Camotim e Dinis (2018), em relação à flambagem global, são esperados que as seções C e WSLC tenham torção em conjunto com flexão em torno do eixo de maior inércia, enquanto que para a seção Z, é esperado flexão em torno do eixo de menor inércia.

Dinis e Camotim (2011) e Martins, Camotim e Dinis (2018) seguiram os mesmos procedimentos feitos nos estudos com interação L-D em PFFs citados anteriormente. Inicialmente são realizadas análises de flambagem linear elástica para selecionar colunas com interação entre os modos de flambagem com o software GBTUL. A determinação das curvas de flambagem elástica para selecionar colunas com interação também podem ser feitas pelo método das faixas finitas utilizando o software CUFSM, ou pelo método dos elementos finitos com o software ABAQUS. A Figura 2.8 mostra a curva de flambagem elástica de um perfil C e também a configuração deformada desse perfil no comprimento de interação D-G.

Figura 2.8: a) Curva de flambagem elástica seção C; b) Configuração deformada no comprimento com interação D-G



Fonte: Camotim et al. (2018)

Pode ser observada na Figura 2.8 que a seção C possui interação D-G para um comprimento de 222 cm, comprimento onde as cargas críticas local e distorcional tem mesmo valor. Além disso, pode ser observada na parte b) da Figura 2.8 a configuração deformada da seção nesse comprimento, onde ocorrem deformações globais e distorcionais, caracterizando a interação D-G.

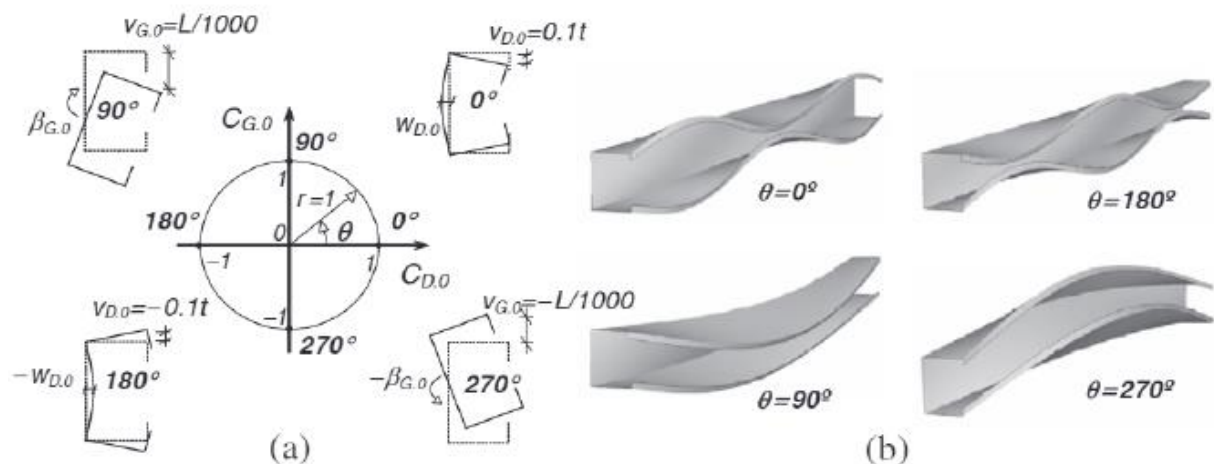
No caso da interação entre os modos de flambagem do tipo D-G, a imperfeição geométrica a ser inserida em um modelo numérico de elementos finitos para realização da análise não linear é uma combinação linear dos modos puros de flambagem distorcional e

global. A magnitude da imperfeição distorcional (v_D) considerada foi de $0,1t$ para seções C, e $0,94t$ para as seções Z e WSLC, enquanto que a magnitude da imperfeição global (v_G) escolhida foi de $L/1.000$ para todas as seções. As combinações lineares seguem a relação da Equação 2.4.

$$(C_G)^2 + (C_D)^2 = 1 \quad (2.4)$$

Sendo que, $C_D = \cos\theta$ e $C_G = \sin\theta$. A visualização das combinações das imperfeições fica mais visível a partir da criação de um círculo unitário mostrado na Figura 2.9, este círculo mostra as possibilidades de combinações de imperfeições geométricas

Figura 2.9: a) Representação das imperfeições geométricas para interação D-G b) Modos de flambagem para ângulos de 0° , 90° , 180° e 270°



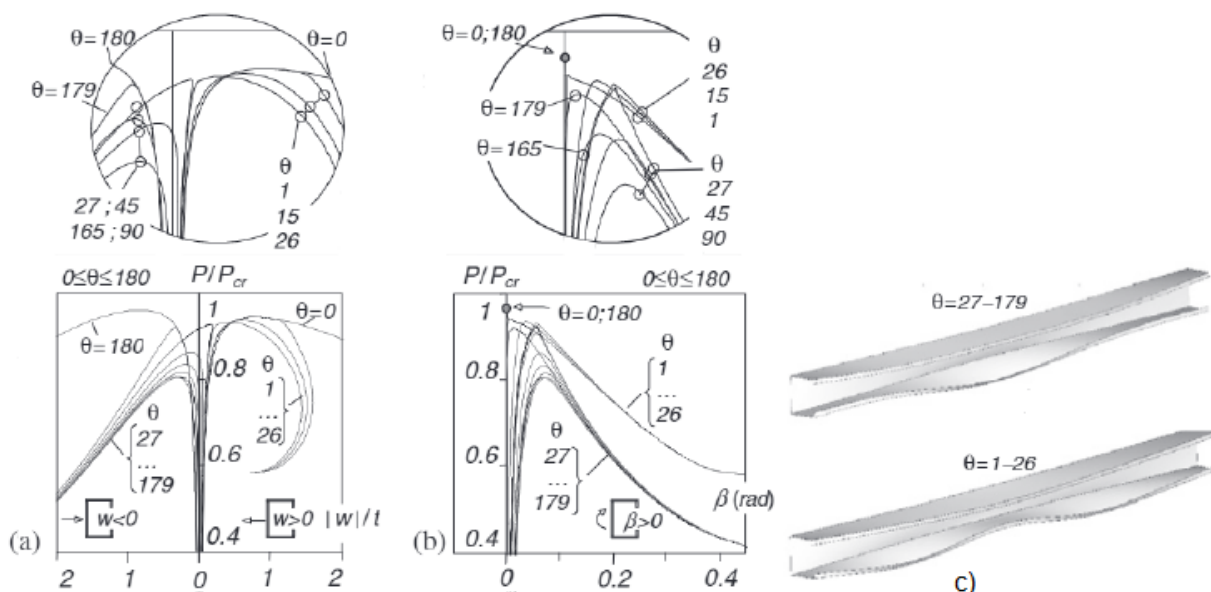
Fonte: Camotim e Dinis (2011)

A partir da Figura 2.9, é possível observar que para valores de $\theta=0^\circ$ ou 180° são utilizados modos de flambagem puramente distorcionais com magnitude de $0.1t$, e para valores de $\theta=90^\circ$ ou 270° , são utilizados modos de flambagem puramente globais, com valor de magnitude de $L/1000$. Para qualquer outro valor de ângulo, o valor da imperfeição será a combinação linear dos modos de flambagem global e distorcional, e os valores das magnitudes das imperfeições de cada modo de flambagem são determinadas a partir da Equação 2.4.

Após a seleção de colunas com interação, nos trabalhos de Dinis e Camotim (2018) e Martins, Camotim e Dinis (2018), foram realizadas análises elásticas não lineares, considerando um grande número de combinações de imperfeições geométricas, com o intuito de analisar o comportamento da estrutura e determinar qual imperfeição geométrica leva a coluna ao

comportamento mais crítico, com a menor resistência. A Figura 2.10 mostra as curvas de equilíbrio de comportamento elástico não linear para as seções C com condição simplesmente apoiada.

Figura 2.10: Curva de equilíbrio elástico não linear; a) P/P_{cr} por deformação na alma; b) P/P_{cr} por deformação devido a rotação; c) Configurações deformadas



Fonte: Dinis e Camotim (2011)

A partir da parte a) da Figura 2.10, é possível agrupar o comportamento da estrutura em três categorias que são: imperfeições puramente distorcionais ($\theta=0$ ou 180°), essas duas curvas possuem um comportamento diferente das demais. O segundo caso é para ângulos entre 1° e 26° , onde ocorre predominância de imperfeições distorcionais com abertura das mesas, e o último caso onde os ângulos variam entre 27° e 179° , que corresponde a todos os outros tipos de imperfeições. Dinis e Camotim (2011) acreditam que esses diferentes comportamentos ocorrem devido à ação da flambagem distorcional, sendo que o fechamento das mesas reduz o momento de inércia da peça, facilitando a ocorrência da flexão, e a abertura das mesas causa uma maior dificuldade para ocorrência da flexão. Logo, para ângulos entre 90 e 179° ocorre uma convergência de efeitos devido as flambagens distorcional e global, e para ângulos entre 1 e 90° as flambagens distorcional e global causam efeitos opostos.

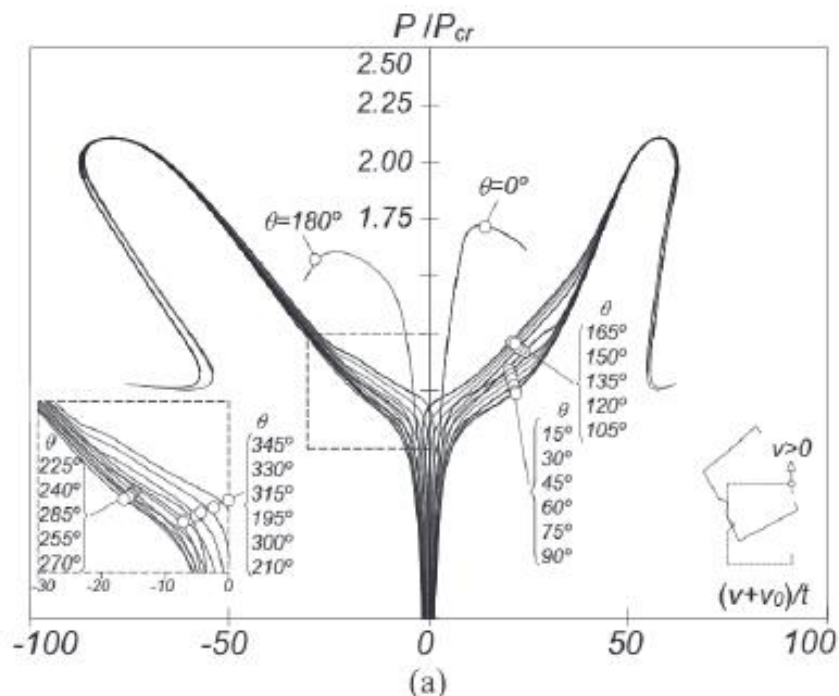
Por fim, os ângulos de 0° e 180° correspondem a imperfeições puramente distorcionais, e percebe-se nestes casos que a peça não apresenta torção, e apresenta as maiores cargas de ruptura. Essas colunas apresentam um tipo diferente de interação D-G, que envolve apenas

CAPÍTULO 2 – INTERAÇÃO ENTRE OS MODOS DE FLAMBAGENS EM PERFIS FORMADOS A FRIO

flexão em torno do eixo de menor inércia, e essa interação não ocorre devido à proximidade das cargas críticas distorcional e global, mas devido a mudanças horizontais do centroide da seção transversal da coluna, assim, o carregamento fica excêntrico e ocorre a flexão em torno do eixo menor inércia da peça.

A Figura 2.11 mostra curvas de comportamento elástico não linear da seção transversal do tipo WSLC totalmente engastada com R_{GD} igual a 1, e considerando várias combinações de imperfeições geométricas. O comportamento da peça também pode ser dividido em 3 tipos, sendo as curvas com $\theta=0^\circ$ ou 180° que contém imperfeições puramente distorcionais, e outras duas curvas com θ variando entre 15° e 165° e entre 195° e 345° . Para os dois últimos casos ocorre flexo-torção juntamente com deformações distorcionais. Para ângulos de 0° e 180° , o perfil se comporta de maneira diferente, e a interação D-G não ocorre devido à proximidade das cargas críticas distorcional e global, sendo que a flambagem distorcional interage com a flexão em torno do eixo de menor inércia em vez de ocorrer flexo-torção.

Figura 2.11: Curva de equilíbrio elástico não linear de P/P_{cr} por deformação nas mesas;

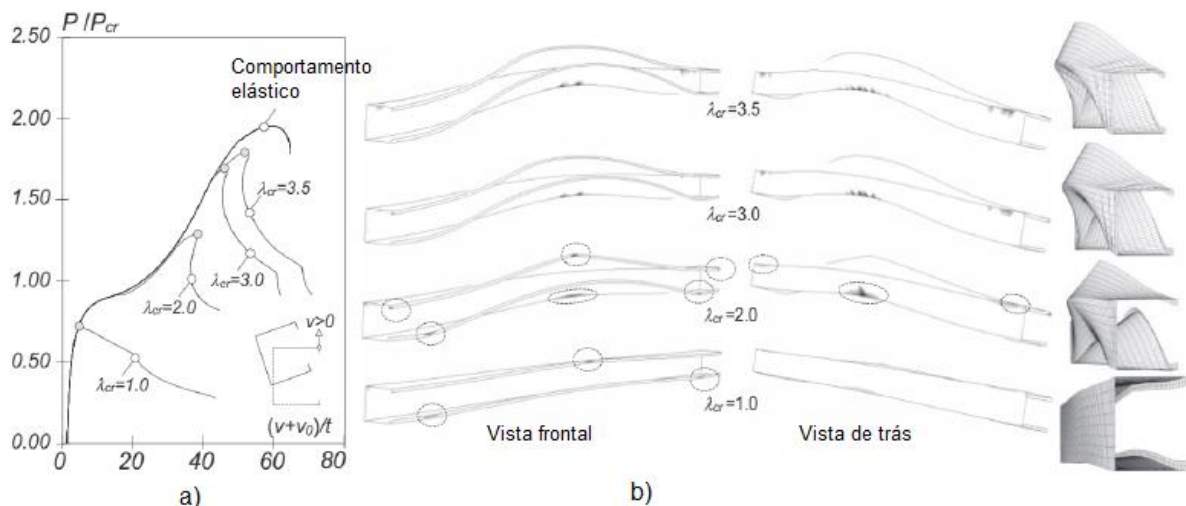


Fonte: Martins, Camotim e Dinis (2018)

Nos estudos de Dinis e Camotim (2011) e Martins, Camotim e Dinis (2018), as imperfeições com modos de flambagem puramente globais são consideradas os casos mais

críticos, que levam à estrutura a menor carga de ruptura. Posteriormente, os mesmos autores determinaram curvas de equilíbrio não linear com comportamento elásto-plástico das seções estudadas, considerando no modelo imperfeições geométricas com modos de flambagem puramente globais. A Figura 2.12 mostra a curva equilíbrio não linear com comportamento elasto-plástico de uma seção WSLC considerando vários valores de carga de escoamento (f_y), com condição de apoio totalmente engastada e $R_{GD}=1$. Além disso, na mesma figura, são mostradas as configurações deformadas do elemento considerando várias tensões de escoamento.

Figura 2.12: a) Curva de comportamento elasto-plástico nas mesas b) Deformação plástica para diversos f_y/f_{cr}



Fonte: Martins, Camotim e Dinis (2018), adaptado

Pela Figura 2.12.a), é possível perceber que para valores de $\lambda_{cr}=1$, ocorre colapso brusco após o escoamento do topo do canto da mesa como mostra a parte b) da Figura 2.12. Para valores de $\lambda_{cr}=2$, existe uma reserva de resistência após a flambagem, e o colapso ocorre na região inferior do canto mesa-alma. Além disso, as colunas WSLC exibem deformações distorcionais em conjunto com a flexo-torção desde os estágios iniciais.

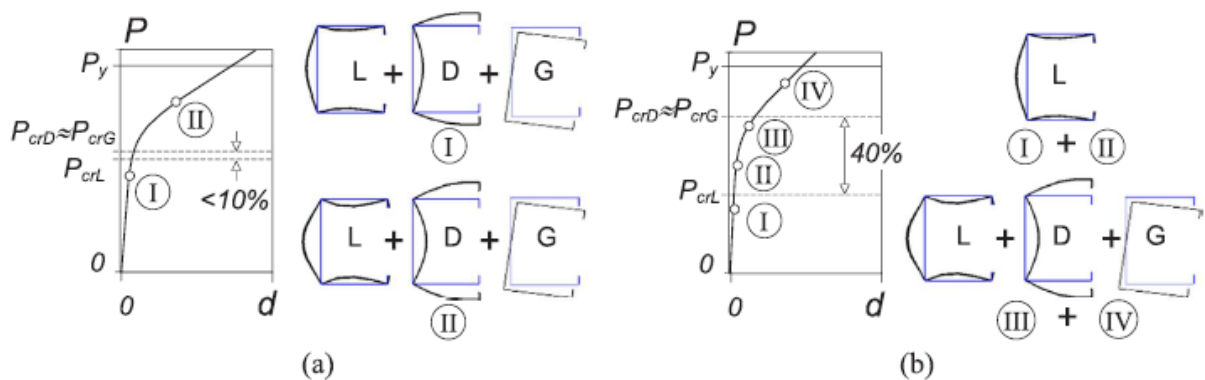
Em relação as interações entre flambagens secundárias, de acordo com Martins, Camotim e Dinis (2018), o caso SGI é mais provável que ocorra devido à maior reserva de resistência pós flambagem do caso distorcional se comparado ao global. No entanto, segundo os autores, colunas longas dos perfis C e WSLC apresentam uma reserva pós flambagem global

significativa e é possível ocorrer à interação D-G do tipo SDI. No caso, das seções Z, devido à baixa reserva de resistência global, a flambagem SDI não ocorre.

2.3 INTERAÇÃO L-D-G

A interação entre flambagens do tipo L-G-D ocorre quando os valores das cargas críticas de flambagem local, distorcional e global forem iguais ou tiveram valores próximos, sendo que essa interação é denominada de TI. Esta interação também pode ocorrer quando uma flambagem tem valor de carga crítico abaixo das demais e a tensão de escoamento tem valor tão alto que permite que as flambagens secundárias se desenvolvam. No entanto, de acordo com Dinis et al. (2012), no caso da interação secundária, a flambagem crítica mínima não pode ser global, pois essa flambagem possui a menor reserva de resistência pós flambagem e não permite o desenvolvimento de uma flambagem secundária. A flambagem local é a que mais possui reserva de resistência, logo, os efeitos da interação secundária são mais pronunciados quando o valor da flambagem local é o menor. A Figura 2.13 mostra a evolução das flambagens nos casos de interação TI e da evolução da interação de flambagens secundárias.

Figura 2.13: a) Curva de equilíbrio elástico de interação do tipo TI, b) Curva de equilíbrio para interação com flambagem secundária.



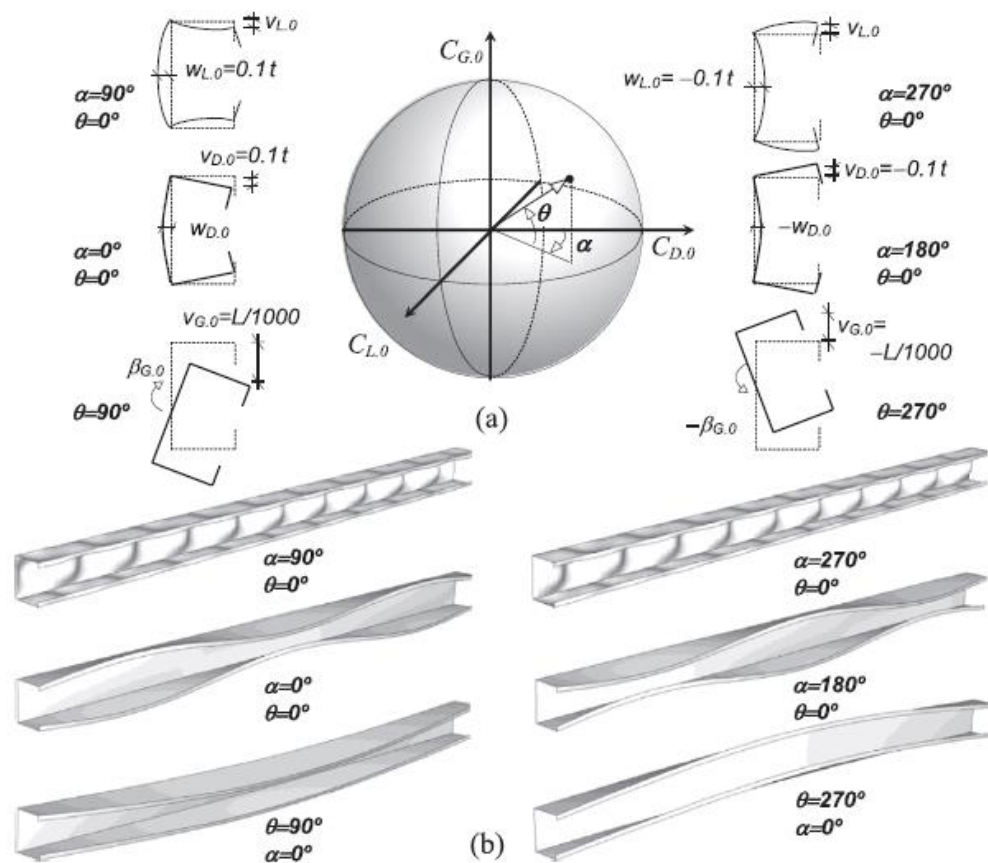
Fonte: Camotim et al. (2018)

As imperfeições geométricas para o caso de interação L-D-G podem inseridas em modelos numéricos com a mesma metodologia que no caso das interações L-D e D-G. Neste caso, a imperfeição geométrica será uma combinação linear dos três modos puros de flambagens atuantes. De acordo com Camotim e Dinis (2011), o valor adotado da magnitude das imperfeições local (w_L) e distorcional (v_L) pode ser 0,1t e L/1.000 para imperfeição global

(v_G). A combinação linear deve seguir a relação da Equação 2.5, sendo que neste caso, diferente dos outros dois tipos de interação, são necessários dois ângulos para definir a combinação das imperfeições (θ, α), e a esfera da Figura 2.14 exemplifica como as combinações de imperfeições podem ser feitas.

$$C_L^2 + C_D^2 + C_G^2 = 1 \quad (2.5)$$

Figura 2.14: a) Representação das imperfeições geométricas para interação L-D-G
b) Deformadas dos modos de flambagem puros



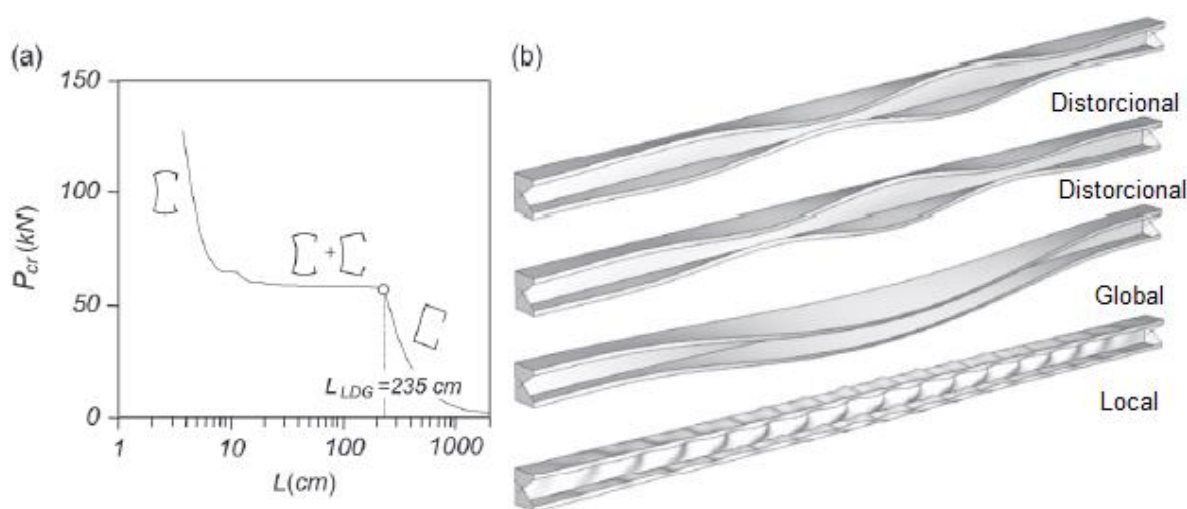
Fonte: Camotim e Dinis (2011)

Neste caso, de acordo com a Figura 2.14, a imperfeição geométrica será determinada a partir de um modo de flambagem puramente local se $\theta=0$, e se $\alpha=90^\circ$ ou 270° , a imperfeição será determinada a partir de um modo puramente distorcional se $\theta=0$, e se $\alpha=0^\circ$ ou 180° , e por fim, a imperfeição será determinada por um modo puramente global se $\alpha=0^\circ$, e $\theta=90^\circ$ ou 270° . Para outros valores de ângulos, a imperfeição a ser inserida no modelo será uma combinação

dos três modos de flambagem, e a magnitude da imperfeição de cada modo é determinado pela Equação 2.5.

Todos os trabalhos numéricos e experimentais sobre interação L-G-D seguem os mesmos métodos utilizados nas interações L-D e D-G, onde é utilizado o software GBTUL para selecionar colunas com interação. A Figura 2.15 mostra a utilização deste método para seleção das colunas com interação L-G-D e as respectivas configurações deformadas.

Figura 2.15: a) Curvas de flambagem elástica para seleção de colunas com interação L-G-D; b) Modos de flambagem local, distorcional e global

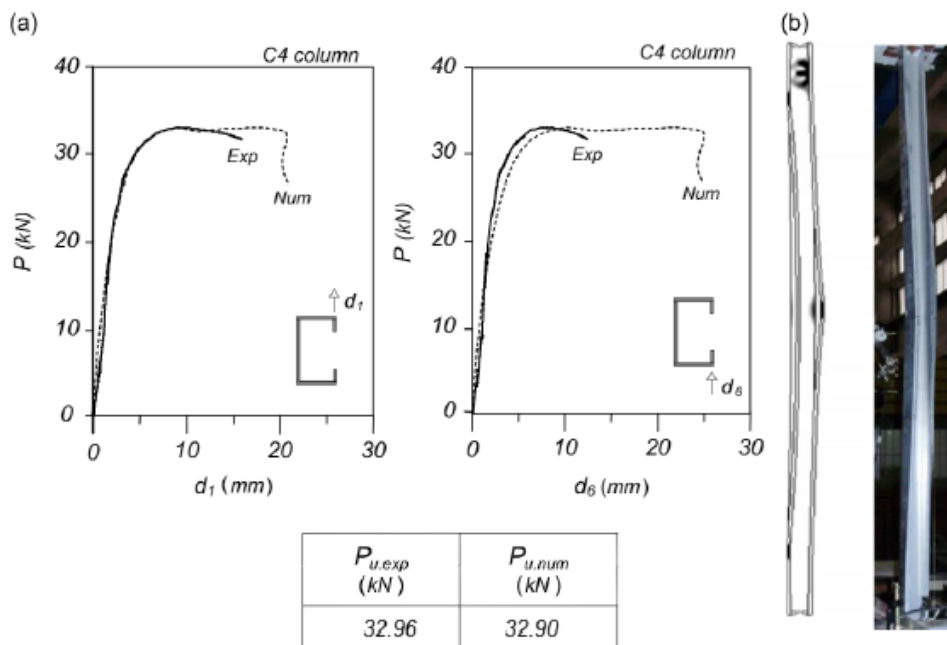


Fonte: Dinis et. al (2012), adaptado

Santos, Batista e Camotim (2012) conduziram uma investigação experimental em seções C engastadas com interação L-G-D. As colunas foram selecionadas via GBTUL, com intuito de garantir que as cargas críticas local, distorcional e global possuíssem valores praticamente iguais. Os autores conduziram os ensaios na Universidade Federal do Rio de Janeiro, onde foram ensaiados 12 protótipos. O principal objetivo deste estudo era conseguir evidências experimentais da interação L-G-D. Para esse fim, os resultados experimentais consistiam em determinação das imperfeições geométricas, determinação das curvas de equilíbrio obtidas através de medições das deformações do elemento, valores das cargas de ruptura e das respectivas configurações deformadas e dos mecanismos de colapso. Os autores não conseguiram observar ou medir em nenhum estágio do processo evidências de deformações locais, todas as colunas apresentaram a interação entre a flambagem simétrica distorcional e global com flexo-torção.

Dinis et al. (2012) validaram numericamente via ABAQUS os experimentos conduzidos por Santos, Batista e Camotim (2012). Nas simulações numéricas, os autores consideraram o elemento como completamente engastado, com exceção dos deslocamentos axiais no ponto de aplicação da carga, e as imperfeições geométricas consideradas foram aquelas medidas no ensaio experimental. A Figura 2.16 mostra a comparação entre os deslocamentos nas mesas, as configurações deformadas e as cargas de ruptura determinados experimentalmente e por meio do software ABAQUS.

Figura 2.16: Comparação resultados experimentais e numéricos; a) Curvas de carga x deformação b) Configurações deformadas



Fonte: Dinis et al. (2012)

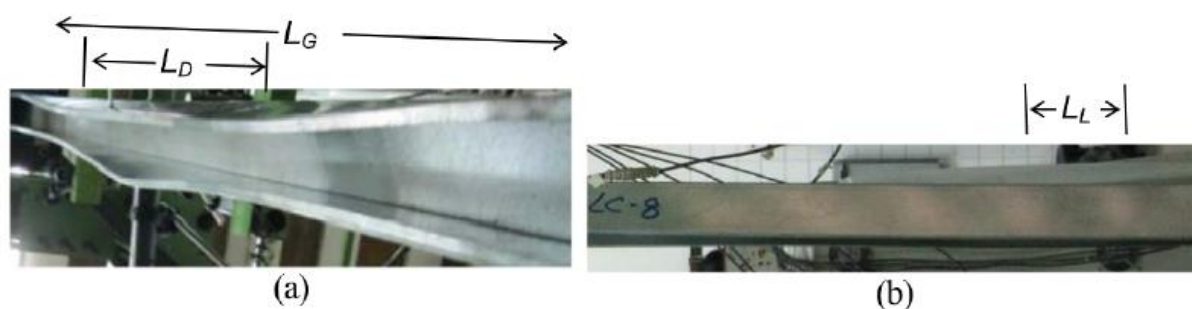
A partir da Figura 2.16 e de outros resultados contidos no trabalho, foi possível observar que os resultados numéricos e experimentais obtiveram uma boa correlação. Por fim, assim como nos experimentos conduzidos por Santos, Batista e Camotim (2012), nas simulações numéricas também não foram obtidas evidências de deformações locais, e todos os elementos obtiveram combinações de flambagem distorcional e global.

Santos et al. (2014) conduziram outra investigação experimental em 16 colunas de perfis C engastados com interação L-G-D na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Após os ensaios experimentais, foram conduzidas simulações numéricas por meio do software ABAQUS para validação dos resultados. Foram ensaiados três tipos de colunas com vários níveis de interação

L-G-D, possuindo as seguintes relações de carga crítica: $P_{crG} > P_{crL} \cong P_{crD}$, $P_{crG} \cong P_{crL} \cong P_{crD}$ OU $P_{crG} < P_{crL} \cong P_{crD}$. As colunas também apresentaram apenas interação do tipo D-G, não ocorrendo evidências de deformações locais, como no trabalho de Santos, Batista e Camotim (2012). Os autores acreditam que a falta de deformações locais ocorreu devido a imperfeições globais altas ou por não garantir a condição engastada nas colunas, pois em ensaios semelhantes feitos por outros autores, foram identificadas deformações locais.

Young, Dinis e Camotim (2018) realizaram investigações experimentais em seções C engastadas com vários níveis de interação L-G-D, onde foram ensaiadas 17 colunas na Universidade de Hong Kong. A seleção de colunas foi feita via GBTUL, sendo determinado previamente que a carga crítica mínima não fosse global. Para garantir vários níveis de interação L-G-D, as relações entre carga crítica máxima por carga crítica mínima e carga de escoamento por carga crítica máxima seguiam as relações de $1,39 \geq P_{cr,max}/P_{cr,min} \leq 1,10$ e $3,04 \geq P_y/P_{cr,max} \leq 1,43$ respectivamente, ou seja, não é esperado que a interação ocorra pela proximidade das cargas críticas, mas sim pelo aparecimento das flambagens secundárias devido ao alto valor da carga de escoamento. A partir dos resultados experimentais, em todos os protótipos se observou a falha pela interação entre os modos de flambagem L-G-D, diferentemente dos trabalhos de Santos, Batista e Camotim (2012) e Santos et al. (2014), onde não foram observadas deformações locais. A Figura 2.17 mostra evidências das deformações locais, globais e distorcionais em um dos protótipos.

Figura 2.17: Evidências experimentais da interação L-G-D

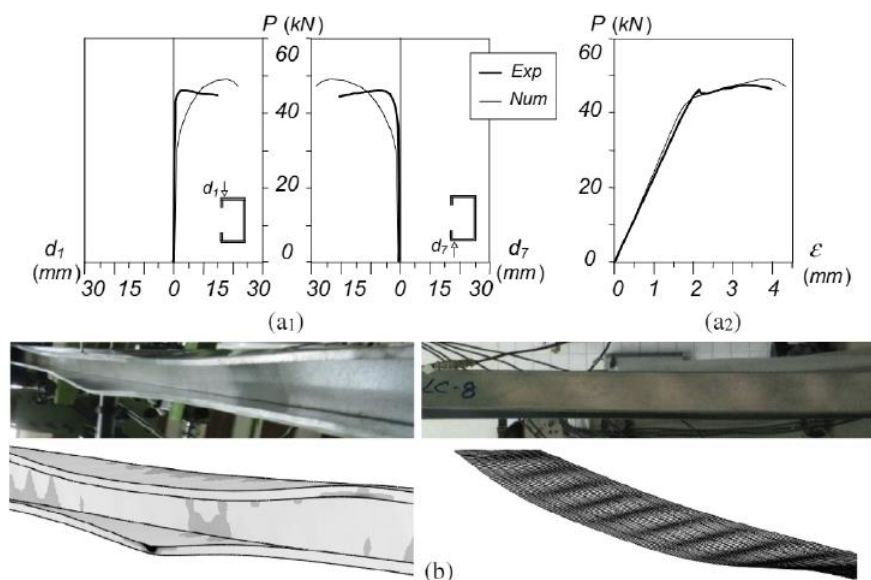


Fonte: Young, Dinis e Camotim (2018)

Como mostrado na Figura 2.17, as deformações locais foram observadas nos ensaios, no entanto, elas não foram tão pronunciadas se comparado as deformações distorcionais e globais, e na maioria dos casos elas surgiram na fase elástica e não permaneceram visíveis depois que a carga foi removida.

Dinis et al. (2018) validaram numericamente via ABAQUS os experimentos de Young, Dinis e Camotim (2018), e também realizaram um estudo paramétrico com cerca de 368 simulações numéricas para verificar a qualidade do MRD para a interação L-G-D. Para inserção de imperfeições geométricas no modelo numérico, foram usados valores de imperfeição medidos no ensaio experimental. Foram considerados 5 tipos de combinações de imperfeições, denominados N1 (puramente distorcional), N2 (flexo-torção), N3 (flexão), N4 (distorcional + flexo-torção) e N5 (distorcional + flexão). A imperfeição N5 foi considerada a que melhor se aproximou do resultado experimental, a Figura 2.18 mostra a comparação entre as curvas de equilíbrio e configurações deformadas obtidas numericamente e experimentalmente.

Figura 2.18: Comparação resultados numéricos e experimentais; a1) Carga x deformação na alma; a2) Carga x deformação axial; c) Configurações deformadas



Fonte: Dinis et al. (2018)

CAPÍTULO 3

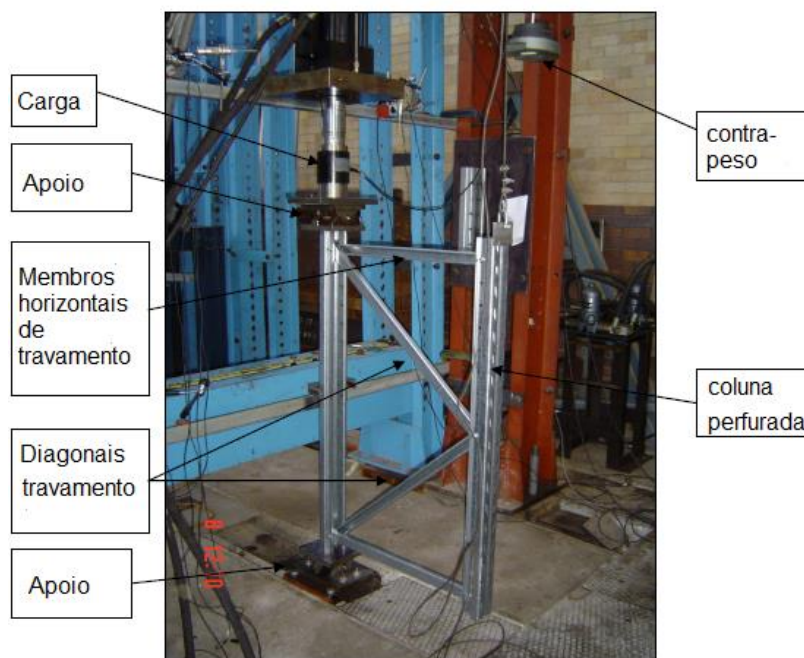
SEÇÕES RACK PERFURADAS

3.1 ESTUDOS DE SEÇÕES RACK PERFURADAS SUJEITAS À COMPRESSÃO

A primeira etapa para o dimensionamento de colunas é a determinação da carga de ruptura devido à compressão centrada. No caso de perfis racks perfurados, as normas de dimensionamento de sistemas de estocagem denominadas EN 15512:2009, AS/NSZ 4084:2012 e RMI (2012) requisitam que sejam feitos ensaios experimentais para o dimensionamento dessas peças, ou seja, nenhuma solução analítica ainda foi aceita. Diversas pesquisas vêm sendo conduzidas para buscar um melhor entendimento do comportamento destas estruturas e prever sua capacidade de carga por meio de ensaios experimentais e simulações numéricas.

Freitas, Freitas e Souza (2005) realizaram ensaios experimentais e simulações numéricas via MEF em colunas curtas perfuradas. O modelo numérico foi feito pelo software de elementos finitos denominado ANSYS, e a capacidade de carga foi determinada a partir de uma análise não linear física e geométrica das colunas. O objetivo do estudo era determinar a influência das imperfeições geométricas, perfurações e das propriedades físicas do material no modelo numérico. Os resultados obtidos com a simulação numérica foram comparados com os experimentais e com a norma americana de seções rack.

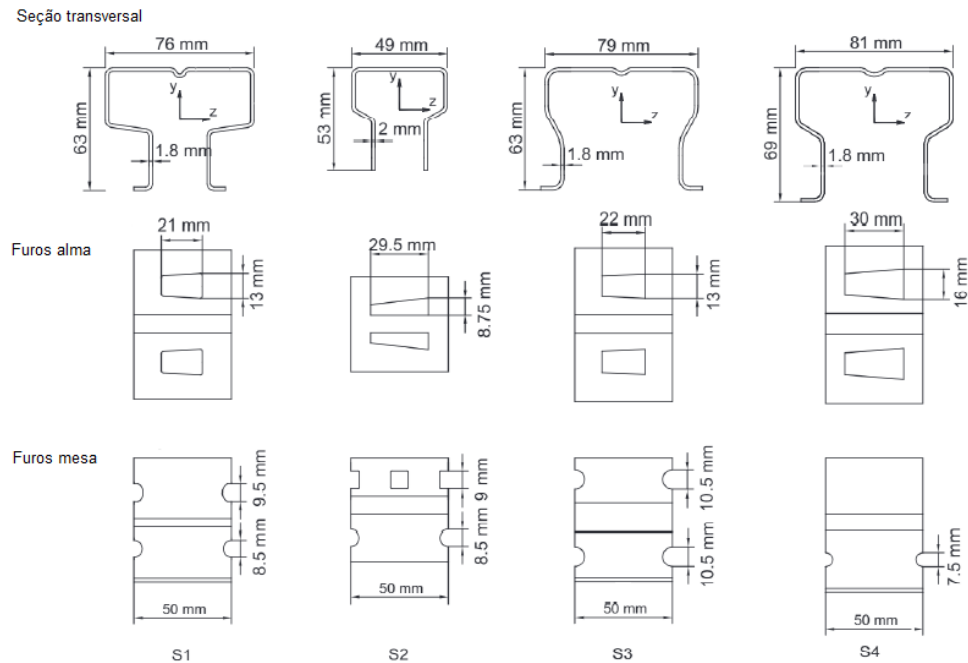
Koen (2008) realizou ensaios experimentais e simulações numéricas via MEF em colunas curtas e também em painéis contra ventados de um sistema de estocagem, este último é composto por duas colunas de seção rack que são ligadas por elementos diagonais e horizontais de travamento, como mostra a Figura 3.1. Os perfis utilizados são chamados de ultraleves, pois tem espessura menor ou igual a 1 mm.

Figura 3.1: Composição dos ensaios de Koen (2008)

Fonte: Koen (2008), adaptado

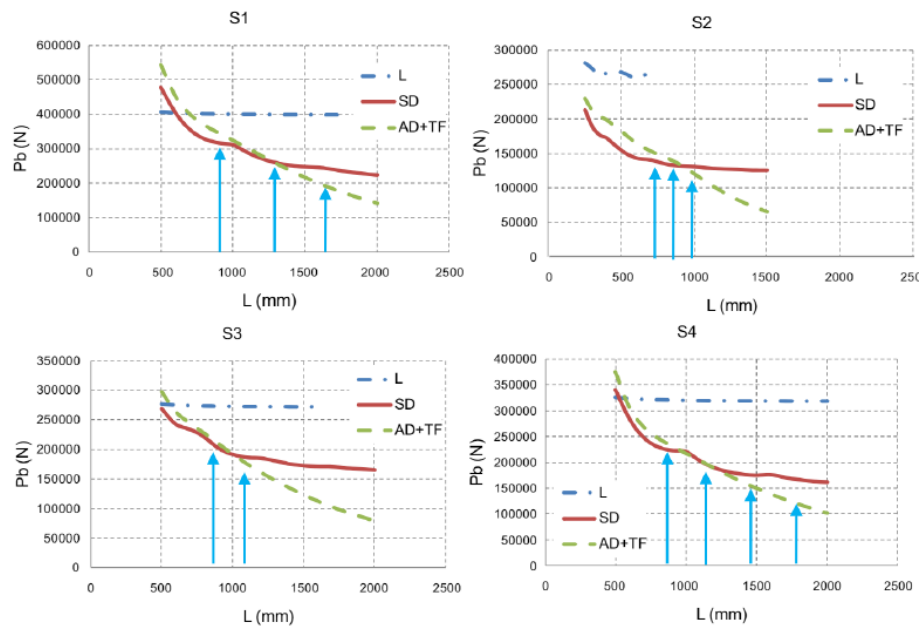
Roure et al. (2011) realizaram ensaios experimentais na Escola de Engenharia de Barcelona (UPC) em 20 tipos de colunas curtas. Os resultados foram comparados com dois métodos alternativos de dimensionamento, o primeiro é um método analítico proposto pela norma EN 1993-1-3:2006, e o segundo o método dos elementos finitos. Os autores concluíram que mesmo que a norma EN 15512:2009 determine que devam ser feitos ensaios experimentais para o dimensionamento de seções rack perfuradas, os métodos utilizados neste estudo se aproximam dos valores experimentais, e podem ser boas ferramentas nos estágios de dimensionamento das estruturas.

Casafont et al. (2011) estudaram o comportamento da flambagem distorcional em colunas de perfis rack perfurados. Foram ensaiadas experimentalmente 4 tipos de colunas na Universidade Politécnica da Catalunha, que são mostrados na Figura 3.2. A seleção dos comprimentos das colunas foi feita com base nos resultados de uma análise de flambagem linear elástica via MEF. Foram escolhidos dois tipos de condições de contorno, a primeira totalmente engastada e a segunda apoiada em relação à flexão e fixa em relação à torção.

Figura 3.2: Tipos de seções rack ensaiadas na Universidade Politécnica da Catalunha

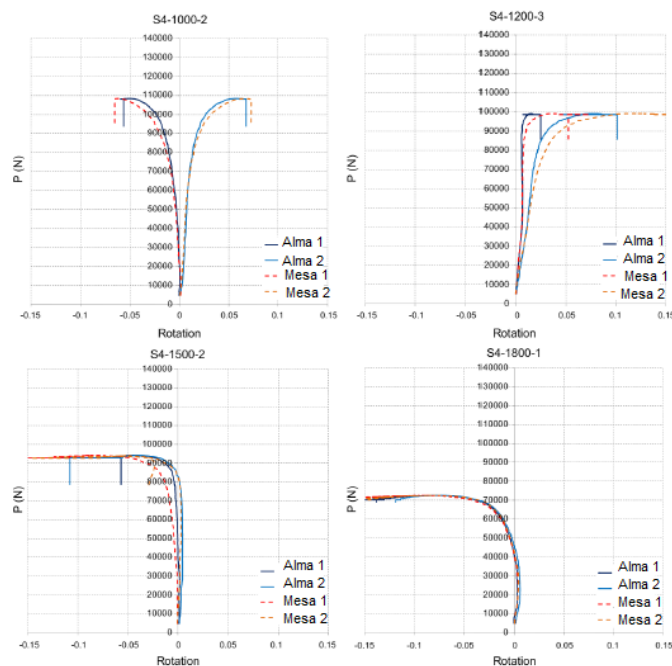
Fonte: Casafont et al. (2011), adaptado

Para as seções engastadas foram escolhidos comprimentos onde ocorre a transição entre os modos de flambagem distorcional e global. A Figura 3.3 mostra as curvas com flambagens elásticas feita via MEF para as seções engastadas, onde L significa flambagem local, SD flambagem simétrica distorcional e (AD + TF) significa a combinação das flambagem global com flexo-torção e antissimétrica distorcional, sendo que as flechas indicam os comprimentos escolhidos para ensaios experimentais. Devido à escolha desse comprimento, grande parte dos protótipos apresentou interação entre as flambagens D-G. Para as seções apoiadas foram escolhidos comprimentos variando entre a flambagem distorcional dominante até comprimentos com flambagem global dominante.

Figura 3.3: Curvas de flambagem elástica para as seções engastadas via MEF

Fonte: Casafont et al. (2011), adaptado

Para investigar o comportamento das colunas ensaiadas, Casafont et al. (2011), posicionaram dois transdutores nas mesas e dois na alma para medir as rotações da seção, e a partir desses valores geraram curvas de equilíbrios para os perfis, como mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4: Curvas de carga por rotação para as seções apoiadas

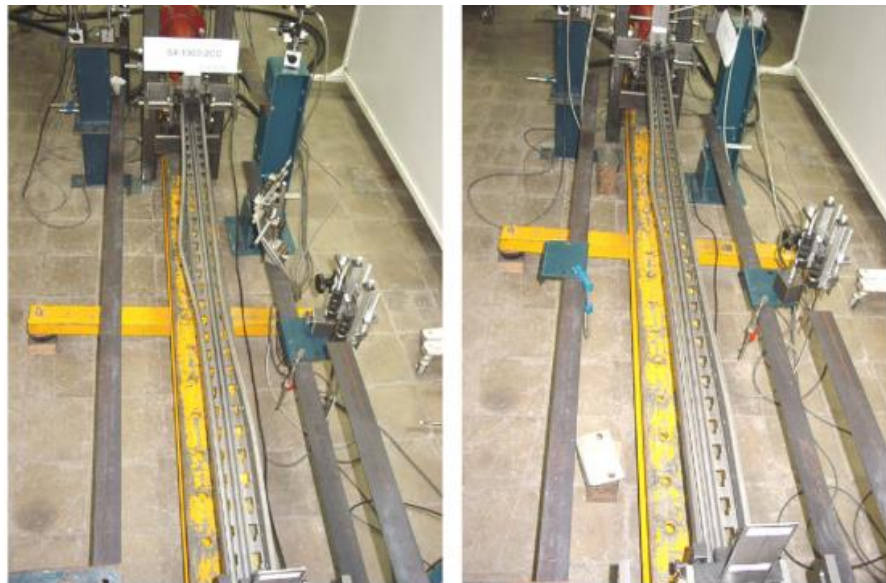
Fonte: Casafont et al. (2011), adaptado

A partir destas curvas os autores definiram para as seções apoiadas 3 tipos de modos de falha, que são:

- 1) Flambagem Distorcional dominante para comprimentos entre 600 mm e 1000 mm, onde as rotações são praticamente simétricas em relação ao eixo vertical, indicando flambagem distorcional simétrica;
- 2) Flambagem Global dominante para comprimentos maiores que 1800 mm, neste caso as quatro rotações são praticamente iguais;
- 3) Interação entre as Flambagens Distorcional e Global, com comprimentos variando entre 1200 mm e 1500 mm.

A Figura 3.5 mostra os modos de falha para colunas apoiadas com comprimentos de 1500 mm e 1800 mm, onde as colunas sofreram interação entre os modos de flambagem distorcional e global com flexo-torção.

Figura 3.5: Colunas com interação entre os modos de flambagens D-G



Fonte: Casafont et al. (2011)

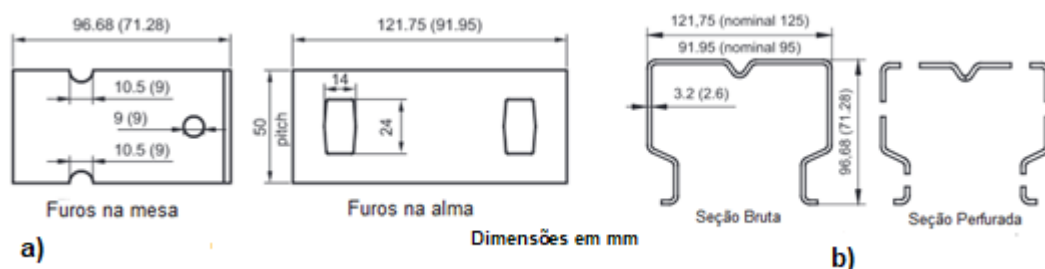
Como para as seções engastadas, os comprimentos de colunas foram escolhidos onde ocorria a transição entre as flambagens, as mesmas apresentavam o modo de falha tipo 3, ocorrendo interação entre as flambagens. Casafont et al. (2011), compararam os resultados obtidos dos ensaios experimentais com os métodos de dimensionamento propostos pelas codificações RMI (2008) e EN 15512:2009.

A norma EN 15512:2009 determina que sejam feitos dois tipos de ensaios em colunas de perfis rack perfurados, devem ser feitos ensaios em colunas curtas para se determinar a influência dos furos na flambagem local, e também ensaios em protótipos cujo comprimento da coluna é igual à distância entre dois nós sistema, este teste tem como objetivo determinar os efeitos da flambagem distorcional. No entanto, em alguns casos, protótipos com comprimento igual à distância entre dois nós podem sofrer flambagem global ou a interação entre as flambagens do tipo D-G em vez da flambagem distorcional. Devido a este problema, Crisan, Ungureanu e Dubina (2012a) realizaram os ensaios experimentais determinados pela normatização, e também realizaram mais dois ensaios complementares para investigação do comportamento dos perfis. Resumindo, os autores realizaram ensaios em 4 tipos de colunas, que foram:

- Ensaio em colunas curtas, requerido pela norma EN15512:2019, onde o comprimento da coluna deve ser três vezes maior que qualquer espessura da seção, e que o perfil tenha pelo menos 5 linhas de furos;
- Ensaio requerido pela EN15512:2019 para verificar a flambagem distorcional da coluna, cujo comprimento da coluna deve ser a distância entre dois nós do sistema;
- Ensaio adicional onde o comprimento da coluna é determinado utilizando análise linear elástica de flambagem, selecionando comprimentos com modo distorcional dominante;
- Ensaio adicionais em colunas com interação D-G.

A Figura 3.6 mostra o tipo de perfil ensaiado e o posicionamento dos furos, sendo que foram ensaiados perfis com e sem furos para comparação de resultados

Figura 3.6: a) Posicionamento dos furos b) Tipo de seção rack ensaiada



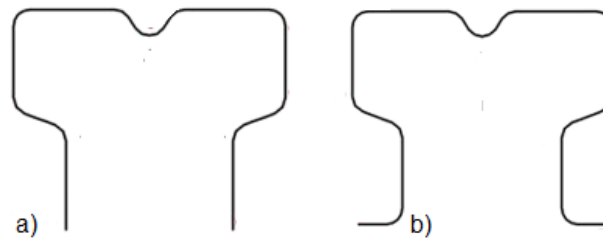
Fonte: Crisan, Ungureanu e Dubina (2012a), adaptado

Como esperado por Crisan, Ungureanu e Dubina (2012a), os ensaios feitos em colunas com comprimento igual à distância entre dois nós do sistema não são caracterizados pela flambagem distorcional, pois parte dos perfis apresentou flambagem global ou interação entre as flambagens ao invés da flambagem distorcional. Além disso, os procedimentos da norma EN 15512:2009 para o dimensionamento destes perfis perfurados não levam em conta a interação entre as flambagens do tipo D-G, podendo influenciar no dimensionamento do elemento. Para avaliar e calcular essa interação entre os modos de flambagem, Crisan, Ungureanu e Dubina (2012a) aplicaram o método denominado “*Erosion of Critical Bifurcation Load*” (ECBL), que já foi utilizado para determinação da capacidade de carga em elementos que possuam a interação entre as flambagens L-G.

Crisan, Ungureanu e Dubina, (2012b) realizaram simulações numéricas dos experimentos realizados por Crisan, Ungureanu e Dubina (2012a) para validação dos resultados. As simulações foram realizadas via software ABAQUS. As colunas foram consideradas apoiadas, sendo que a para extremidade inferior, os três deslocamentos e a rotação em torno do eixo longitudinal foram restringidos, enquanto que as rotações sobre os eixos de maior e menor inércia foram liberadas. Na extremidade de aplicação de carga, o deslocamento e a rotação no eixo longitudinal foram restringidos e as outras condições foram liberadas. A partir dos dois estudos de Crisan, Ungureanu e Dubina (2012a, 2012b), foi confirmado experimentalmente e por simulações numéricas que a interação entre as flambagens D-G diminui significativamente a capacidade de carga da seção, e o método ECBL pode ser utilizado para calcular essa interação.

Trouncer e Rasmussen (2014) realizaram ensaios experimentais em perfis racks perfurados com seção ultraleve de 1 mm de espessura sujeitos à compressão centrada. O objetivo desta pesquisa era estudar o comportamento de perfis com interação entre as flambagens do tipo L-G-D, tentando garantir que as flambagem local e distorcional ocorressem antes que a global iniciasse. Foram selecionados 2 tipos de seções transversais, mostrados na Figura 3.7, e vários comprimentos, totalizando 16 ensaios, que foram realizados na Universidade de Sidney.

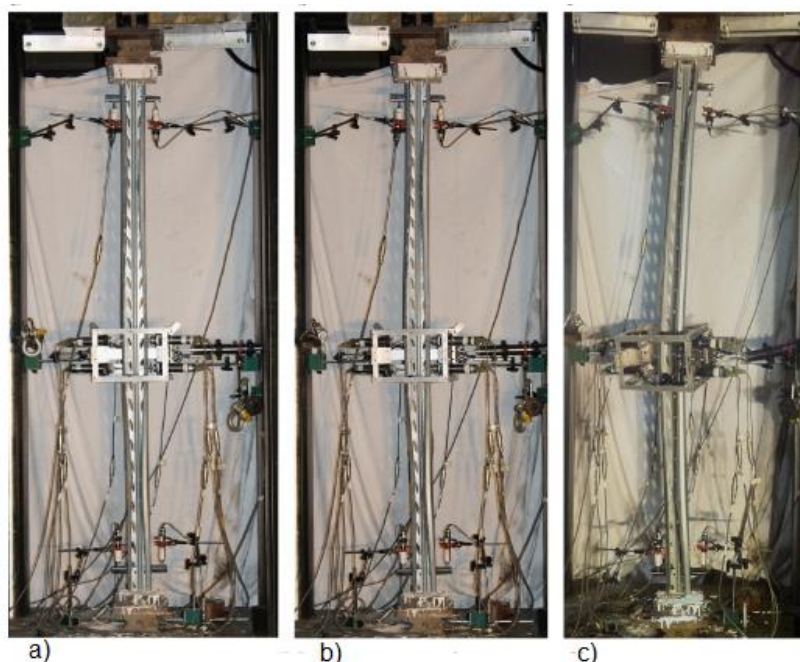
Figura 3.7: Seções ensaiadas na Universidade de Sidney; a) Seção sem mesa adicional b) Seção com mesa adicional



Fonte: Trouncer e Rasmussen (2014), adaptado

Devido a extrema importância das imperfeições geométricas no comportamento dos PFFs, Trouncer e Rasmussen (2014) realizaram uma determinação minuciosa das imperfeições geométrica dos perfis ensaiados. Todos os protótipos ensaiados apresentaram flambagem global com flexo-torção como modo dominante, no entanto, os perfis também apresentaram interação L-D antes que a flambagem global se tornasse dominante, caracterizando a interação L-D-G. A Figura 3.8 mostra a evolução das deformações de um perfil, onde é possível perceber que o perfil sofre interação L-D antes da carga de ruptura, e posteriormente seu modo de falha é governado pela flambagem global com flexo-torção. Os autores posicionaram transdutores na seção para medirem deformações axiais, locais, distorcionais e globais e confirmar por meio das curvas de equilíbrio evidências das interações entre as flambagens.

Figura 3.8: Evolução das deformações; a) Interação L-D b) Carga de ruptura; c) Modo de falha global

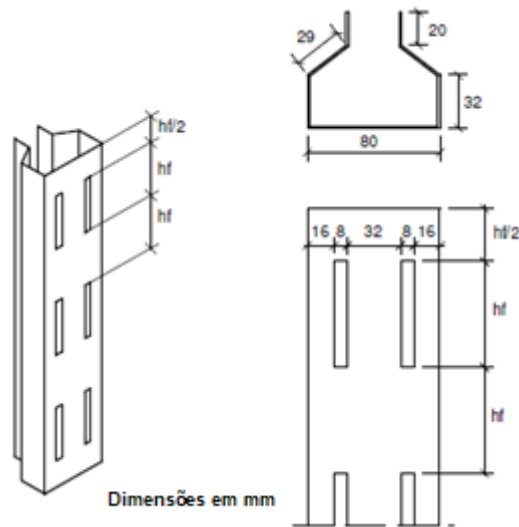


Fonte: Truncer e Rasmussen (2014), adaptado

Com base ensaios experimentais de Truncer e Rasmussen (2014), os autores avaliaram as especificações de dimensionamento de três códigos internacionais de sistemas de armazenagem, que são a norma europeia denominada EN 15512:2009, a norma Americana denominada RMI:2012 e o código Australiano chamado de AS/NSZ 4084:2012. A partir das curvas de dimensionamento da capacidade dos elementos gerados pelos três métodos, os autores acreditam que a norma EN 15512:2009 obteve os melhores resultados para perfis com interação entre flambagens.

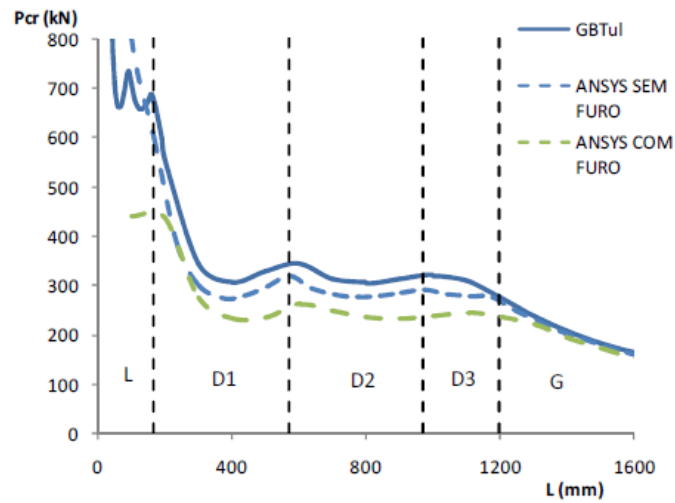
Souza (2013) realizou uma análise experimental e numérica de perfis racks perfurados e não perfurados sujeitos à compressão centrada. Os perfis possuíam furos retangulares na alma, com comprimento de 60% ou 80% da largura da alma. Foram analisadas colunas curtas e médias com e sem furos, sendo que para cada tipo de colunas foram ensaiados três protótipos iguais, totalizando 18 tipos de colunas ensaiadas experimentalmente. A Figura 3.9 mostra a seção e a disposição dos furos analisadas pelo autor.

Figura 3.9: Seção rack e posicionamento dos furos utilizado nos ensaios de Souza (2013)



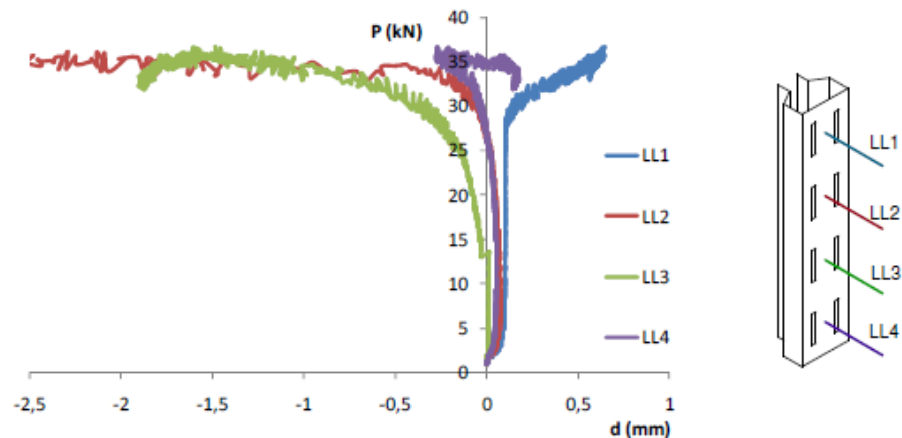
Fonte: Souza (2013)

A análise numérica de elementos finitos feita por Souza (2013) foi realizada pelo software ANSYS, a coluna foi considerada como simplesmente apoiada, obtidas com a restrição do deslocamento nas direções transversais ao eixo da coluna, além disso, no meio do comprimento da coluna foi impedido o deslocamento axial da alma em um nó da alma. A Figura 3.10 mostra as curvas de flambagem elástica de um perfil sem furos utilizando os softwares GBTUL e ANSYS, e a análise deste mesmo perfil com furos usando o software ANSYS. Nesta figura é possível observar os comprimentos para cada tipo de flambagem dominante. A partir das análises lineares, as colunas foram selecionadas com comprimentos com flambagem distorcional dominante.

Figura 3.10: Comparação entre as flambagens elásticas via ANSYS e GBTUL

Fonte: Souza (2013)

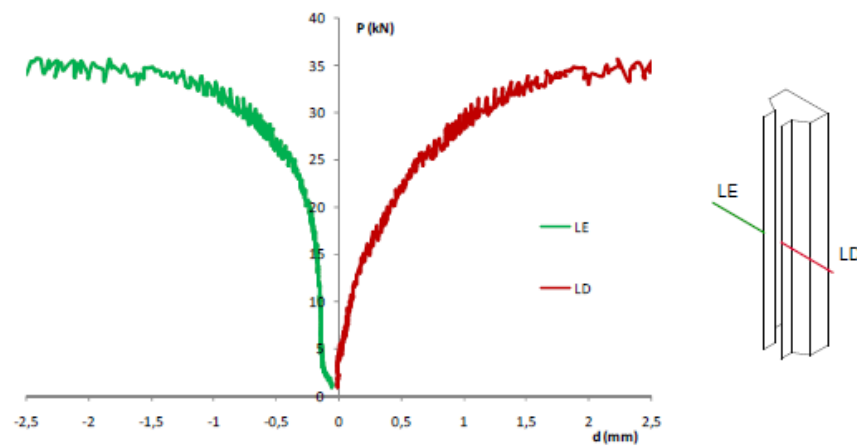
Nos ensaios experimentais, Souza (2013) posicionou LVDTs nas almas e mesas do perfil para determinação do comportamento das colunas por meio das curvas de equilíbrio. As Figuras 3.11 e 3.12 mostram as curvas de carga por deslocamento da alma e das mesas de uma coluna curta com furos com comprimento de 60% da largura da alma.

Figura 3.11: Curva carga x deslocamentos na alma em uma coluna curta com furos de 60%

Fonte: Souza (2013)

A partir da Figura 3.11 é possível observar que os LVDTs 1 e 4 se deslocaram para fora da seção, enquanto que os outros dois LVDTs se deslocaram para dentro da seção.

Figura 3.12: Curva carga x deslocamentos na mesa em uma coluna curta com furos de 60%

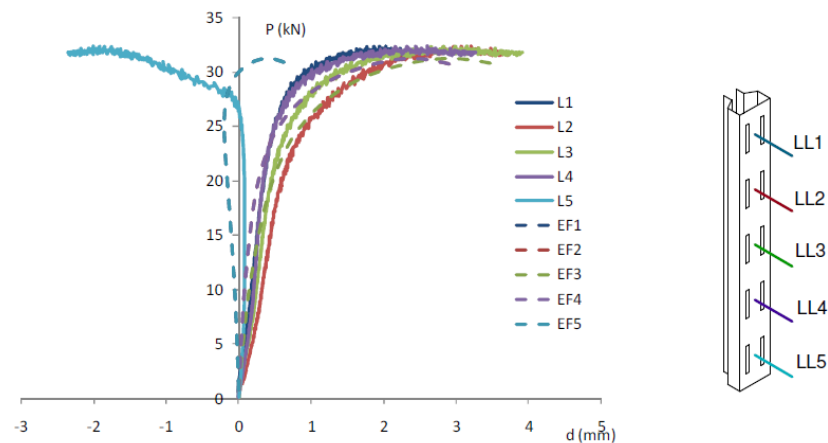


Fonte: Souza (2013)

A partir da Figura 3.12 é possível observar pelos deslocamentos do gráfico que o LVTD posicionado na esquerda se desloca para essa direção, enquanto que o LVTD posicionado na direita se desloca para direita, caracterizando uma abertura da mesa da seção, essa ação é característica da flambagem distorcional.

A Figura 3.13 mostra a comparação entre os deslocamentos da alma obtidos experimentalmente e via ANSYS de uma coluna média com comprimento dos furos igual a 80% da largura da alma. Para a análise não linear foi utilizada uma imperfeição geométrica distorcional de 0.5mm. As linhas tracejadas representam o modelo numérico.

Figura 3.13: Comparação comportamento experimental x numérico de coluna média com furos de 80%

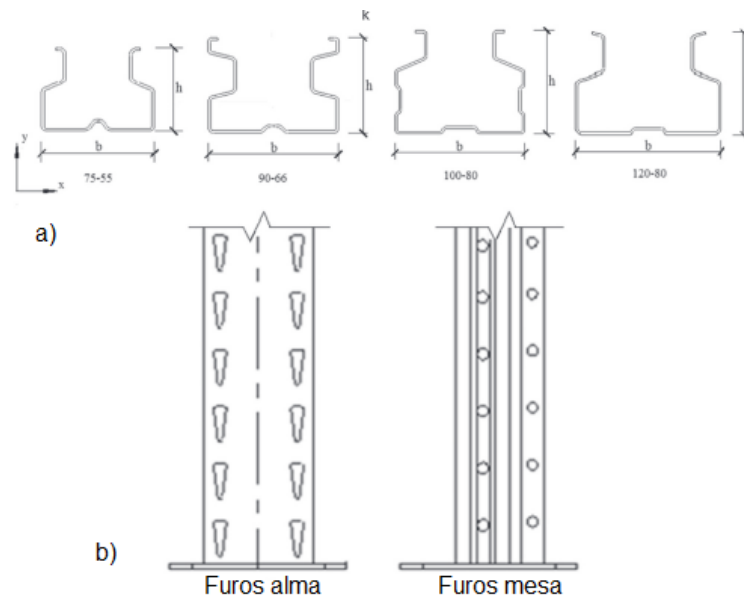


Fonte: Souza (2013)

Neiva et al. (2018) deram continuidade ao estudo de Souza (2013), utilizando o mesmo tipo de perfil, e realizaram um estudo sobre a influência de perfurações retangulares na alma do perfil. Para isso, os autores realizaram ensaios de compressão centrada em 18 protótipos. Neste estudo, as colunas foram ensaiadas experimental e numericamente com condição totalmente engastada. Além disso, os autores estudaram um novo fenômeno de flambagem local, que foi chamado de localizado de placa, em que a flambagem ocorre na região entre os furos. Para as seções avaliadas nesse estudo, a flambagem localizada de placa ocorre em perfis com furos com comprimento maior que 50% da largura da alma, e para menores valores de comprimento do furo, ocorre a flambagem local.

Zhao, Ren, e Qin (2017) realizaram ensaios de compressão centrada em perfis racks perfurados e não perfurados. O foco do estudo era determinar a influência dos furos no comportamento e na resistência dos perfis. Foram ensaiados 67 protótipos, com quatro tipos de seções transversais e comprimentos variando entre 250 mm e 3000 mm. Além disso, nos perfis perfurados, os furos eram de formato triangular na alma e de formato circular nas mesas, como mostrado na Figura 3.14.

Figura 3.14: a) Seções Ensaaiadas; b) Vista das colunas;

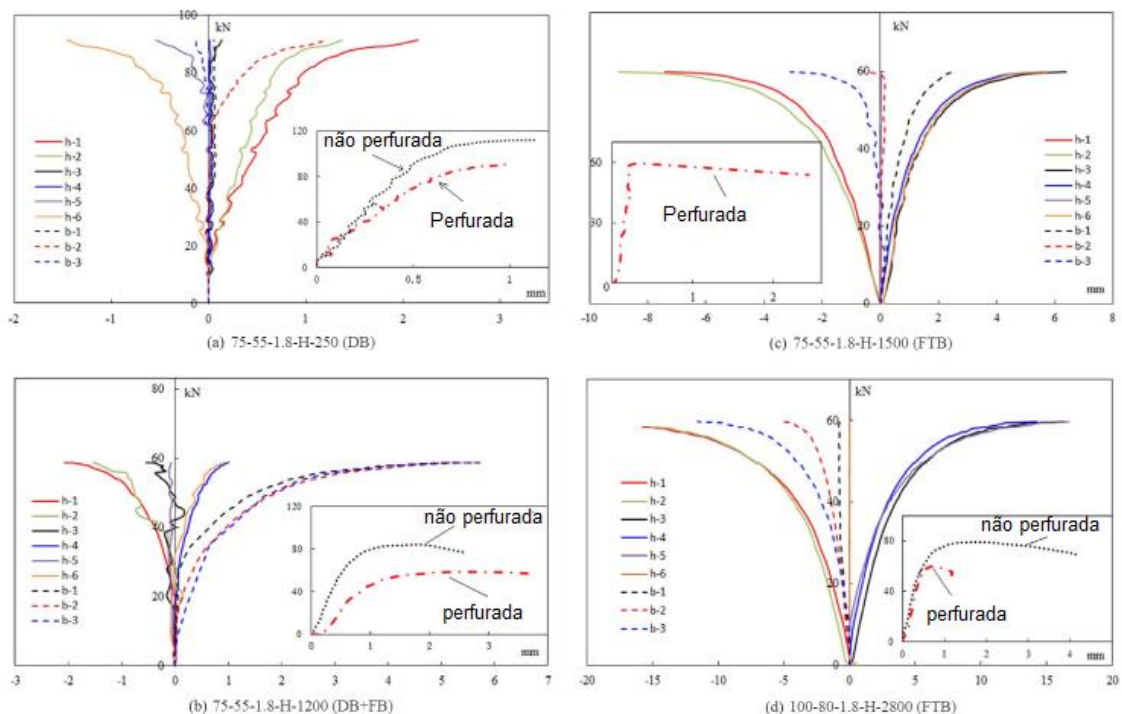


Fonte: Zhao, Ren e Qin (2017), adaptado

A partir dos ensaios de Zhao, Ren e Qin (2017), percebeu-se que 21 dos 67 perfis sofreram interação entre os modos D-G, as demais colunas sofreram flambagem distorcional ou global. Para estudar o comportamento do perfil na flambagem, os autores posicionaram 9 LVDTs para medir deslocamentos na alma e mesas da seção transversal, e extensômetros para

medir a deformação axiais do elemento. A partir destes dados, foram geradas curvas de equilíbrio para compreender o comportamento do perfil. É possível determinar os modos de flambagem de um elemento a partir de inspeção visual após o ensaio, observando como o protótipo se deformou ou a partir das curvas de equilíbrio do elemento. A Figura 3.15 mostra o comportamento das colunas ensaiadas por Zhao, Ren e Qin (2017) por meio de curvas de equilíbrio de carga por deslocamento, onde são mostrados os comportamentos dos modos de flambagem obtidos nos ensaios.

Figura 3.15: Curvas de carga por deslocamento; a) Flambagem distorcional; b) Interação distorcional e flexão; c) Flexo-torção; d) Flexo torção

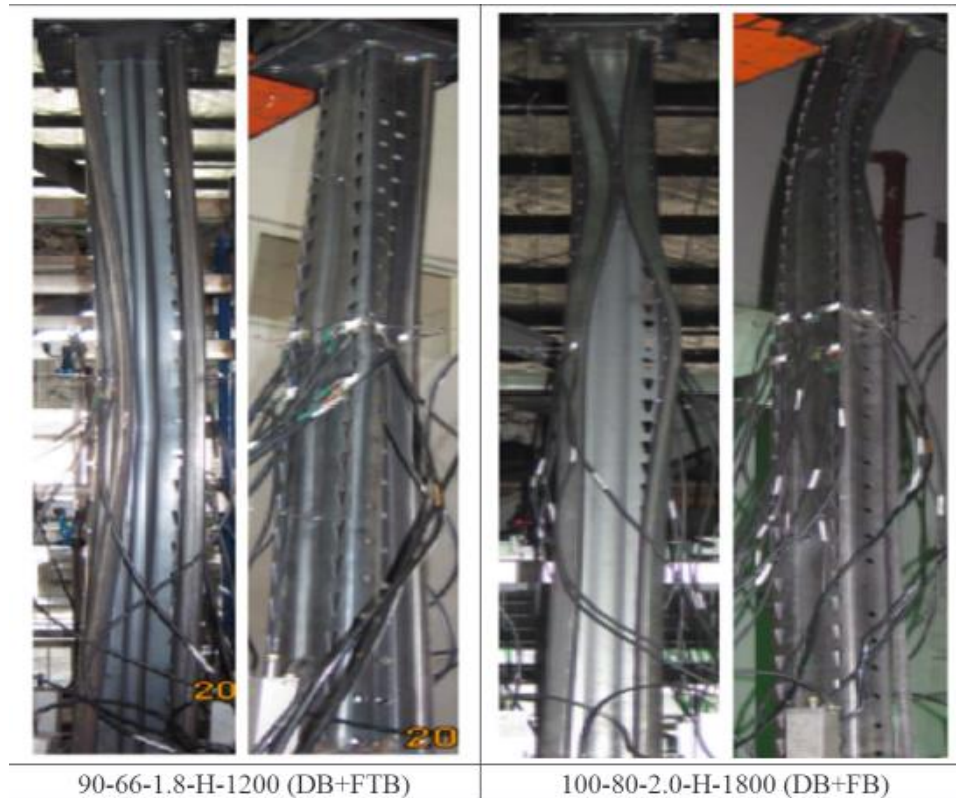


Fonte: Zhao, Ren e Qin (2017), adaptado

A partir da Figura 3.15, é possível notar que na curva de carga por deslocamento axial, a presença dos furos diminui a carga de ruptura do elemento. A parte a) da Figura 3.15 mostra um protótipo que sofreu flambagem distorcional, pois, percebe-se na figura que o elemento praticamente não se deformou na junção entre alma e mesa e teve grandes deformações nas mesas. A parte b) da Figura mostra a curva de carga por deslocamento de um elemento que sofreu interação D-G, pois ocorreram grandes deslocamentos tanto na junção da alma com a mesa como nas extremidades das mesas. As partes c) e d) da Figura mostram elementos que sofreram flambagem global com flexo-torção.

A Figura 3.16 mostra os modos de falha de duas das colunas ensaiadas por Zhao, Ren e Qin (2017) que sofreram interação D-G. A primeira sofreu interação distorcional com flexo-torção, enquanto que a segunda sofreu interação da flambagem distorcional com flexão.

Figura 3.16: Evidências experimentais da interação D-G nas colunas de Zhao, Ren e Qin (2017)



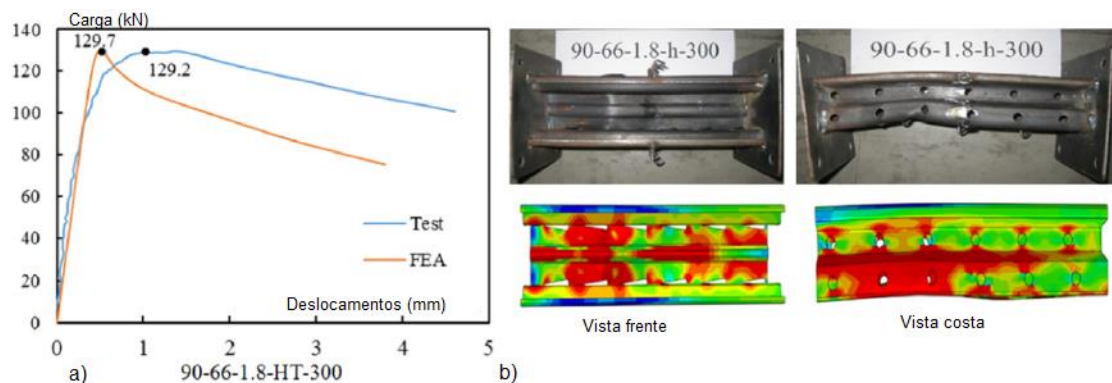
Fonte: Zhao, Ren e Qin (2017)

Por fim, Zhao, Ren e Qin (2017) concluíram que os furos diminuem a capacidade de carga do perfil e também influenciam no modo de flambagem do perfil, pois em alguns casos, na mesma seção transversal, os perfis com e sem furos sofreram diferentes tipos de flambagem.

Ren, Wang e Zhao (2019) realizaram uma validação numérica via MEF com auxílio do software ABAQUS dos experimentos realizados por Zhao, Ren e Qin (2017). Após essa validação, os autores realizaram mais simulações numéricas com outros tipos de furos na alma, além dos furos triangulares, foram simulados perfis com furos retangulares e na forma de paralelogramo na alma, totalizando 134 simulações. Os autores consideraram a coluna como simplesmente apoiada, impedindo os deslocamentos transversais nas extremidades, além disso, na metade do comprimento da coluna foi considerado deslocamento axial nulo na alma. Em relação as imperfeições geométricas a serem inseridas na análise não linear, os autores

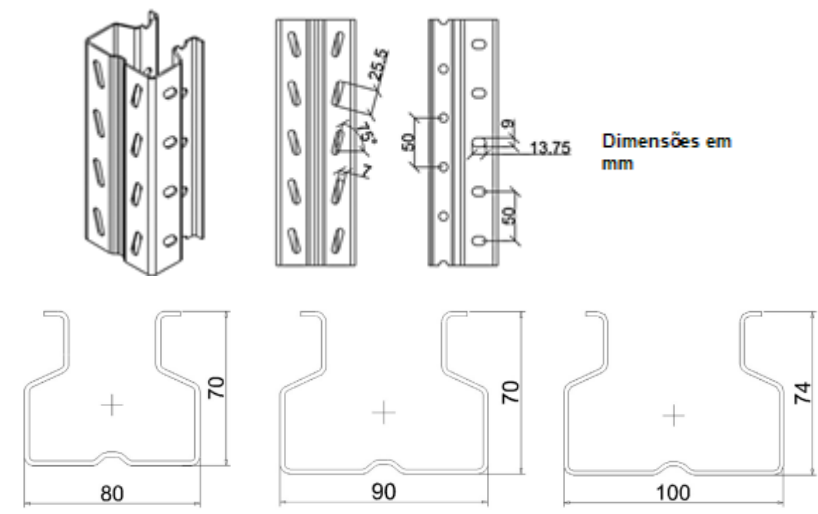
definiram que para colunas menores que 1500 mm, a imperfeição que mais se aproximou da carga experimental foi de 0,8t, e para colunas mais longas a imperfeição geométrica que melhor se aproximava dos resultados experimentais foi de $L/1.000$. Como nos experimentos realizados por Zhao, Ren e Qin (2017), na maioria das simulações os perfis apresentaram flambagem distorcional ou a interação entre as flambagem D-G. A Figura 3.17 mostra a comparação da curva de equilíbrio e do modo de falha do ensaio experimental e da simulação numérica de um dos perfis analisados.

Figura 3.17: Comparações experimentos x simulações numéricas; a) Curvas de equilíbrio; b) modos de falha



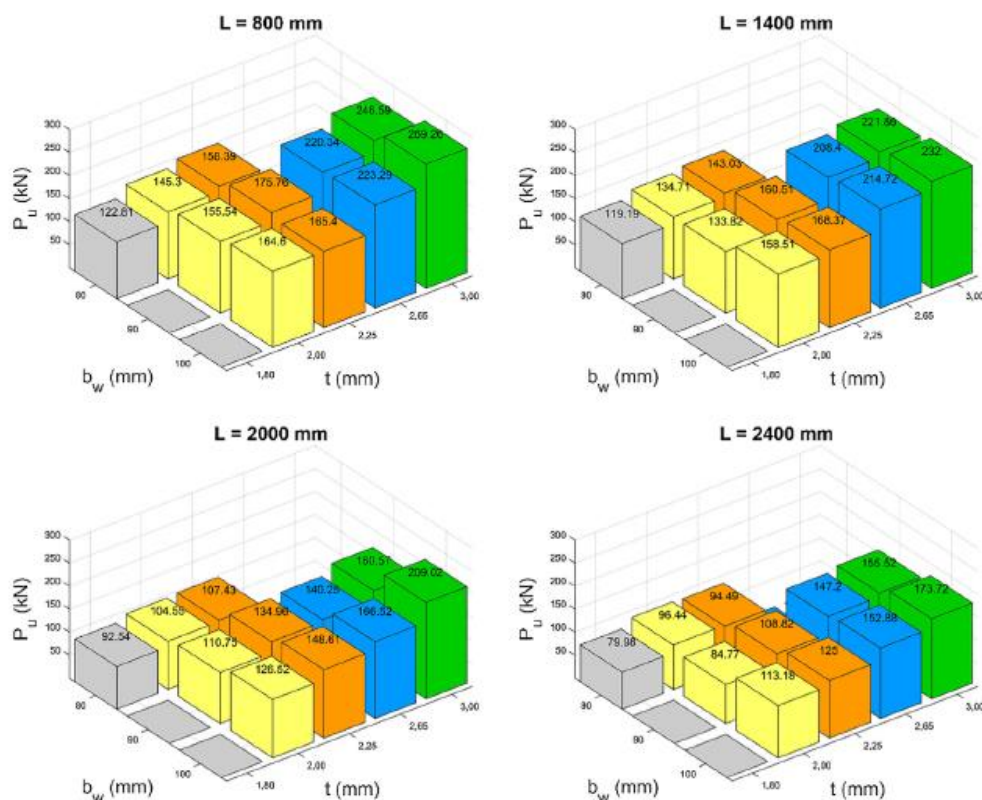
Fonte: Ren, Wang e Zhao (2019), adaptado

Elias et al. (2018) realizaram uma investigação experimental de colunas perfuradas de seção rack sob compressão centrada. Foram ensaiados 44 protótipos, compreendendo 11 tipos de seções e 4 comprimentos, sendo que as seções possuem furos inclinados na alma e circulares nas mesas. A Figura 3.18 mostra as seções analisadas e a disposição dos furos.

Figura 3.18: Seções utilizadas e disposição dos furos dos perfis de Elias et al. (2018)

Fonte: Elias et al (2018)

A Figura 3.19 mostra os resultados obtidos de capacidade de carga das colunas analisadas por Elias et al. (2018). A partir dos resultados, nota-se que para colunas com valores iguais de comprimento e largura da base, ao se aumentar a espessuras a capacidade de carga aumenta significativamente. Em perfis com mesmos valores de espessura e comprimento, ao se aumentar a largura da base é esperado que a capacidade de carga aumente, no entanto, em alguns casos ela diminui, como no caso da coluna de 800mm e espessura de 2.25mm, em que ao aumentar a largura base de 90 para 100mm a capacidade de carga diminuiu. Essa diminuição provavelmente ocorreu devido a imperfeições geométricas.

Figura 3.19: Resultados dos ensaios experimentais de Elias et al. (2018)

Fonte: Elias et al (2018)

Bonada et al. (2016) realizaram ensaios experimentais e investigações numéricas por meio do MEF utilizando o software ANSYS em seções rack perfuradas com aplicação de cargas excêntricas. O principal objetivo deste estudo era verificar a influência dos momentos na capacidade resistente dos perfis racks. Os perfis sofreram modo de flambagem distorcional predominante, no entanto, quanto maior a excentricidade da aplicação da carga, a flambagem distorcional se tornou menos dominante. Por fim, foi observado que o aumento da excentricidade diminuiu a capacidade da seção devido a atuação de momentos na peça.

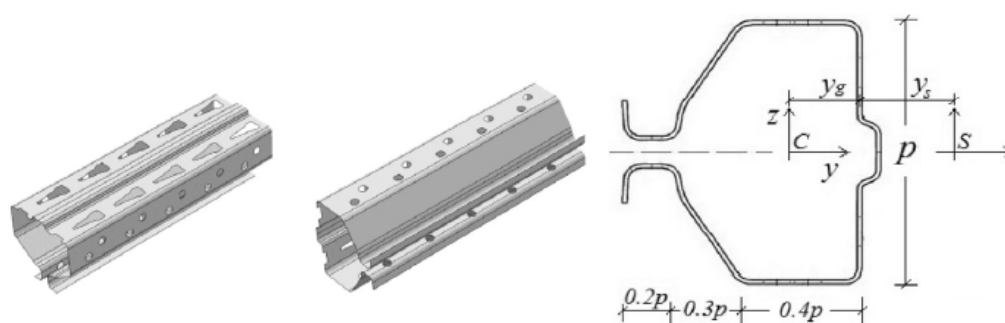
Kumar e Jayachandran (2016) realizaram ensaios experimentais em seções racks perfuradas sujeitas à aplicação conjunta de cargas axiais e momentos. Nos ensaios experimentais, a aplicação das cargas excêntricas diminuiu a capacidade resistente do elemento se comparado a elementos com cargas concêntricas. Essa diminuição pode ter ocorrido devido a interação entre a carga axial e os momentos, ou devido a interação entre os modos de flambagem.

Bertocci et al. (2017) também realizaram ensaios experimentais e simulações numéricas em seções racks perfuradas sujeitas a cargas de compressão centrada e excêntrica, esta última foi utilizada para gerar momentos em um dos eixos do elemento. Os autores realizaram ensaios

em seis tipos de colunas curtas para investigar a flambagem local, e em colunas longas para investigar o comportamento das seções rack considerando diversos valores de excentricidade. Os ensaios foram realizados seguindo as diretrizes da norma EN 15512:2009. As simulações numéricas foram feitas por meio do método dos elementos finitos utilizando o software DIANA. Por fim, os autores determinaram para cada tipo de seção transversal analisada um domínio de carga de ruptura, considerando a interação entre a carga axial e os momentos em torno dos eixos x e y .

Baldassino et al. (2019) realizaram ensaios de compressão centrada e flexão em perfis rack de sistemas de estocagem seguindo as diretrizes da norma EN 15512:2009. Para comparação de resultados, os ensaios foram realizados em perfis com e sem perfurações, sendo realizados ensaios de compressão em 48 protótipos e de flexão em 24 protótipos. Neste estudo, os momentos foram gerados por ensaios de flexão pura em torno dos eixos de inércia, e não devido a aplicação de cargas excêntricas. A Figura 3.20 mostra o tipo de seção transversal utilizada pelo autor e duas vistas 3D do elemento, mostrando os tipos de furos.

Figura 3.20: Seção utilizada por Baldassino et al. (2019)



Fonte: Baldassino et al. (2019)

A seleção dos comprimentos das colunas de Baldassino et al. (2019) para ensaios de compressão foi feita por meio da análise de flambagem elástica pelo software CUFSM em perfis sem furos. O comprimento das colunas variou entre 300 mm e 1150 mm. Nos ensaios de compressão, as colunas mais curtas apresentaram flambagem local, parte das colunas de 450 mm apresentaram interação entre as flambagens L-D. O restante das colunas apresentou flambagem distorcional, com exceção das mais longas, que apresentaram interação entre as flambagens D-G. As colunas com furos apresentam carga de ruptura média 14% menor que os perfis sem furos.

Como exposto acima, existe uma grande quantidade de ensaios experimentais e numéricos em seções do tipo rack perfuradas, com diferentes tipos de seções transversais e

furos, dificultando a análise e o dimensionamento dessas seções. Além disso, em alguns dos estudos citados acima, parte dos perfis falharam com interação entre os modos de flambagem, principalmente o modo D-G. Por fim, de acordo com Zhang e Alam (2017), existem duas principais razões para que as normas de dimensionamento de sistemas de estocagem ainda requisitem ensaios experimentais para dimensionamento. A primeira razão é a menor quantidade de softwares para análise de seções perfuradas, pois os programas GBTUL e CUFSM, que são muito utilizados para realização de análises de flambagem elástica e uso do MRD, não aceitam perfis com furos. A segunda razão é a dificuldade de determinar as imperfeições geométricas para a realização da análise não linear de flambagem via MEF em seções de PFFs com furos.

3.2 IMPERFEIÇÕES PARA SIMULAÇÕES NÚMERICAS DE SEÇÕES RACK PERFURADAS

Os ensaios experimentais além de serem mais caros, demandam um maior período de tempo se comparado às simulações numéricas. Devido a isso, diversas simulações numéricas foram conduzidas para prever o comportamento de seções rack perfuradas, como os estudos feitos por Freitas, Freitas e Souza (2005), Roure et al (2011), Crisan, Ungureanu e Dubina (2012b), Bonada et al. (2012), Souza (2013), Pastor et al. (2014), Zhang e Alam (2017), Ren, Wang e Zhao (2019) e Neiva et al. (2018). Estas pesquisas tiveram como objetivo simular numericamente os perfis por meio de análises não lineares utilizando o MEF e tentar fazer os resultados dessas simulações se aproximarem do comportamento experimental.

O processo de produção dos PFFs ocasiona o surgimento de imperfeições geométricas e tensões residuais no elemento. Esses efeitos, principalmente a imperfeição geométrica, são essenciais para a realização da análise não linear, e são discutidos nos próximos tópicos.

3.2.1 Imperfeições geométricas

Durante o processo de produção dos PFFs, as seções são submetidas a uma imperfeição geométrica inicial (IGI), que é definida como um desvio das medidas do perfil em relação a geometria original da seção. As imperfeições são divididas em imperfeições locais, distorcionais e globais, e correspondem a seus respectivos modos de flambagem. (Schafer e Peköz, 1998b; Zhao, 2016)

A determinação da capacidade de carga de um elemento geralmente é feita pelo método dos elementos finitos a partir de uma análise não linear, que geralmente é composta por duas etapas. Inicialmente é realizado uma análise linear de flambagem elástica, onde são determinados os diversos modos de flambagem, e a configuração deformada de um desses modos é usada como a imperfeição geométrica, sendo que esse modo será introduzido como um estado inicial do elemento para realização da segunda etapa, que consiste na análise não linear. O valor da magnitude da imperfeição a ser inserido na análise não linear depende do modo predominante de flambagem determinado na análise linear (local, distorcional ou global), essa determinação é feita visualmente e dependendo do tipo de flambagem, um valor de imperfeição é inserido. Existem duas estratégias clássicas para utilização desse método. A primeira estratégia consiste em utilizar sempre a configuração deformada do 1º modo de flambagem, que é o modo crítico, para gerar a imperfeição geométrica e realizar a análise não linear. A segunda estratégia consiste em buscar o modo de flambagem que leva a menor carga de ruptura, ou seja, ao realizar a análise de flambagem, são gerados diversos modos de flambagem, e nesta estratégia diversos modos são escolhidos para gerar a imperfeição e realizar a análise não linear, e o modo que obter a menor carga de ruptura é o escolhido (Bonada et al., 2012; Zhang e Alam, 2017).

Bonada et al. (2012) e Zhang e Alam (2017) propuseram modificação nas abordagens clássicas para inserção das imperfeições geométricas utilizando os modos de flambagem. Os primeiros propuseram a utilização da segunda estratégia clássica em conjunto com a teoria generalizada de vigas e o *software* GBTUL, no entanto, essa metodologia não pode ser utilizada em perfis perfurados. Zhang e Alam (2017) propuseram um método utilizando a segunda estratégia clássica em conjunto com medições experimentais das imperfeições no perfil.

No caso de perfis com interação entre as flambagens, a imperfeição geométrica a ser inserida no modelo numérico é obtida a partir da combinação linear dos modos puros de flambagem. Logo, para a interação local-distorcional, a partir da obtenção dos modos de flambagem, um modo local e outro distorcional são combinados para obter a imperfeição geométrica. Essa metodologia já foi mostrada no capítulo anterior para as interações entre as flambagens L-D, D-G e L-D-G.

Pastor et al. (2014) realizaram um estudo sobre a magnitudes das imperfeições geométricas que devem ser inseridas em um modelo de simulação numérica. Para esse fim, os autores realizaram uma ampla revisão bibliográfica e selecionaram várias imperfeições geométricas que foram utilizadas por outros autores. Posteriormente, foram realizados ensaios experimentais em uma seção de perfil rack perfurado com diversos comprimentos, além disso,

os autores realizaram simulações numéricas pelo *software* ANSYS com as mesmas colunas do ensaio experimental, inserindo as magnitudes das imperfeições geométricas que foram selecionadas na revisão de literatura, buscando encontrar a imperfeição geométrica que mais se aproximava do resultado experimental. A partir do estudo, os autores determinaram as imperfeições geométricas que melhor simularam o comportamento dos perfis para cada tipo de flambagem atuando de maneira isolada. Este estudo mostra a importância da escolha da magnitude da imperfeição geométrica a ser inserida na simulação numérica, pois esse valor influencia no valor da carga de ruptura e também no comportamento pós flambagem da estrutura. A Tabela 3.1 mostra os valores recomendados de imperfeição geométrica para cada tipo de flambagem de maneira isolada para as seções rack perfuradas e não perfuradas. Sendo que b_w representa a largura da alma, t representa a espessura do perfil, b_f a largura da mesa e L o comprimento do perfil.

Tabela 3.1: Valores recomendados de imperfeições geométricas

	Local	Distorcional	Global
Rack perfuradas	$b_w/200$	$0,5t$	$L/750$
Rack sem furos	$0,1t$	$b_f/50$	$L/1000$

Fonte: Pastor et al. (2014), adaptado

3.2.2 Tensões residuais

O processo de produção dos perfis formados a frio consiste no dobramento de chapas metálicas para se obter a forma final do elemento, este processo pode causar deformações plásticas, que ocasionam o surgimento de tensões residuais no elemento. Além das tensões residuais, o processo de produção desses perfis leva ao aumento da resistência em alguns elementos do perfil, principalmente nos cantos.

É possível simular o processo de produção dos perfis formados a frio com o intuito de obter as tensões residuais e de distribuição de deformações na seção transversal via MEF com auxílio do *software* COPRA FEA FR, como foi feito por Pastor et al. (2013) e posteriormente por Bonada et al. (2015), sendo que os últimos simularam o processo de produção em perfis racks com furos enquanto que os primeiros utilizaram seções racks sem furos. A partir do *software* é possível obter tensões residuais e deformações geradas no processo de produção dos PFFs, que posteriormente serão inseridas no MEF (ANSYS) como um estado inicial de imperfeição para subsequente análise não linear. De acordo com Pastor et. al (2013), a

determinação das tensões residuais é relevante para colunas que sofrem flambagem distorcional, e podem ser desprezadas para colunas curtas. Os grandes problemas do *software* COPRA FEA FR de acordo com Bonada et al. (2015) são seu alto tempo de processamento, que segundo os autores leva em média 500 horas, e a necessidade de um grande conhecimento dos processos de produção dos perfis para a utilização do software.

Bonada et al. (2015) além de simularem o processo de produção de perfis racks perfurados para obtenção de tensões residuais, também avaliaram experimentalmente o aumento na resistência do elemento devido às deformações plásticas que o elemento sofre na sua produção. O aumento das tensões ocorre de maneira significativa nas regiões de canto da seção, onde ocorreu um aumento das resistências últimas e de escoamento, no entanto, a ductilidade nas regiões de canto diminuiu. De acordo com os autores, esse efeito só é relevante para colunas curtas e com predominância do modo local. Nas colunas onde ocorrem flambagens distorcional e global, os efeitos são irrelevantes e podem ser desprezados na previsão da carga última e comportamento pós flambagem.

Crisan, Ungureanu e Dubina (2012a) também determinaram experimentalmente o aumento da resistência nos cantos dos elementos devido ao processo de produção dos PFF. A tensão residual também foi determinada experimentalmente. No entanto, nas simulações numéricas feitas por Crisan, Ungureanu e Dubina (2012b), a inserção das tensões residuais no modelo numérico teve pouca influência nos resultados obtidos, sendo que a diferença obtida nos resultados das simulações com e sem tensões residuais foi menor que 3%.

De acordo com Schafer, Li e Moen (2010) e Dubina e Ungureanu (2002), a determinação e a modelagem numérica das tensões residuais é complexa. Além disso, o surgimento das tensões residuais e o aumento da resistência do elemento ocorrem simultaneamente no processo de produção dos perfis e tendem a se anular. Caso esses processos sejam inseridos no modelo numérico, eles devem ser inseridos em conjunto no modelo numérico, pois, ao se aumentar a resistência nas regiões de canto, o modelo só estará correto se também as tensões residuais também forem inseridas. Logo, as tensões residuais e o aumento da resistência geralmente são excluídos do modelo numérico, considerando que um efeito anula o outro.

CAPÍTULO 4

MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Em colunas sujeitas à compressão, os PFFs podem exibir três tipos de instabilidades, que são a flambagens local, distorcional e global. Dependendo da esbeltez do elemento, uma das flambagens agindo isoladamente ou a interação entre elas pode governar o modo de falha e o método de dimensionamento do elemento. Atualmente, as normas de dimensionamento abrangem o cálculo das flambagens isoladamente e da interação local-global.

De acordo com Koen (2008), os principais métodos de dimensionamento de perfis formados a frio são os ensaios experimentais, o método dos elementos finitos (MEF), o método da resistência direta (MRD), o método da largura efetiva, a teoria generalizada de vigas (GBT), o método das faixas finitas (FSM) e o método de erosão da carga de bifurcação crítica (ECBL). Dentre esses métodos, o MRD vem sendo o mais utilizado para dimensionamento de perfis sujeitos à compressão e a flexão. Esse método está contido na norma americana AISI S100:2016 para perfis sem e com furos pontuais relativos à flambagem local, distorcional, global e local-global. Diversos estudos vêm sendo conduzidos para validar o MRD em perfis com interação L-D, D-G, L-D-G e também para seções rack perfuradas de sistemas de estocagem. Os próximos tópicos mostram a formulação do MRD disponível para todos esses casos.

4.1 MRD EM PERFIS SEM FUROS

Atualmente, o Método da Resistência Direta (MRD) é o método mais utilizado para o cálculo da capacidade de carga de perfis formados a frio, o mesmo foi proposto inicialmente por Schafer e Peköz (1998), a partir deste método é possível obter a capacidade de carga para colunas e vigas sujeitas à compressão ou flexão para os modos de flambagem local, distorcional,

global e interação local-global. As Equações 4.1 e 4.2 mostram as fórmulas do MRD para o cálculo da carga de ruptura para a flambagem local (P_{nL}) de elementos sujeitos à compressão centrada.

$$P_{nL} = P_y \quad \text{se } \lambda_L \leq 0,776 \quad (4.1)$$

$$P_{nL} = P_y \cdot \left(\frac{P_{crL}}{P_y} \right)^{0,4} \cdot \left(1 - 0,15 \cdot \left(\frac{P_{crL}}{P_y} \right)^{0,4} \right) \quad \text{se } \lambda_L > 0,776 \quad (4.2)$$

As fórmulas para determinação da carga de ruptura pelo MRD para a flambagem distorcional (P_{nD}) estão contidas nas Equações 4.3 e 4.4.

$$P_{nD} = P_y \quad \text{se } \lambda_D \leq 0,561 \quad (4.3)$$

$$P_{nD} = P_y \cdot \left(\frac{P_{crD}}{P_y} \right)^{0,6} \cdot \left[1 - 0,25 \cdot \left(\frac{P_{crD}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \quad \text{se } \lambda_D > 0,561 \quad (4.4)$$

As fórmulas para determinação da carga de ruptura para flambagem global (P_{nG}) estão contidas nas Equações 4.5 e 4.6.

$$P_{nG} = P_y \cdot 0,658 \lambda_G^2 \quad \text{se } \lambda_G \leq 1,5 \quad (4.5)$$

$$P_{nG} = P_y \cdot \left(\frac{0,877}{\lambda_G^2} \right) \quad \text{se } \lambda_G > 1,5 \quad (4.6)$$

Por fim, também é possível calcular a carga de ruptura para elementos que sofram a interação entre os modos de flambagem L-G (P_{nLG}), que são mostradas nas Equações 4.7 e 4.8.

$$P_{nLG} = P_{nG} \quad \text{se } \lambda_{LG} \leq 0,776 \quad (4.7)$$

$$P_{nLG} = P_{nG} \cdot \left(\frac{P_{crL}}{P_{nG}} \right)^{0,4} \cdot \left(1 - 0,15 \cdot \left(\frac{P_{crL}}{P_{nG}} \right)^{0,4} \right) \quad \text{se } \lambda_{LG} > 0,776 \quad (4.8)$$

Nas equações acima, temos que: P_{crL} , P_{crD} e P_{crG} são as cargas críticas elásticas de flambagem local, distorcional e global, respectivamente, P_y é a carga que leva ao escoamento,

e as esbeltezes local (λ_L), distorcional (λ_D), global (λ_G) e local-global (λ_{LG}) são calculadas pelas Equações 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, respectivamente.

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crL}}} \quad (4.9)$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crD}}} \quad (4.10)$$

$$\lambda_G = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crG}}} \quad (4.11)$$

$$\lambda_{LG} = \sqrt{\frac{P_{nG}}{P_{crL}}} \quad (4.12)$$

A carga de ruptura do elemento é definida como o menor valor entre as cargas de ruptura determinadas para as flambagens local, distorcional, global e interação local-global.

O Método da Resistência Direta tem sido muito usado devido a sua simplicidade, pela sua formulação mostrada acima, para o cálculo da carga de ruptura, é necessário apenas determinar as cargas críticas de flambagem elástica e a esbeltezes dos modos local, distorcional e global. Devido aos avanços computacionais, essa determinação pode ser feita rapidamente por meio da utilização dos softwares GBTUL ou CUFSM. Essa determinação também pode ser feita por programas que utilizam o método dos elementos finitos (MEF), no entanto, neste caso o custo computacional é maior.

4.2 PROPOSTAS DO MRD EM PERFIS COM INTERAÇÃO ENTRE AS FLAMBAGENS

O Método da Resistência Direta ainda não foi validado para casos de interação com a flambagem distorcional. Como mostrado em capítulos anteriores, diversos estudos foram conduzidos sobre as interações L-D, D-G e L-D-G, e alguns autores propuseram modificações no MRD para considerar essas interações.

Schafer (2002), Silvestre, Camotim e Dinis (2012) e Martins, Camotim e Dinis (2017) propuseram adequações nas equações do MRD para considerar a interação entre as flambagens do tipo L-D.

Schafer (2002) propôs duas alternativas para se considerar a interação L-D nas equações do MRD, estas propostas foram chamadas de NDL e NLD. Na última, nas equações de

flambagem local, o valor da carga de escoamento P_y é substituído pelo valor calculado pelo MRD de carga última distorcional P_{nD} , que são mostradas nas Equações 4.13 e 4.14.

$$P_{nLD} = P_{nD} \quad \text{se } \lambda_{LD} \leq 0,776 \quad (4.13)$$

$$P_{nLD} = P_{nD} \cdot \left(\frac{P_{crL}}{P_{nD}} \right)^{0,4} \cdot \left[1 - 0,15 \cdot \left(\frac{P_{crL}}{P_{nD}} \right)^{0,4} \right] \quad \text{se } \lambda_{LD} > 0,776 \quad (4.14)$$

Na proposta denominada NDL, ocorre o inverso, ou seja, nas equações de flambagem distorcional, os valores da carga de P_y são substituídos pelo valor carga última P_{nL} calculado no MRD de flambagem local, como é mostrado nas Equações 4.15 e 4.16.

$$P_{nDL} = P_{nL} \quad \text{se } \lambda_{DL} \leq 0,561 \quad (4.15)$$

$$P_{nDL} = P_{nL} \cdot \left(\frac{P_{crD}}{P_{nL}} \right)^{0,6} \cdot \left[1 - 0,25 \cdot \left(\frac{P_{crD}}{P_{nL}} \right)^{0,6} \right] \quad \text{se } \lambda_{DL} > 0,561 \quad (4.16)$$

Os valores de esbeltez local-distorcional (λ_{LD}) e distorcional-local (λ_{DL}) são calculados pelas Equações 4.17 e 4.18.

$$\lambda_{LD} = \sqrt{\frac{P_{nD}}{P_{crL}}} \quad (4.17)$$

$$\lambda_{DL} = \sqrt{\frac{P_{nL}}{P_{crD}}} \quad (4.18)$$

A proposta do MRD para interação L-D desenvolvida por Silvestre, Camotim e Dinis (2012) foi feita para os casos de interação do tipo TI. Ela foi inicialmente idealizada para seções do tipo C, e posteriormente validada numericamente para seções Rack, H, Z, WSLC e WSFLC. Essa proposta de MRD foi denominada MNDL e utiliza as Equações 4.15 e 4.16 do método NDL, onde P_{nL} é substituído por P_{nL}^* para colunas esbeltas com $\lambda_D > 1,5$. No caso de colunas curtas, com $\lambda_D < 1,5$, o valor da carga de ruptura pode ser determinado pelo MRD distorcional. Para colunas engastadas o valor de P_{nL}^* é calculado pelas Equações 4.19, 4.20 e 4.21.

$$P_{nL}^* = P_y \quad \text{se } \frac{L_{crD}}{L_{crL}} \leq a \quad (4.19)$$

$$P_{nL}^* = P_y + \left(\frac{a}{b-a} - \frac{1}{b-a} \cdot \frac{L_{crD}}{L_{crL}} \right) \cdot (P_y - P_{nL}) \quad \text{se } a \leq \frac{L_{crD}}{L_{crL}} \leq b \quad (4.20)$$

$$P_{nL^*} = P_{nL} \quad \text{se} \quad \frac{L_{crD}}{L_{crL}} \leq b \quad (4.21)$$

As Equações 4.19, 4.20 e 4.21 do método MNDL são dependentes dos valores de L_{crD} e L_{crL} , que são os comprimentos de meia onda distorcional e local respectivamente, e podem ser obtidos pelas curvas de assinatura da seção transversal para colunas simplesmente apoiadas. Os valores de a e b dependem do tipo de seção, sendo que para as seções do tipo C, H, Z e R, os valores de a e b são 4 e 8, respectivamente. Para as seções do tipo WSLC, os valores de a e b são 8 e 12. Para seções WFSLC, os valores de a e b são 14 e 40.

Martins, Camotim e Dinis (2017) também propuseram equações do MRD para interação L-D do tipo SDI para as seções C, Hat, Zed, Rack, WSLC e WFSLC. Não foram propostas equações para a interação SLI, pois neste caso foi provado por Martins et al. (2015) que as equações de flambagem distorcional preveem adequadamente as cargas de ruptura. O método proposto para interação SDI foi chamado de NSDB, e é calculado através das Equações 4.22, 4.23 e 4.24.

$$P_{nLD} = P_{nL} \quad \text{se} \quad \lambda_L \leq 0,85 \cdot \frac{P_{crD}}{P_{crL}} \quad (4.22)$$

$$P_{nLD} = P_1 + \frac{P_2 - P_1}{0,25} \cdot \left(\lambda_L - 0,85 \cdot \frac{P_{crD}}{P_{crL}} \right) \quad \text{se} \quad 0,85 \cdot \frac{P_{crD}}{P_{crL}} < \lambda_L < 0,85 \cdot \frac{P_{crD}}{P_{crL}} + 0,25 \quad (4.23)$$

$$P_{nLD} = P_y \cdot \lambda_L^{-1,2} \cdot \left(1 - 0,15 \cdot \lambda_L^{-1,2} \right) \quad \text{se} \quad \lambda_L \geq 0,85 \cdot \frac{P_{crD}}{P_{crL}} + 0,25 \quad (4.24)$$

Os valores de P_1 e P_2 são calculados pelas Equações 4.25 e 4.26.

$$P_1 = P_{crL} \cdot \left(0,85 \cdot \frac{P_{crD}}{P_{crL}} \right)^{1,2} \cdot \left(1 - 0,15 \cdot \left(0,85 \cdot \frac{P_{crD}}{P_{crL}} \right)^{-0,8} \right) \quad (4.25)$$

$$P_2 = P_{crL} \cdot \left(0,85 \cdot \frac{P_{crD}}{P_{crL}} + 0,25 \right)^{-1,2} \cdot \left(1 - 0,15 \cdot \left(0,85 \cdot \frac{P_{crD}}{P_{crL}} + 0,25 \right)^{-1,2} \right) \quad (4.26)$$

Martins, Camotim e Dinis (2017) além de proporem equações do MRD para a interação SDI, também testaram a qualidade dos métodos NDL e MNDL a partir dos ensaios experimentais e simulações numéricas presentes na literatura. Os autores concluíram que em relação à interação L-D do tipo TI, o método NDL apresenta melhores resultados em relação ao método MNDL quando comparado apenas resultados experimentais, enquanto que nas

simulações numéricas ocorre o oposto, o método MNDL apresenta melhores resultados que o NDL. No entanto, existe uma grande desproporção entre ensaios numéricos e experimentais, sendo que os autores compararam 1421 simulações numéricas e apenas 47 ensaios experimentais de interação do tipo TI. Logo, são necessários mais ensaios experimentais para melhor calibração das propostas.

Em relação a interação D-G, existem apenas duas propostas de adequação do MRD, estas propostas foram sugeridas por Schafer (2002), e são denominadas N_{DG} e N_{GD} . Na proposta N_{DG} , nas equações do MRD distorcional, o valor de P_y , e substituído pelo valor calculado de carga última global P_{nG} , resultando nas Equações 4.27 e 4.28.

$$P_{nDG} = P_{nG} \quad \text{se } \lambda_{DG} \leq 0,561 \quad (4.27)$$

$$P_{nDG} = P_{nG} \cdot \lambda_{DG}^{-1,2} \cdot [1 - 0,25 \cdot \lambda_{DG}^{-1,2}] \quad \text{se } \lambda_{DG} > 0,561 \quad (4.28)$$

Na proposta N_{GD} , o valor de P_y é substituído pelo valor calculado de carga última distorcional P_{nD} nas equações do MRD para flambagem global como mostram as Equações 4.29 e 4.30.

$$P_{nGD} = 0,658^{\lambda_{GD}^2} \cdot P_{nD} \quad \text{se } \lambda_{GD} \leq 1,5 \quad (4.29)$$

$$P_{nGD} = P_{nD} \cdot \left(\frac{0,877}{\lambda_{GD}^2} \right) \quad \text{se } \lambda_{GD} > 1,5 \quad (4.30)$$

Sendo que que os valores de esbeltez global-distorcional (λ_{GD}) e distorcional-global (λ_{DG}) são calculados pelas Equações 4.31 e 4.32.

$$\lambda_{GD} = \left(\frac{P_{nD}}{P_{crG}} \right)^{0,5} \quad (4.31)$$

$$\lambda_{DG} = \left(\frac{P_{nG}}{P_{crD}} \right)^{0,5} \quad (4.32)$$

Martins, Camotim e Dinis (2018), também verificaram a qualidade das curvas do MRD para interação D-G a partir de um estudo paramétrico feito com as seções C, Z e WSLC. Para as seções Z, com $R_{GD} \leq 0,85$, sendo que neste caso não ocorre interação, a curva do MRD global prevê adequadamente os resultados de carga de ruptura. Para os casos de interação TI e SGI, as

equações NDG e NGD preveem a carga de ruptura adequadamente. Para as seções C e WSLC, a curva do MRD para flambagem global prevê adequadamente os resultados para os três tipos de interação D-G, isso ocorre, pois, a redução da resistência causada pela interação é compensada pelo fato da curva global do MRD ter maior eficácia para prever a flambagem global somente de flexão, e esses dois perfis sofrem flexo-torção.

Por fim, existe apenas uma proposta do MRD que considera a interação L-G-D. As Equações 4.33 e 4.34 mostram essa proposta, denominada N_{LDG} .

$$P_{nLDG} = P_{nDG} \quad \text{se } \lambda_{LDG} \leq 0,776 \quad (4.33)$$

$$P_{nDLG} = P_{nDG} \cdot \left(\frac{P_{crL}}{P_{crG}} \right)^{0,4} \cdot \left(1 - 0,15 \cdot \left(\frac{P_{crL}}{P_{nDG}} \right)^{0,4} \right) \quad \text{se } \lambda_{LDG} > 0,776 \quad (4.34)$$

Sendo que o valor da esbeltez local-distorcional-global (λ_{LDG}) é calculado pela Equação 4.35.

$$\lambda_{LDG} = \left(\frac{P_{nDG}}{P_{crL}} \right)^{0,5} \quad (4.35)$$

Dinis et al. (2018) coletou os dados de resultados experimentais e numéricos contidos na literatura de colunas engastadas de seção C com interação L-G-D para verificar os méritos da proposta das Equações 4.31 e 4.32. Foram analisados um total de 52 protótipos ensaiados experimentalmente e de 893 simulações numéricas. Os autores concluíram que a proposta que leva em conta apenas a interação L-G, denominada NLG obteve melhores os resultados.

4.3 MRD EM PERFIS COM FUIROS PONTUAIS

O método da Resistência Direta proposto por Schafer e Pekoz (1998) não leva em conta a presença de furos no elemento, devido a isso, Moen e Schafer (2008 e 2011) estudaram o comportamento de perfis formados a frio com furos por meio de ensaios experimentais e numéricos via MEF e propuseram modificações no MRD. Esta metodologia está presente na norma Americana AISA S100 (2016). Para utilização do método é necessário determinar as cargas críticas dos modos de flambagem, no entanto, para perfis com furos essa determinação

não pode ser feita diretamente pelos softwares GBTUL e CUFSM, pois esses programas não aceitam perfis com furos.

Para utilização do MRD em perfis com furos, Moen e Schafer (2009) determinaram métodos simplificados para o cálculo das cargas críticas de flambagem elástica local, distorcional e global para colunas com furos pontuais na alma. A determinação da carga crítica global de perfis com furos é feita a partir de modificações nas equações clássicas de flambagem global de flexão e flexo-torção, onde é aplicado um método de média ponderada das propriedades da seção líquida e bruta. A determinação das cargas críticas de flambagem local e distorcional foram determinadas utilizando o método das faixas finitas e o software CUFSM.

Para a flambagem distorcional foi proposta a metodologia de espessura equivalente, onde é considerado uma espessura reduzida em toda a alma do perfil para levar em conta os efeitos dos furos, e assim o software CUFSM possa ser utilizado. A proposta de espessura equivalente é mostrada na Equação 4.36, onde, $t_{web,hole}$ é a espessura reduzida para ser utilizada na análise, t_{web} é a espessura da alma, L_{hole} é o comprimento do furo, e L_{crd} é o comprimento da flambagem distorcional.

$$t_{web,hole} = \left(\frac{1 - L_{hole}}{L_{crd}} \right)^{1/3} \cdot t_{web} \quad (4.36)$$

A carga crítica de flambagem local (P_{crL}) é determinada pelo menor valor entre P_{crLnh} e P_{crLh} , onde P_{crLnh} é o valor da flambagem local da seção bruta, sem a consideração dos furos, e P_{crLh} é calculado pelo CUFSM considerando a seção líquida por todo o comprimento do perfil, e restringindo as deformações apenas a flambagem local. Ao se realizar a análise de flambagem elástica da seção líquida, será gerada a curva de flambagem elástica, e o mínimo valor de flambagem local é considerado como comprimento de meia onda (L_{crLh}). Caso o comprimento do furo (L_{hole}) for maior que L_{crLh} , P_{crLh} é igual ao valor de carga crítica no ponto L_{crLh} . Caso o comprimento de L_{crLh} for menor que L_{hole} , o valor de P_{crLh} é igual ao valor da carga crítica no ponto L_{hole} .

A flambagem elástica em perfis com furos também pode ser determinada por meio do método dos elementos finitos.

A capacidade do elemento para perfis com furos para a flambagem distorcional, de acordo com a AISI S100:2016 é calculada pelas Equações 4.37, 4.38 e 4.39.

$$P_{nD} = P_{ynet} \quad \text{se } \lambda_d < \lambda_{d1} \quad (4.37)$$

$$P_{nD} = P_{ynet} - \left(\frac{P_{ynet} - P_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) \cdot (\lambda_d - \lambda_{d1}) \quad \text{se } \lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2} \quad (4.38)$$

$$P_{nD} = \left[1 - 0,25 \cdot \left(\frac{P_{crD}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \cdot \left(\frac{P_{crD}}{P_y} \right)^{0,6} \cdot P_y \quad \text{se } \lambda_d > \lambda_{d2} \quad (4.39)$$

Sendo que os valores de esbeltez λ_d , λ_{d1} e λ_{d2} e das cargas P_{d2} , P_y e P_{ynet} são calculados pelas Equações 4.40, 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 e 4.45, respectivamente.

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crD}}} \quad (4.40)$$

$$\lambda_{d1} = 0,561 \cdot \left(\frac{P_{ynet}}{P_y} \right) \quad (4.41)$$

$$\lambda_{d2} = 0,561 \cdot \left[14 \cdot \left(\frac{P_y}{P_{ynet}} \right)^{0,4} - 13 \right] \quad (4.42)$$

$$P_{d2} = \left[1 - 0,25 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1,2} \right] \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{1,2} \cdot P_y \quad (4.43)$$

$$P_y = A_g \cdot f_y \quad (4.44)$$

$$P_{ynet} = A_{net} \cdot f_y \quad (4.45)$$

Onde A_g é a área bruta, A_{net} é área líquida, f_y é a tensão de escoamento, e P_{crD} é a carga crítica distorcional elástica.

Em relação a flambagem local em elementos com furos, a capacidade de carga dos elementos deve ser calculada pelas equações de flambagem local mostradas nas Equações 4.1 e 4.2, com exceção da carga crítica elástica local (P_{crL}), que deve ser determinada considerando a influência dos furos. Além disso, a capacidade de carga da flambagem local (P_{nL}), deve seguir a relação da Equação 4.46.

$$P_{nL} \leq P_{ynet} \quad (4.46)$$

Em relação a flambagem global em elementos com furos, a formulação permanece a mesma, com exceção da carga crítica elástica global (P_{crG}), que deve ser determinada considerando a influência dos furos.

4.4 MRD EM SEÇÕES RACK PERFURADAS

O MRD com furos não é válido para as seções rack, que possuem perfurações por todo seu comprimento, devido a isso, diversos autores como Elias et al (2018), Neiva et al (2018), Ren, Wang e Zhao (2018), Zhao, Ren e Qin (2017), Souza (2013), e Casafont et al (2011) realizaram simulações numéricas e ensaios experimentais para tentar validar e propor modificações no MRD para as seções rack perfuradas. Todos estes autores partiram das equações do MRD sem furos para tentar validar as seções, onde a área bruta foi substituída pela área líquida, e as flambagens críticas elásticas foram determinadas considerando os furos. Dentre as modificações do MRD para seções rack perfuradas, destacam-se as propostas de Neiva et al. (2018) e a Ren, Wang e Zhao (2018).

Ren, Wang e Zhao (2018) propuseram modificações no MRD de seções racks perfuradas em relação ao cálculo flambagem distorcional e da interação D-G, que são mostradas nas Equações 4.47 e 4.48.

$$P_{nD} = P_y \quad \text{se } \lambda \leq 0,53 \quad (4.47)$$

$$P_{nD} = P_y \cdot \left(\frac{P_{cr}}{P_y} \right)^{0,6} \cdot \left[1 - 0,32 \cdot \left(\frac{P_{cr}}{P_y} \right)^{0,4} \right] \quad \text{se } \lambda > 0,53 \quad (4.48)$$

Sendo que os valores de esbeltez e carga de escoamento são determinados pelas Equações 4.49 e 4.50.

$$\lambda = \sqrt{\frac{P_y}{P_{cr}}} \quad (4.49)$$

$$P_y = A_{net} \cdot F_y \quad (4.50)$$

Sendo que, P_{cr} é carga crítica obtida para o primeiro modo de flambagem via análise de flambagem elástica e A_{net} é a área líquida.

A proposta de Neiva et al. (2018) foi determinada para seções rack perfuradas com flambagem distorcional, como mostram as Equações 4.51 e 4.52.

$$P_{nD} = A_{net} \cdot F_y \quad \text{se } \lambda \leq 0,294 \quad (4.51)$$

$$P_{nD} = \left(1 - \frac{0,50}{\lambda^{0,32}}\right) \cdot \frac{A_{net} \cdot F_y}{\lambda^{1,1}} \quad \text{se } \lambda < 0,294 \quad (4.52)$$

A esbeltez é calculada pela Equação 4.53.

$$\lambda = \left(\frac{A_{net} \cdot F_y}{P_{crD}}\right)^{0,5} \quad (4.53)$$

Onde: A_{net} é a área líquida, F_y é a carga de escoamento, e P_{crD} é a carga de flambagem crítica elástica para seção com furos obtido por MEF.

Silva (2017) realizou um estudo numérico via GBTUL e ANSYS em perfis de seção rack com e sem perfurações para verificar a qualidade das curvas do MRD de compressão centrada presentes na norma AISI S100:2016. Os perfis foram selecionados para flambar predominantemente no modo distorcional. No caso de seções sem furos, para selecionar o comprimento em que a seção sofre flambagem distorcional foi utilizado o software GBTUL. Para as seções perfuradas foram utilizados os mesmos comprimentos que os obtidos para as seções maciças para posterior análise via MEF. Silva (2017) conclui que para os tipos de seções contidas no estudo, o MRD com perfurações contido na norma AISI S100:2016 não é válido para seções rack com perfurações.

4.4.1 Formulações para utilização de espessura reduzida

A maior dificuldade nas simulações numéricas de perfis racks perfurados é que os softwares GBTUL e CUFSM não realizam análises de perfis com furos. Estes dois softwares são muito úteis para realização de análises de flambagem elástica, e quando não estão disponíveis, a determinação da carga crítica elástica de flambagem deve ser feita via MEF. No entanto, é possível contornar esse problema, considerando as partes perfuradas da seção como uma parede espessura reduzida, resultando no mesmo comportamento e carga crítica da seção

perfurada. Essa metodologia é uma alternativa ao método dos elementos finitos para determinação das cargas críticas de flambagem elástica em perfis rack perfurados.

Davies, Leach, e Taylor (1997) desenvolveram um método empírico para utilização da Teoria Generalizada de Vigas (GBT) em perfis com furos, esse método determina o cálculo de uma espessura equivalente para as regiões perfuradas. Para confirmar os resultados obtidos com o uso da espessura equivalente e o GBT, os autores realizaram ensaios experimentais de compressão excêntrica e simulações numéricas pelo software ANSYS. A fórmula para a espessura equivalente (t_{eq}) proposta por esses autores é mostrada na Equação 4.54.

$$t_{eq} = \left[\frac{L_p}{L} \cdot \frac{b_n}{b_g} + \left(1 - \frac{L_p}{L}\right) \cdot \frac{b_g}{b} \right] \cdot t \quad (4.54)$$

Onde:

t_{eq} = espessura equivalente;

t = espessura do elemento;

L_p = comprimento do furo, multiplicado pelo número de furos;

L = comprimento do elemento;

b = largura da placa;

b_p = largura total das perfurações na área efetiva da placa;

b_n = largura efetiva líquida da placa, dado pela Equação 4.55;

b_g = largura efetiva bruta da placa, dado pelas Equações 4.56 e 4.57

A largura líquida efetiva do perfil é dada pela Equação 4.55, onde b_p corresponde a largura total de perfurações.

$$b_n = b_g - b_p \quad (4.55)$$

A carga crítica (p_{cr}) do elemento é dada pela Equação 4.56, onde K corresponde a um fator de flambagem cujo valor é 4.

$$p_{cr} = 185000 \cdot K \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (4.56)$$

Caso o valor de p_{cr} seja menor que 0.123, $b_g = b$. Caso contrário, o valor da largura efetiva bruta (b_g) é dada pela Equação 4.57.

$$b_g = b \cdot \left[1 + 14 \cdot \left(\sqrt{\frac{f_y}{p_{cr}}} - 0,35 \right)^4 \right]^{-0.2} \quad (4.57)$$

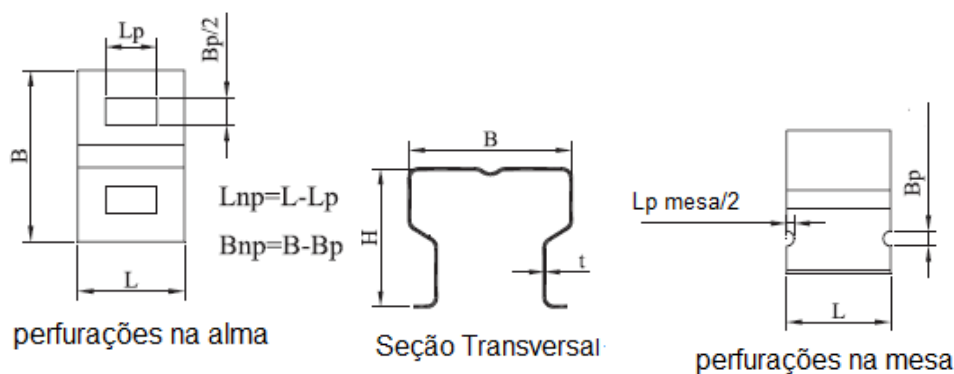
Casafont et al. (2012, 2013) realizaram análises de flambagem elástica em perfis rack perfurados utilizando o método das faixas finitas. O objetivo do estudo era determinar espessuras equivalentes para as regiões dos furos para que o software CUFSM pudesse ser utilizado. Os autores apresentaram três equações de espessura equivalente, sendo uma formulação para cada tipo de flambagem. As fórmulas para equações das espessuras equivalentes dos modos de flambagem local (t_{rL}), distorcional (t_{rD}) e global (t_{rG}) estão contidas nas Equações 4.58, 4.59 e 4.60 respectivamente. Onde t_r é o valor da espessura reduzida, t é o valor da espessura real. Os demais parâmetros são explicados na Figura 4.1. Neste caso, na utilização do software CUFSM, as regiões perfuradas são consideradas com tensão de compressão nula.

$$t_{rL} = 0,61 \cdot t \cdot \frac{L_{np} \cdot B_{np}}{L \cdot H} + 0,18 \cdot t \cdot \frac{B_p}{L_p} + 0,11 \quad (4.58)$$

$$t_{rD} = 0,9 \cdot t \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{L_{np}}{L}\right)} \quad (4.59)$$

$$t_{rG} = 0,7 \cdot t \cdot \left(\frac{L_{np}}{L}\right) \quad (4.60)$$

Figura 4.1: Parâmetros das Equações 4.58, 4.59 e 4.60



Fonte: Casafont et al. (2013), adaptado

Casafont et al. (2012, 2013) concluíram que as fórmulas de espessura equivalente para os casos de flambagem distorcional e global apresentaram boa correlação com os resultados obtidos via MEF, no entanto, os resultados obtidos utilizando a fórmula para espessura equivalente para flambagem local não apresentou bons resultados. O principal objetivo desses estudos era facilitar o uso do MRD para perfis perfurados de seções rack e verificar a qualidade do método.

CAPÍTULO 5

DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Neste capítulo será definido o modelo numérico em elementos finitos desenvolvido no *software* ABAQUS para realização das análises linear e não linear de flambagem. Além disso, serão feitas análises complementares de flambagem linear elástica nos softwares GBTUL e CUFMS, portanto, também serão definidos os modelos numéricos para utilização desses dois softwares. Após a determinação dos modelos, os ensaios experimentais em colunas perfuradas de seção rack realizados por Souza (2013) e Faria (2016) foram validados numericamente pelo modelo proposto no ABAQUS.

5.1 MODELO NUMÉRICO EM ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é o método que tende a melhor representar o comportamento experimental das estruturas, pois nesse método é possível simular a maioria dos fatores que existem na simulação experimental, incluindo as perfurações, quaisquer condições de aplicação de carga e condições de contorno, além de ser possível incluir o comportamento não linear geométrico e material do elemento.

Devido ao grande desenvolvimento de programas comerciais que utilizam o MEF, a utilização de simulações numéricas nos estudos de estabilidade estrutural vem crescendo nos últimos anos. Com o *software* ABAQUS diversas pesquisas foram realizadas em colunas sujeitas à compressão de PFFs, dentre elas destacam-se as simulações numéricas conduzidas em perfis sem furos por Ashraf, Gardner e Nethercot (2006), Borges Dinis, Camotim e Silvestre (2007), Camotim e Dinis (2011b), Garifullin e Nackenhorst (2015) e Schafer, Li e Moen (2010). No caso de simulações de seções rack perfuradas realizadas no ABAQUS, destacam-se as

pesquisas realizadas por Crisan, Ungureanu e Dubina (2012b) e Ren, Wang e Zhao (2019). Outros trabalhos com simulações numéricas de seções rack perfuradas foram desenvolvidos pelo *software* ANSYS, e foram realizadas por Bonada et al. (2012, 2016); Faria (2016); Neiva et al. (2018); Pastor et al. (2014); Roure et al. (2011) e Souza (2013).

Nos trabalhos citados anteriormente, realizando análises não lineares com o uso dos softwares de elementos finitos ABAQUS e ANSYS, os resultados obtidos com as simulações numéricas obtiveram boa correlação com os resultados experimentais.

A análise numérica neste trabalho foi conduzida utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) no programa comercial ABAQUS 6.14. A partir desse programa é possível realizar análises lineares e não lineares de flambagem em perfis formados a frio com furos, que é o objetivo desse trabalho. Como já citado em tópicos anteriores, a análise não linear utilizando o MEF é dos métodos mais utilizados para se aproximar do comportamento real da estrutura, sendo que nesta análise a estrutura é considerada com imperfeições geométricas. As imperfeições geométricas são determinadas em uma análise linear de flambagem, onde a configuração deformada de um modo de flambagem ou a combinação de vários modos de flambagem são considerados como imperfeição geométrica para realização da análise não linear.

A definição do modelo numérico no *software* ABAQUS consiste na escolha dos tipos de elementos, das propriedades mecânicas, das condições de contorno, aplicação das cargas, definição das malhas, definição do comportamento material do elemento, incorporação das imperfeições geométricas e determinação do tipo de solução para as análises linear e não linear.

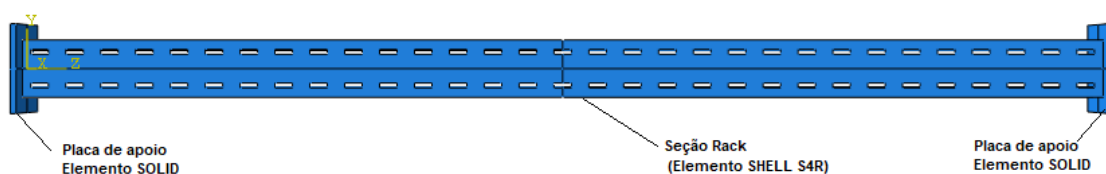
5.1.1 Definição do tipo de elemento e malha

Para simular o comportamento experimental de flambagem linear elástica e a análise de colapso não linear foi utilizado um tipo de elemento para as colunas e outro para as placas de aplicação de carga. As colunas por se tratarem de PFFs de colunas finas, foram simuladas com elementos de casca do tipo SHELL denominados S4R, este são elementos quadriláteros com quatro nós, e cada nó possui seis graus de liberdade, sendo três translações e três rotações, além disso, esse elemento possui funções de forma linear e integração reduzida. Esse elemento foi utilizado com sucesso nas simulações numéricas de seções rack perfuradas de Crisan, Ungureanu e Dubina (2012b).

As placas de apoio e aplicação de carga foram simuladas com elemento do tipo sólido denominado C3D8R, este elemento possui oito nós com função de forma linear, e cada nó

possui três graus de liberdade, que são as três translações. A Figura 5.1 mostra o modelo numérico no ABAQUS.

Figura 5.1: Modelagem numérica Seção rack perfurada



Fonte: O autor (2021)

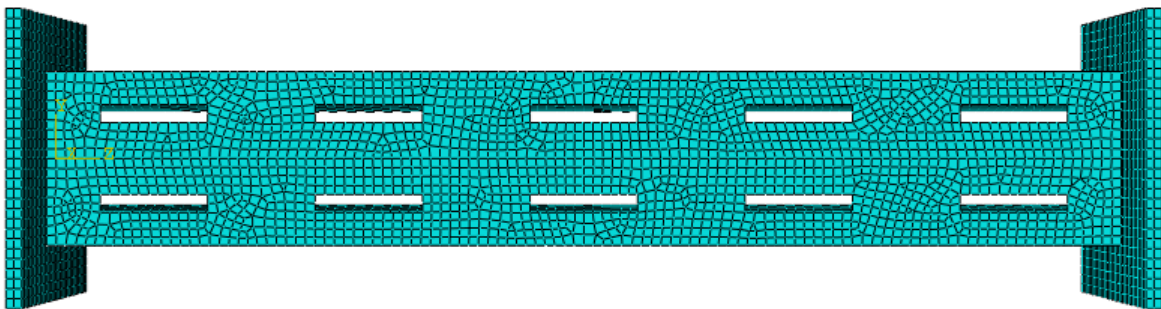
A dimensão média dos elementos de malha quadrilaterais S4R utilizados foram de 5 mm. Esse comprimento de malha foi utilizado com sucesso nas simulações de seções rack perfuradas realizadas por Bonada et al. (2012), Crisan, Ungureanu e Dubina (2012b), Pastor et al. (2014) e Ren, Wang e Zhao (2019). Para verificar a qualidade da malha de 5 mm, foi feito um estudo de sensibilidade de malhas de duas colunas perfuradas ensaiadas experimentalmente por Faria (2016). A Tabela 5.1 mostra esse estudo de sensibilidade, onde os valores experimentais de carga de ruptura são comparados com os obtidos numericamente com diferentes valores de malhas, na tabela também é comparado o número de elementos e o tempo de total de processamento considerando os diferentes valores de malha. A partir da tabela é possível confirmar que as malhas de 5 mm e 10 mm apresentam os melhores resultados, no entanto, a diferença tempo de processamento para os dois casos não é significativa, portanto, a malha escolhida para as análises no ABAQUS foi de 5 mm. As colunas ensaiadas por Faria (2016), e mostradas na tabela, tem a mesma tipologia que as colunas ensaiadas por Souza (2013) mostrada na seção 3.1. Onde CM representa colunas médias, e 60% e 80% representam furos com altura de 60 e 80 por cento da largura da alma, respectivamente. O computador utilizado nas análises possui processador Intel Core I7 2.9 GHz e memória RAM de 8GB.

Tabela 5.1: Estudo de sensibilidade de tamanho da malha dos elementos no ABAQUS

Coluna	Dimensão malha (mm)	P_{exp} (kN)	P_{num} (kN)	Erro (%)	Número de elementos	Tempo de processamento
CM 60% (L=1579,2 mm)	20	39,050	33,018	15,45	1195	01'26"
	15		36,169	7,38	2091	01'37"
	10		37,800	3,20	4564	02'39"
	5		38,828	0,57	19569	09'12"
CM 80% (L=752,2 mm)	20	41,067	34,540	15,89	636	00'52"
	15		36,743	10,53	982	01'15"
	10		39,697	3,34	2420	01'48"
	5		41,626	1,34	10878	05'10"

Fonte: O autor (2021)

A Figura 5.2 mostra a modelagem de uma das colunas ensaiadas por Faria (2016), desenvolvida no software ABAQUS, onde é possível observar a aplicação das malhas nos elementos, sendo que as malhas foram aplicadas de maneira automática pelo programa com tamanho de 5 mm, e devido à presença dos furos, algumas partes da seção ficaram com malhas com geometria irregular.

Figura 5.2: Aplicação da malha na seção de Faria (2016)

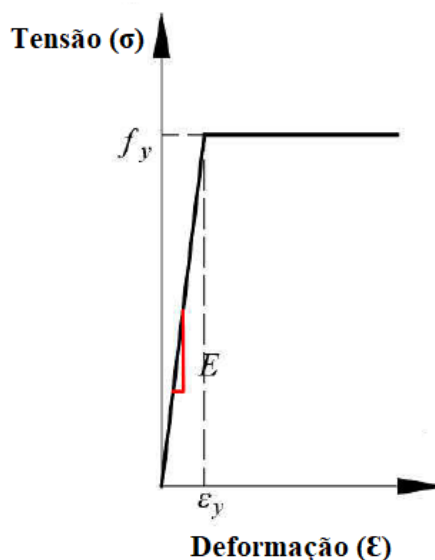
Fonte: O autor (2021)

5.1.2 Definição das propriedades mecânicas

A coluna de seção rack é considerada com comportamento homogêneo e isotrópico. As propriedades elásticas desse material são o módulo de elasticidade ($E=210$ GPa) e o coeficiente de Poisson ($\nu=0,3$). A plasticidade foi assumida com um comportamento elástico-plástico perfeito, este comportamento é determinado pelo diagrama de tensão por deformação mostrado na Figura 5.3, sendo que nesse tipo de comportamento é necessário apenas a inclusão da tensão

de escoamento (f_y) para realização da análise não linear. Foi considerado um valor de tensão de escoamento de 345 MPa.

Figura 5.3: Diagrama tensão por deformação para comportamento elasto-plástico perfeito implementado no ABAQUS



Fonte: O autor (2021)

As placas de apoio e aplicação de carga também são consideradas com comportamento homogêneo e isotrópico, no entanto, para este elemento foi considerado apenas o comportamento linear. Além disso, as placas, que são elementos rígidos, são consideradas com alto valor de rigidez, com módulo de elasticidade de 20000 GPa, mesmo valor utilizado na simulação numérica realizada por Freitas, Freitas e Souza (2005). Por fim, o coeficiente de Poisson também foi considerado com valor de 0,3.

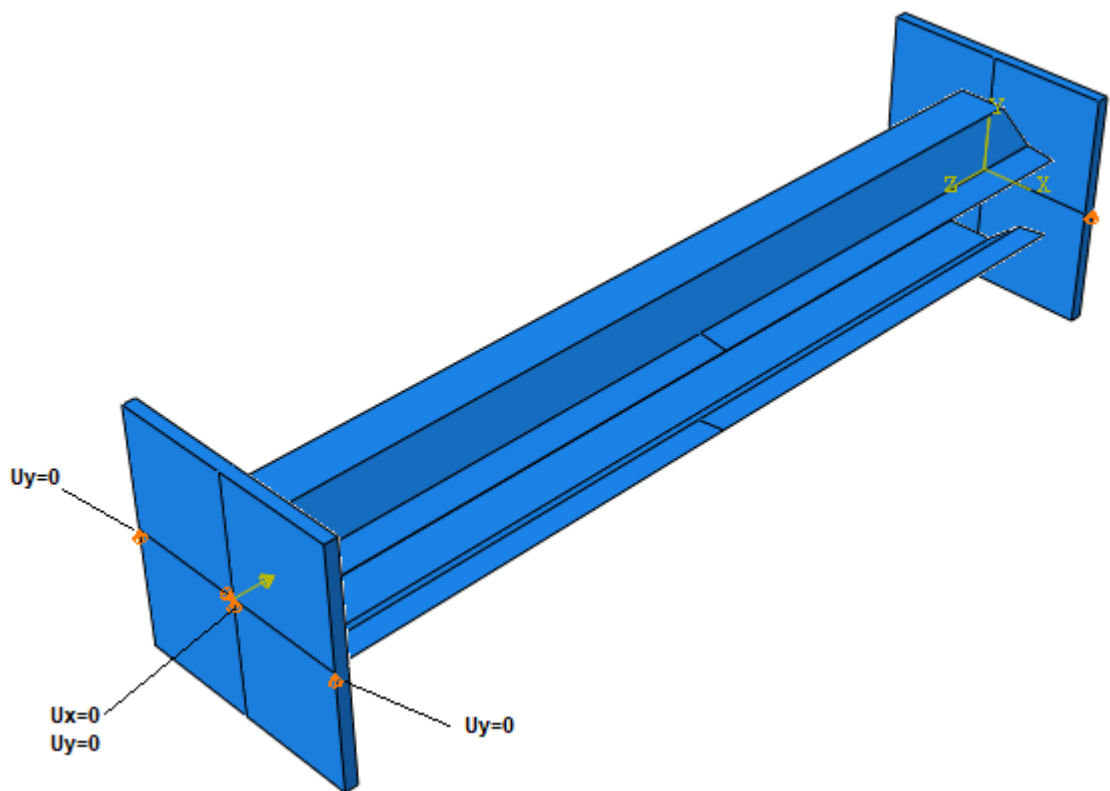
5.1.3 Definição das condições de contorno e aplicação de carga

Nas simulações numéricas foram considerados três tipos de condição de contorno. A primeira condição de contorno é a totalmente engastada, a segunda simplesmente apoiada, e a terceira apoiada com a torção restringida. Nos casos de condição engastada e apoiada com torção restringida, onde foram utilizadas as placas, os nós coincidentes da placa e da seção rack foram acoplados para evitar a distorção.

A condição apoiada com torção restringida foi determinada a partir dos modelos numéricos de Bonada et al. (2012, 2016), Pastor et al. (2014) e Roure et al. (2011), sendo que

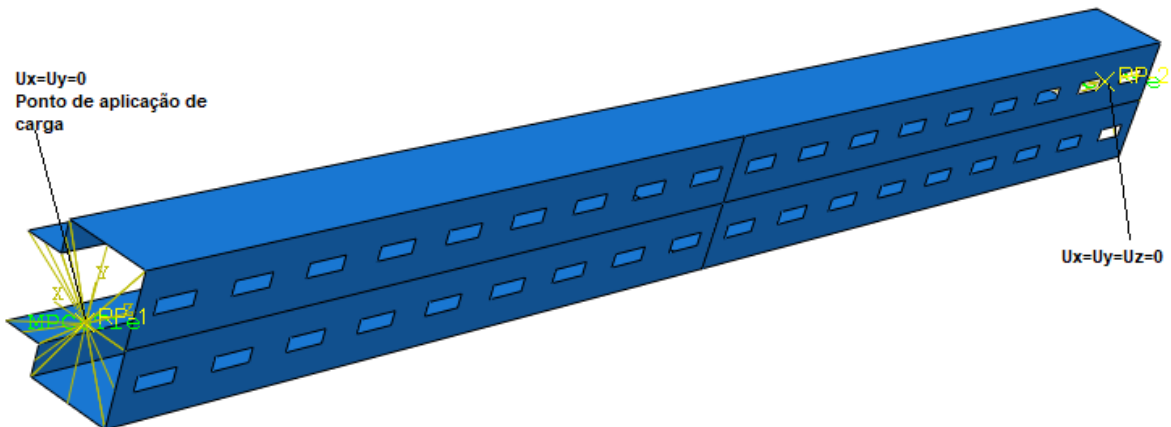
para alcançar essa condição, em uma das placas, no ponto de aplicação de cargas, as três translações são restringidas, na outra placa, onde a carga é realmente aplicada, as translações transversais são restringidas no ponto de aplicação da carga, porém o deslocamento axial é liberado. Além disso, para restringir a rotação longitudinal (torção), dois deslocamentos são restringidos nas extremidades das duas placas na linha de simetria da seção rack. A Figura 5.4 mostra essa condição de contorno determinada no ABAQUS.

Figura 5.4: Simulação da condição apoiada com torção restringida no ABAQUS



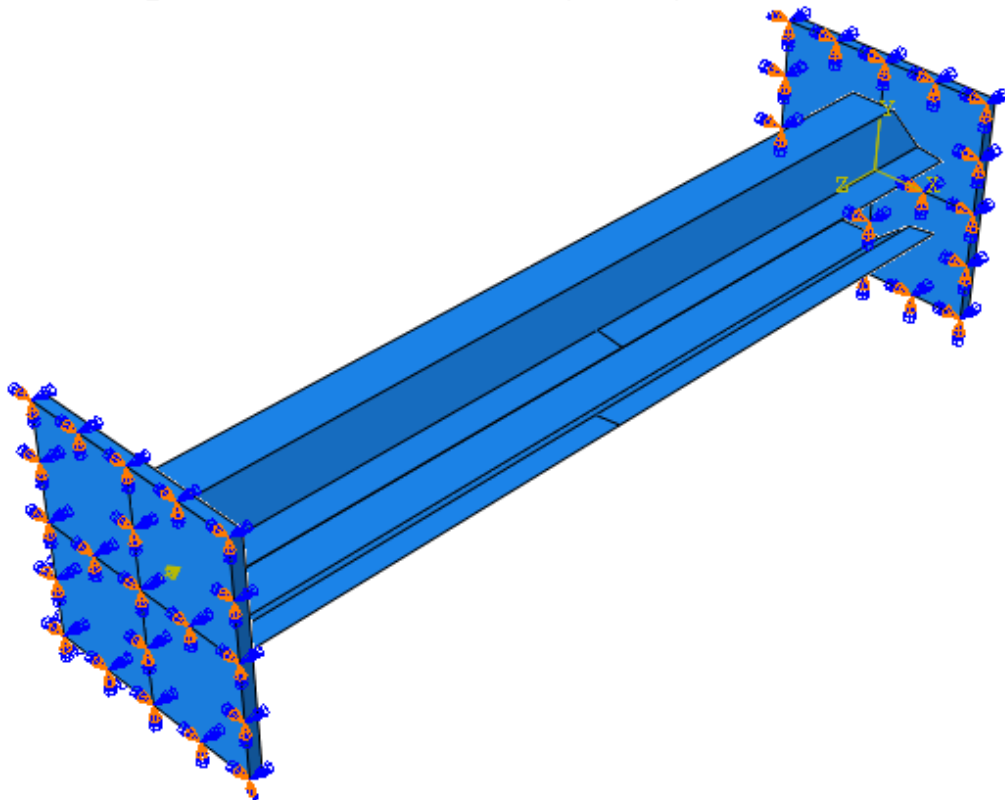
Fonte: O autor (2021)

Para a condição apoiada não foram modeladas placas de apoio, a carga foi aplicada no centro de gravidade, e esse centro foi ligado a todo perímetro da extremidade da seção pelo comando TIE. No centro de gravidade também foi aplicado as condições de contorno, impedindo os deslocamentos transversais nesse ponto. A Figura 5.5 mostra essa condição modelada no ABAQUS.

Figura 5.5: Simulação da condição apoiada no ABAQUS

Fonte: O autor (2021)

A condição engastada foi obtida restringindo todos os graus de liberdade das duas chapas, com exceção da chapa onde a carga é aplicada, e o deslocamento longitudinal é liberado, essa condição é mostrada na Figura 5.6, e foram baseadas nos modelos de Faria (2016) e Roure et al. (2011).

Figura 5.6: Simulação da condição engastada no ABAQUS

Fonte: O autor (2021)

Existe uma dificuldade na determinação do ponto de aplicação da carga desses perfis, geralmente a carga é aplicada no centro de gravidade da seção, no entanto, essas seções tem perfurações por todo o comprimento longitudinal, logo existe uma variação entre as seções bruta e líquida. Os centros de gravidade das seções líquida e bruta podem ser determinadas pelo *software* CUFSM, sendo que para as seções líquidas, os furos são considerados como paredes com espessura igual a 0. Além disso, em certos perfis rack, as perfurações não têm formato regular, ou ainda, os furos localizados em diferentes paredes da seção podem não estar posicionados na mesma linha de corte, logo, nestes casos existe mais de um tipo de seção líquida, dificultando ainda mais a determinação do ponto de aplicação.

Roure et. al. (2011) propôs um método para aplicação de carga no centro de gravidade efetivo da seção de uma das chapas, este é o ponto de aplicação onde ocorre a maior carga de ruptura. Para determinar esse ponto é necessário realizar várias análises preliminares de carga de ruptura, variando apenas o ponto de aplicação da carga, sendo que esses pontos são localizados na linha de simetria do perfil rack, e o ponto com maior valor de carga de ruptura é determinado como centro de gravidade efetivo, este é o ponto onde a carga vai ser aplicada.

5.1.4 Definição das imperfeições geométricas

A metodologia para inserção das imperfeições geométricas será a mesma da utilizada em perfis sem furos com interação entre as flambagens, que já foi mostrada no Capítulo 2, e consiste na combinação linear dos modos puros de flambagem obtidos na análise linear de flambagem elástica. No caso de perfis com interação D-G, as configurações deformadas dos modos puros de flambagem distorcional e global serão combinadas para obter a forma final da imperfeição a ser utilizada.

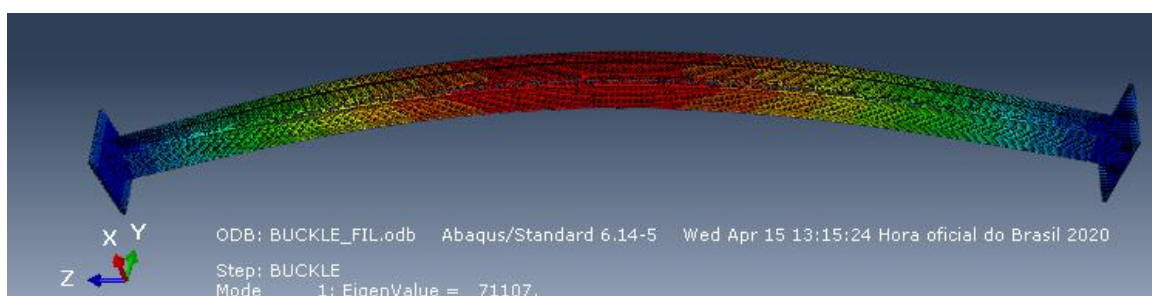
Os valores das magnitudes das imperfeições geométricas serão de $b_w/200$ para flambagem local, $0,5t$ para flambagem distorcional e $L/750$ para flambagem global, sendo que b_w representa o comprimento da alma, t a espessura e L o comprimento da coluna. Esses são os valores recomendados de imperfeições para seções rack perfurados determinadas no estudo de Pastor et al. (2014).

As tensões residuais e os efeitos de aumento de resistência nos cantos do perfil serão desprezados, considerando que um efeito anula o outro.

5.1.5 Métodos de solução do problema linear e não linear

A simulação numérica por meio do MEF é realizada em duas etapas, que são a análise linear e a análise não linear. Na análise linear, a estrutura é considerada perfeita, ou seja, sem imperfeições, devido a isso, em perfis formados a frio, que são estruturas extremamente sensíveis a imperfeições, a análise linear não é utilizada para simular o comportamento real da estrutura, mas para gerar os possíveis modos de flambagem do elemento com suas respectivas cargas críticas e configurações deformadas. Além disso, um desses modos ou a combinação de alguns desses modos são utilizados como imperfeição geométrica para análise não linear. A Figura 5.7 mostra a configuração deformada e a carga crítica do 1º modo de flambagem de uma coluna com furos retangulares na alma obtida pelo *software* ABAQUS, onde é possível observar a flambagem global na forma de flexão.

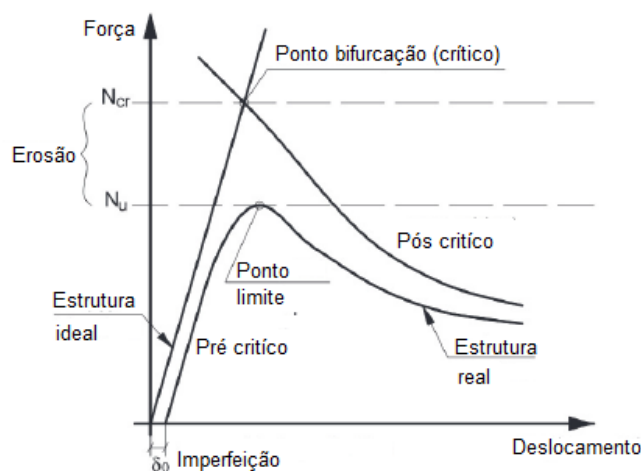
Figura 5.7: 1º modo de flambagem obtido no ABAQUS



Fonte: O autor (2021)

Além disso, com a utilização da análise de flambagem linear elástica, serão determinados os comprimentos das colunas D-G a partir da determinação das curvas de flambagem.

O comportamento real da estrutura se difere do comportamento ideal (análise linear) da estrutura devido a imperfeições que ocorrem no elemento. A diferença entre carga crítica (N_{cr} , estrutura ideal) e carga de ruptura (N_u , estrutura real) representa a erosão de carga devido a imperfeições em uma estrutura, como mostra a Figura 5.8. Além disso, de acordo com Dubina e Ungureanu (2014), a sensibilidade das imperfeições é máxima em comprimentos onde ocorre interação entre as flambagens.

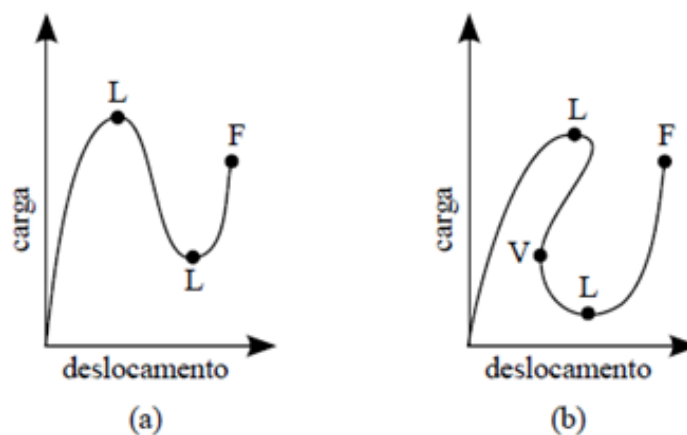
Figura 5.8: Comparação entre estrutural real e ideal

Fonte: Dubina e Ungureanu (2014), adaptado

A análise não linear é uma maneira de simular o comportamento real da estrutura, pois as imperfeições do elemento são consideradas. A configuração deformada de um modo de flambagem ou a associação de vários modos de flambagem obtidas na análise linear são utilizados como a forma da imperfeição geométrica do elemento, que é utilizado como um estado inicial do elemento para a realização da segunda etapa, que consiste na análise não linear geométrica e material do elemento. Neste trabalho, o problema não linear será resolvido com a utilização da técnica incremental-iterativa de Newton Raphson modificado em conjunto com o método de comprimento de arco linear de Riks (Riks, 1972, 1979). Nesta análise, o carregamento é aplicado de forma incremental, e para cada incremento de carga é encontrada uma condição de equilíbrio para a estrutura, este equilíbrio é determinado a partir da solução de sistemas não lineares. Por fim, a partir de todas as configurações de equilíbrio determinadas pelo método, é possível determinar o comportamento da estrutura a partir de suas curvas de equilíbrio, e assim determinar a carga de ruptura do elemento.

As curvas de equilíbrio possuem pontos críticos ou limites, dentre esses pontos destacam-se os pontos limites de carga e de deslocamento. A Figura 5.9 mostra curvas de equilíbrio com esses pontos, sendo que nessa figura, L representa um ponto limite de força, V representa um ponto limite de deslocamento, e F a falha do elemento.

Figura 5.9: Trajetórias de equilíbrio com pontos limites: (a) *Snap-through*; (b) *Snap-back*;



Fonte: Lacerda (2014)

Ao se analisar as trajetórias de equilíbrio da Figura 5.8, observa-se que ao se atingir um ponto crítico, a estrutura se torna instável, e ocorre um salto na curva entre dois pontos críticos, esse fenômeno é chamado de *snap*, sendo que a curva a) da Figura 5.8 mostra o fenômeno *snap-through*, e a curva b) mostra o fenômeno *snap-back*. Ao se determinar as curvas de equilíbrio utilizando o método de Newton-Raphson de maneira isolada, é possível ocorrer problemas de convergência nos pontos críticos, não sendo possível traçar os saltos que ocorrem entre esses pontos. Para resolver esse problema, é utilizado o método de comprimento de arco proposta por Riks (1972,1979). Esta é uma técnica de continuação que é utilizada em conjunto com o método de Newton-Raphson para determinação correta das curvas de equilíbrio, sendo este o método utilizado no ABAQUS para solução do problema não linear.

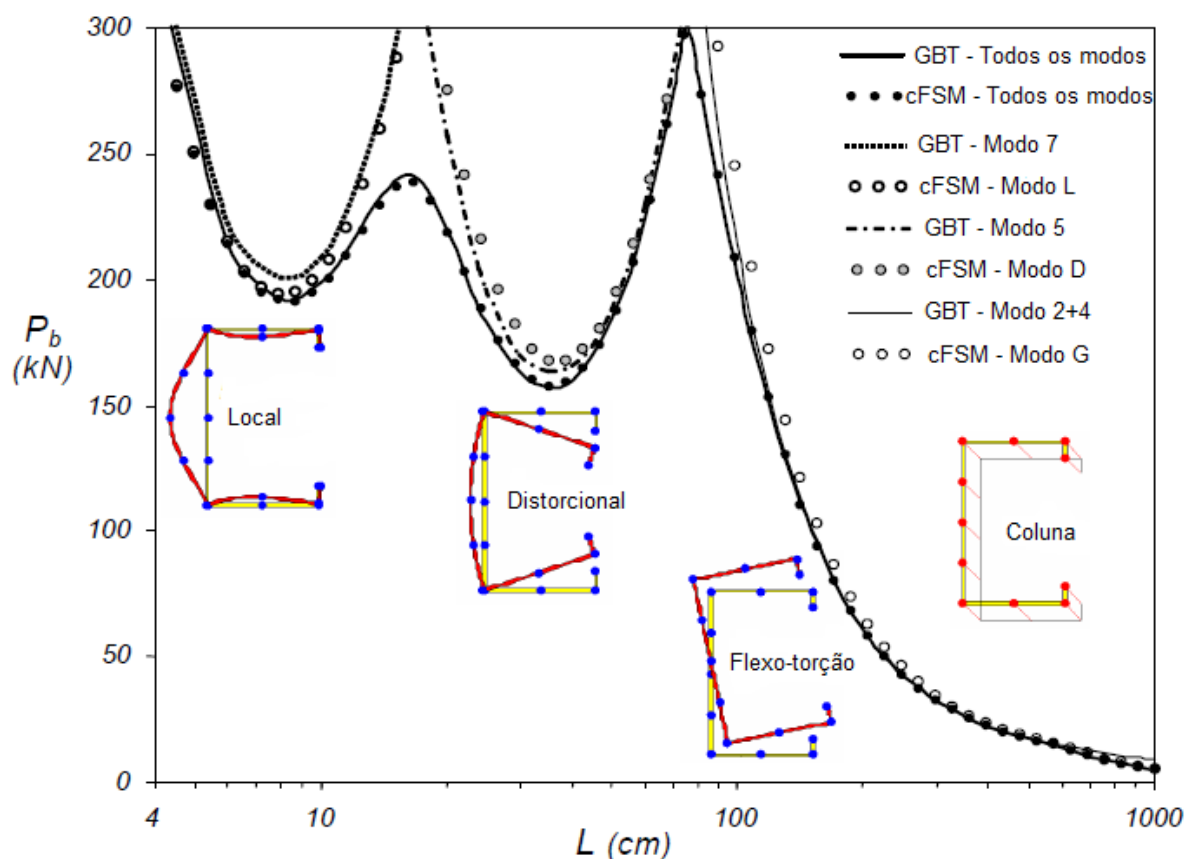
5.2 O MODELO NUMÉRICO NO GBTUL E CUFISM

Como já mencionado anteriormente, os softwares GBTUL e CUFISM realizam análises lineares de flambagem elástica em perfis formados a frio. A partir desses softwares é possível determinar a curva de flambagem elástica do perfil, além de suas cargas críticas e configurações deformadas para os modos local, distorcional e global.

A inserção dos dados de entrada nos dois softwares é feita de maneira similar, consistindo em determinar as propriedades elásticas do material, definir a geometria do elemento a partir dos seus nós e paredes, definir os comprimentos que serão analisados, e por fim definir as condições de contorno e aplicação de carga.

Ádány et al. (2009) realizaram uma comparação entre a teoria generalizada de vigas (GBT) que é utilizada no *software* GBTUL e o método das faixas finitas (FSM) utilizado no *software* CUFSM. A Figura 5.10 mostra a comparação entre as curvas de flambagem obtidas pelos dois métodos em uma coluna sujeita à compressão.

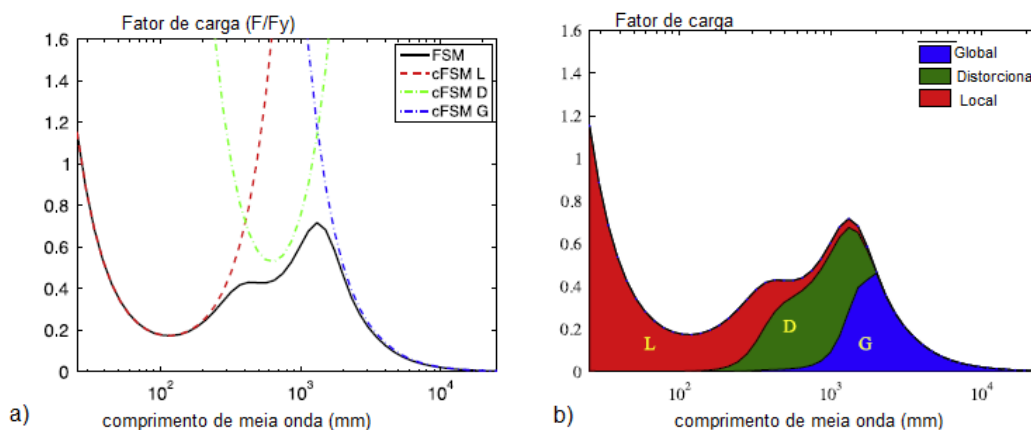
Figura 5.10: Comparação entre as curvas de flambagens obtidas pelo GBTUL e CUFSM



Fonte: Ádány et al. (2009)

A principal vantagem desses dois métodos é a possibilidade de obter soluções de flambagem elástica de maneira separada para os três modos de flambagem, e assim determinar a porcentagem modal de cada flambagem atuando em determinado comprimento do elemento, ou seja, para cada comprimento analisado, é possível quantificar a atuação de cada modo de flambagem, essa análise é muito importante para estudo da interação entre as flambagens. Essa separação não pode ser feita utilizando o MEF. A Figura 5.11 mostra a decomposição dos modos de flambagem e a participação de cada modo na curva de flambagem elástica de um perfil utilizando o CUFSM.

Figura 5.11: a) Decomposição modal das curvas de flambagem; b) Participação modal de cada flambagem;

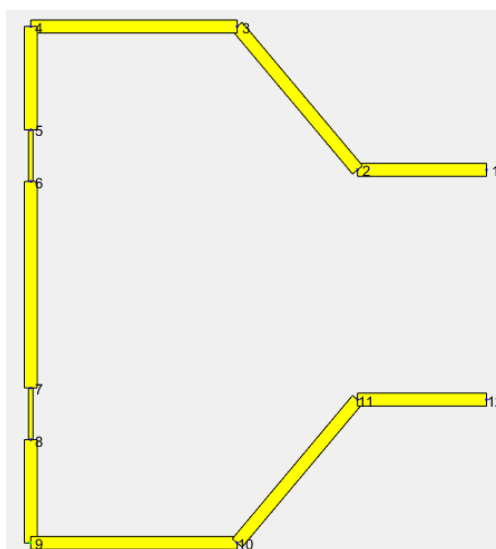


Fonte: Li et al. (2014), adaptado

Neste trabalho, esses softwares serão utilizados para determinar as curvas de flambagem linear elástica dos perfis, estas são utilizadas para determinar comprimentos onde ocorre a interação entre as flambagens D-G. Além disso, como já mencionado anteriormente, esses dois programas não aceitam perfis perfurados, logo, para superar esse problema, será utilizado o método de espessura equivalente, onde os furos no perfil serão substituídos por paredes com espessura reduzida. As metodologias de espessura equivalente são métodos simplificados, onde os resultados podem nem sempre estar corretos, portanto, os resultados obtidos com esses dois programas serão comparados com os obtidos pelo ABAQUS.

A metodologia de espessura equivalente utilizada no *software* CUFSM será a proposta por Casafont et al. (2012), enquanto que o GBTUL utilizará a metodologia proposta por Davies, Leach e Taylor (1997), ambas são mostradas na seção 4.4.1. A Figura 5.12 mostra a seção de Souza (2013) modelada no CUFSM considerando os furos como espessura reduzida.

Figura 5.12: Seção de Souza (2013) modelada no CUFSM com espessura reduzida nos furos



Fonte: O autor (2021)

Por fim, antes de realizar as análises utilizando espessuras equivalentes nos furos, é necessário verificar se as cargas críticas obtidas pelos softwares GBTUL e CUFSM são similares à carga crítica obtida pelo modelo numérico do ABAQUS em perfis sem furos. Logo, a Tabela 5.2 mostra a comparação das cargas críticas obtidas pelos três softwares para as colunas de Souza (2013). A condição de contorno é a apoiada, e os resultados foram comparados para três comprimentos de colunas. A partir da tabela é possível verificar que os resultados obtidos pelos três softwares são similares, onde a sexta coluna consiste na diferença dos resultados obtidos no ABAQUS e no GBTUL, e a sétima coluna consiste na diferença dos resultados obtidos nos ABAQUS e no CUFSM.

Tabela 5.2: Comparação carga crítica para os perfis S1 e S2 sem furos

Coluna	Comprimento (mm)	P_{ABAQUS} (kN)	P_{GBTUL} (kN)	P_{CUFSM} (kN)	Erro _{GBTUL} (%)	Erro _{CUFSM} (%)
Souza (2013)	384	58,614	59,467	61,48	1,4	4,7
	640	53,622	52,756	53,85	1,6	0,4
	1600	49,910	49,948	51,51	0,1	3,1

Fonte: O autor (2021)

5.3 VALIDAÇÕES DO MODELO NUMÉRICO (ABAQUS)

A partir do modelo numérico mostrado na seção 5.2, dois ensaios experimentais em colunas de seção rack perfuradas realizadas na Universidade Federal de Ouro Preto foram validados numericamente. O primeiro ensaio experimental foi realizado por Souza (2013) e o segundo por Faria (2016).

5.3.1 Seções rack perfuradas ensaiadas por Souza (2013)

Souza (2013) realizou ensaios experimentais em colunas curtas (CC) e médias (CM) de seção rack perfuradas, sendo que essas colunas possuem furos retangulares na alma, e a disposição dos furos foi mostrada na Figura 3.9. Tanto nas colunas curtas (CC), quanto nas colunas médias (CM) foram realizados ensaios em colunas sem furos, colunas com furos com comprimento igual a 60% da largura da alma, e em colunas com furos com comprimento igual a 80% da largura da alma. As colunas foram ensaiadas com condição simplesmente apoiada.

A comparação entre os resultados experimentais obtidos por Souza (2013) e as simulações numéricas obtidas neste trabalho das colunas curtas estão mostrada na Tabela 5.3, onde percebe-se que a maior disparidade dos resultados se encontra nas colunas sem furos, com erro de aproximadamente de 9%.

Tabela 5.3: Comparação dos resultados numéricos e experimentais das CC de Souza (2013)

TIPO	P _{Exp} (kN)	P _{Num} (kN)	Erro (%)
60%	36,949	38,014	2,80
80%	38,211	36,827	3,76
SF	40,821	44,959	9,20

Fonte: O autor (2021)

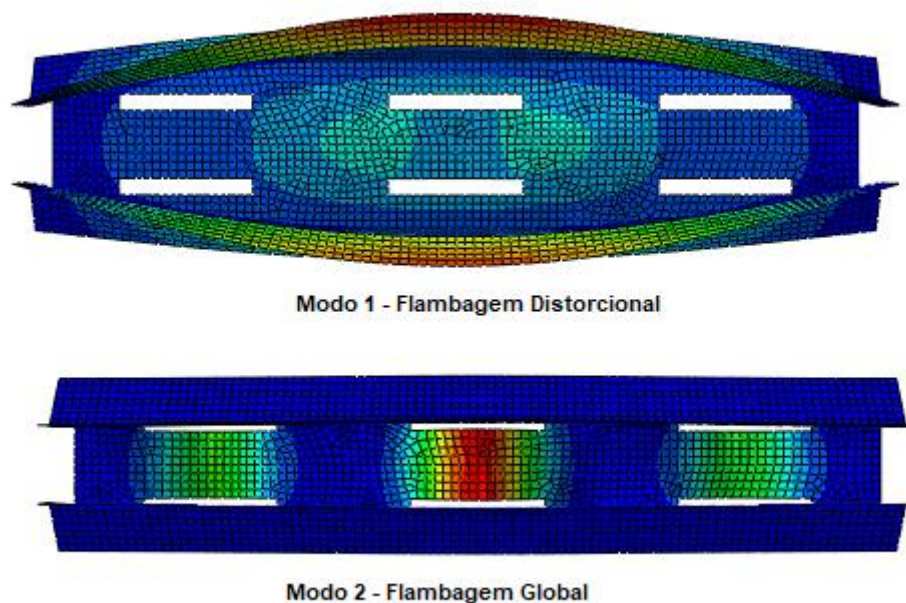
A comparação entre os resultados experimentais obtidos por Souza (2013) e as simulações numéricas obtidas neste trabalho das colunas médias estão mostradas na Tabela 5.4, onde percebe-se que a maior disparidade dos resultados se encontra nas colunas sem furos, com erro de aproximadamente de 10%.

Tabela 5.4: Comparação dos resultados numéricos e experimentais das CM de Souza (2013)

TIPO	P_{Exp} (kN)	P_{Num} (kN)	Erro (%)
60%	27,710	27,585	0,45
80%	32,811	34,720	5,50
SF	34,084	38,116	10,58

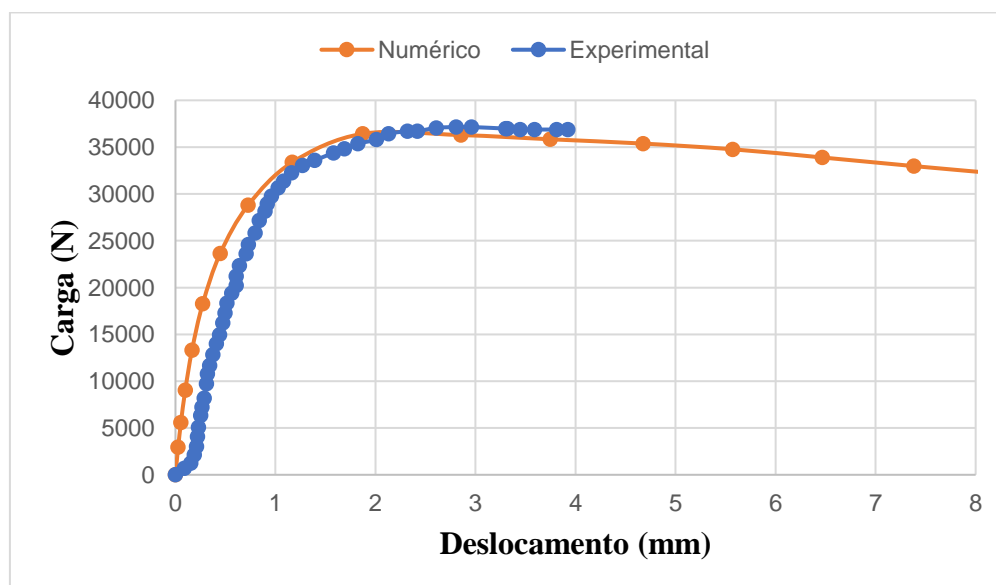
Fonte: O autor (2021)

Para realizar a análise não linear e determinar a carga de ruptura do elemento, inicialmente foi feita uma análise de flambagem linear elástica para se determinar os modos de flambagens, e a configuração deformada de um ou a combinação de alguns desses modos foram utilizadas como imperfeição geométrica para se realizar a análise não linear. A seleção dos modos de flambagem e a magnitude da imperfeição geométrica foi feita a partir de observações feitas no ensaio experimental e de medições das imperfeições geométricas. A Figura 5.13 mostra os dois modos de flambagem críticos induzidos que foram combinados como imperfeição geométrica para a coluna curta com furos com comprimento de 80% da largura da alma, sendo que o primeiro modo corresponde a uma flambagem local e o segundo a uma flambagem distorcional. Os modos de flambagem e os valores da magnitude das imperfeições geométricas utilizados nesta coluna foram os mesmos determinados por Souza (2013), que neste caso corresponde a um valor de 0,75mm para o modo local, e 0,5mm para o modo distorcional.

Figura 5.13: Modos de flambagem induzidos para imperfeição da CC 80%

Fonte: O autor (2021)

A partir da análise não linear, é possível determinar o comportamento a partir das curvas de equilíbrio de um ponto do elemento. A Figura 5.14 mostra a curva de equilíbrio obtida numericamente neste trabalho e a curva obtida experimentalmente por Souza (2013) do ponto mais externo de uma das mesas localizado na metade do comprimento da CC 80%.

Figura 5.14: Curva de equilíbrio da CC 80% de Souza (2013)

Fonte: O autor (2021)

Por fim, os resultados numéricos obtidos pelo *software* ABAQUS neste trabalho, e os obtidos por Souza (2013) são próximos, com um erro máximo na carga de ruptura de 10% nas colunas sem furos.

5.3.2 Seções rack perfuradas ensaiadas por Faria (2016)

Faria (2016) realizou ensaios experimentais em colunas rack perfuradas com a mesmo tipo de seção transversal e a mesma tipologia de furos dos ensaios experimentais realizados por Souza (2013), no entanto, nestes ensaios as colunas foram ensaiadas com condição totalmente engastada. A comparação entre os resultados experimentais obtidos por Faria (2016) e as simulações numéricas obtidas neste trabalho das colunas curtas está mostrada na Tabela 5.5, onde percebe-se que o maior erro entre os resultados se encontra por volta de 1%.

Tabela 5.5: Comparação dos resultados numéricos e experimentais das CC ensaiadas por Faria (2016)

TIPO	P_{Exp} (kN)	P_{Num} (kN)	Erro(%)
60%	44,800	45,288	1,08
80%	42,100	42,188	0,21
SF	56,100	56,727	1,11

Fonte: O autor (2021)

A comparação entre os resultados experimentais e numéricos das colunas médias está mostrada na Tabela 5.6, onde percebe-se que o maior erro entre os resultados se encontra por volta de 1%.

Tabela 5.6: Comparação dos resultados numéricos e experimentais das CM ensaiadas por Faria (2016)

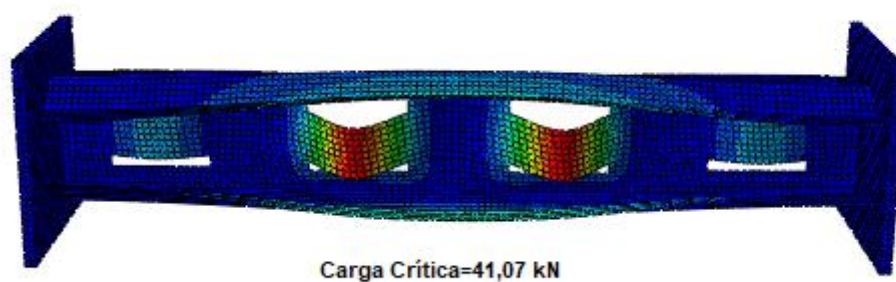
TIPO	P_{Exp} (kN)	P_{Num} (kN)	Erro(%)
60%	39,050	38,828	0,57
80%	41,067	41,626	1,34
SF	45,900	45,995	0,21

Fonte: O autor (2021)

A análise não linear foi feita com a mesma metodologia de Souza (2013), a seleção do modo de flambagem e da magnitude da imperfeição geométrica foi feita a partir de observações

feitas no ensaio experimental e de medições das imperfeições geométricas. Em todas as simulações numéricas foi considerado um valor de magnitude de imperfeição geométrica de 0,7 mm, valor determinado por Faria (2016). A Figura 5.15 mostra o modo de flambagem crítico induzido como imperfeição geométrica para a coluna curta com furos de comprimento de 80% da largura da alma.

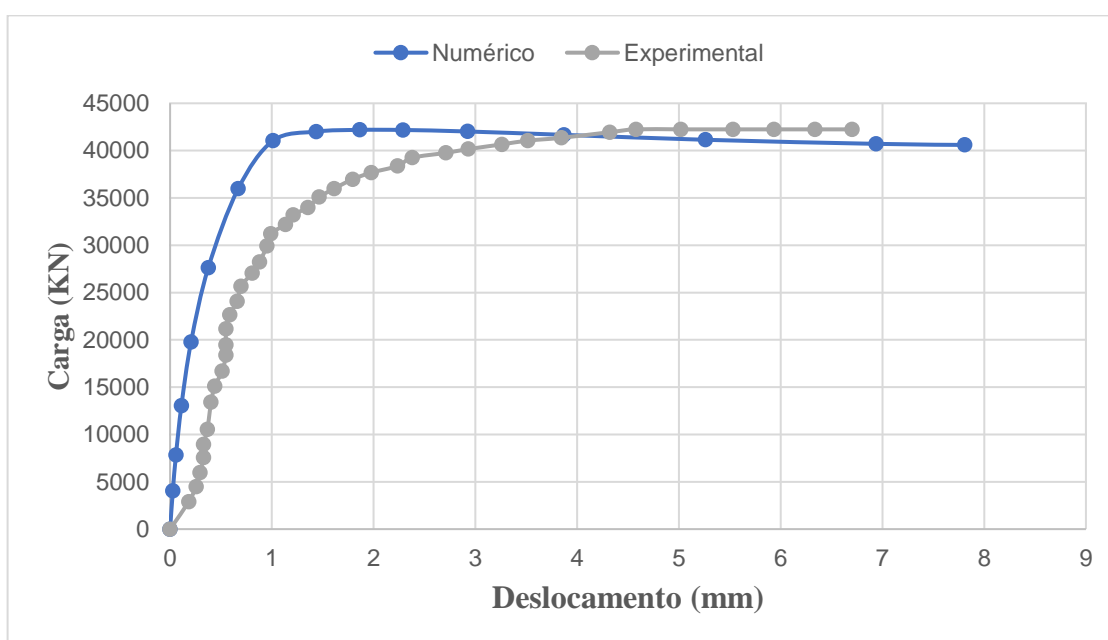
Figura 5.15: Modo de flambagem induzido como imperfeição da CC 80%



Fonte: O autor (2021)

A Figura 5.16 mostra a curva de equilíbrio obtida numericamente neste trabalho e a curva obtida experimentalmente por Faria (2016) do ponto mais externo de uma das mesas localizado na metade do comprimento da CC 80%.

Figura 5.16: Curva de equilíbrio da CC 80% de Faria (2016)



Fonte: O autor (2021)

Por fim, os resultados numéricos obtidos pelo *software* ABAQUS neste trabalho, e os obtidos por Faria (2016) são bem próximos, com um erro máximo na carga de ruptura de 1%. Dessa forma, considera-se que os modelo numérico foi validado.

CAPÍTULO 6

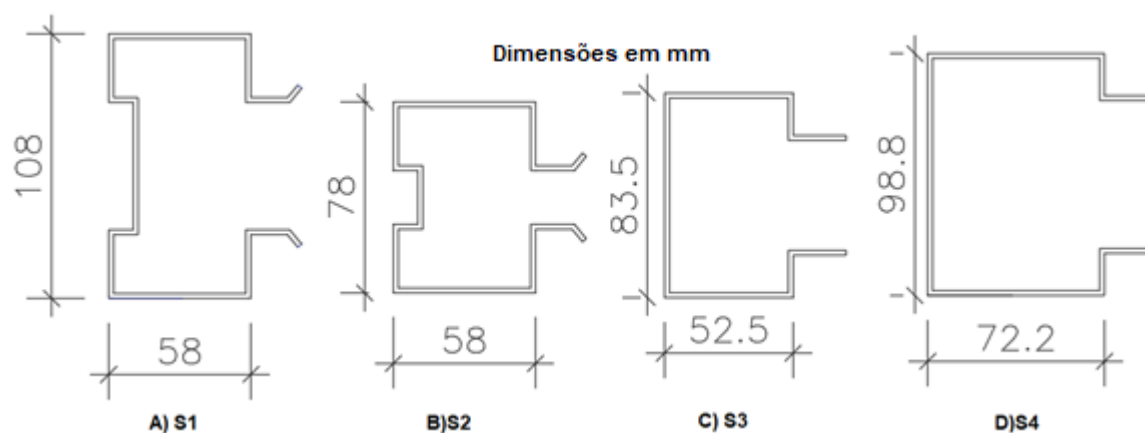
ANÁLISE PARAMÉTRICA

Neste capítulo será determinado a parametrização das análises que serão realizadas neste trabalho. Inicialmente serão definidas as seções utilizadas no trabalho, definindo também os tipos de furos, espessuras e condições de contorno utilizadas. Posteriormente, o desenvolvimento do trabalho será dividido em três etapas, que são mostradas a seguir:

- Análise Linear
- Análise Não Linear
- Aplicação do Método da Resistência Direta

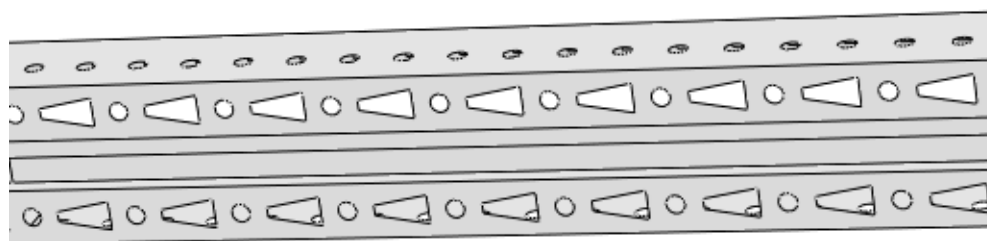
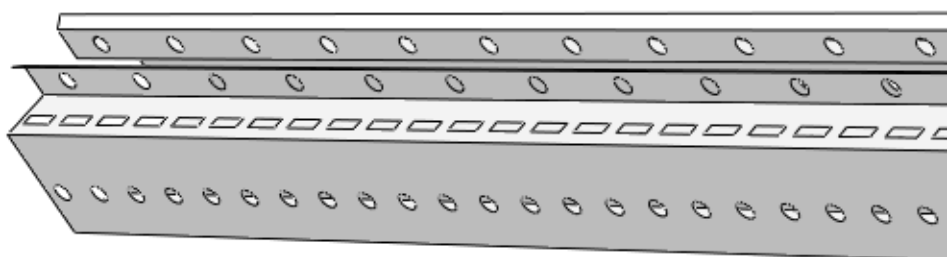
6.1 DEFINIÇÃO DAS SEÇÕES RACK

Neste trabalho, a interação D-G será analisada em 4 tipos de seções transversais, denominadas seções S1, S2, S3 e S4, a geometria das seções está mostrada na Figura 6.1.

Figura 6.1: Seções Rack

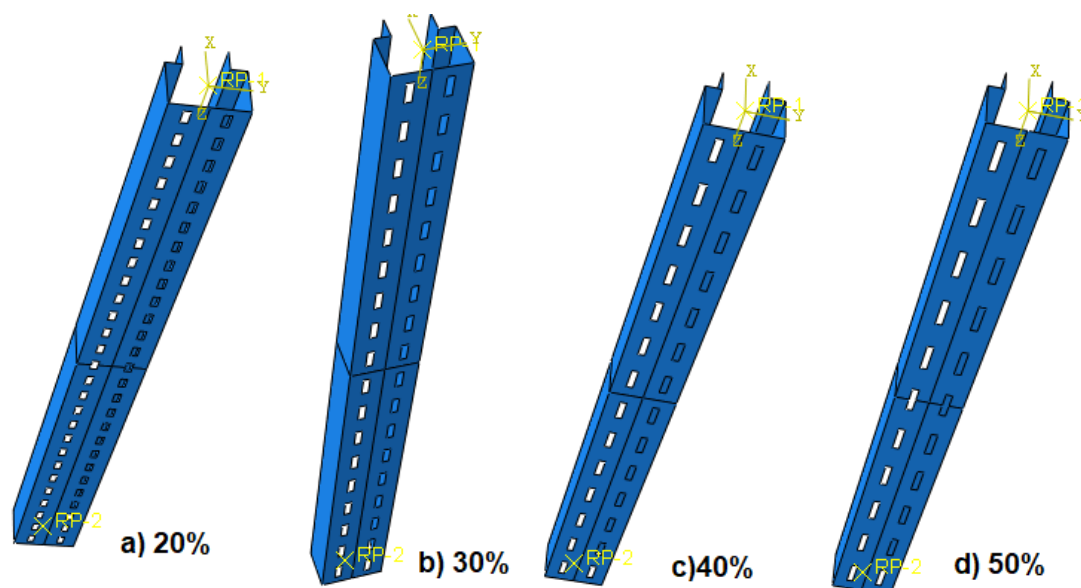
Fonte: O autor (2021)

As seções S1 e S2 são perfis rack utilizados em sistemas de estocagem, e produzidas por uma empresa localizada na cidade de Londrina-Pr. As análises conduzidas nesse trabalho obtiveram permissão concedida pela empresa. As seções S1 e S2 são utilizadas como colunas nos sistemas de estocagem e possuem perfurações por todo seu comprimento como mostra a Figura 6.2, onde pode ser observado que as seções possuem furos em todas as suas paredes. Além disso, as seções S1 e S2 tem como única diferença o seu valor de comprimento da alma, sendo que na seção S1 esse valor é de 108mm e na seção S2 de 78mm.

Figura 6.2: Furos Seções S1 e S2**a) Furos alma****b) Furos mesa**

Fonte: O autor (2021)

Nas seções S3 e S4 serão inseridos apenas furos retangulares na alma com a mesma metodologia realizada no trabalho de Souza (2013), serão considerados 4 tipos de furos, onde apenas altura do furo é variada, os furos possuem altura de 20%, 30%, 40% e 50% da largura da alma. Em todos os casos a largura do furo é de 8mm. Portanto, para as seções S3 e S4 serão feitas análises para 4 tipos de seções variando apenas as dimensões dos furos retangulares. A Figura 6.3 mostra a seção S3 com os furos de 20%, 30%, 40% e 50%. A metodologia dos furos feita por Souza (2013) é mostrada na Figura 3.9.

Figura 6.3: Furos Seção S3

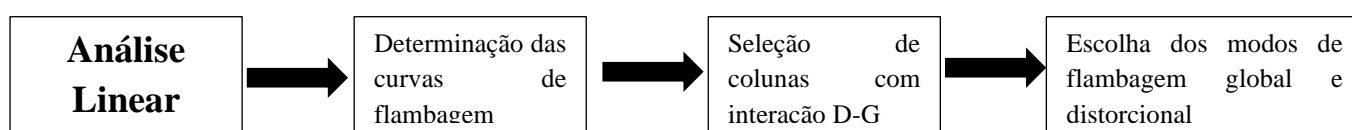
Fonte: O autor (2021)

Para todas as seções serão feitas análises para 5 valores de espessura. As análises serão feitas para as espessuras de 1mm, 1.5mm, 2mm, 2.5mm e 3mm.

Por fim, as análises serão feitas para 3 tipos de condição de apoio, a condição apoiada, apoiada com torção restringida, e engastada.

6.2 PARAMETRIZAÇÃO DAS ANÁLISES

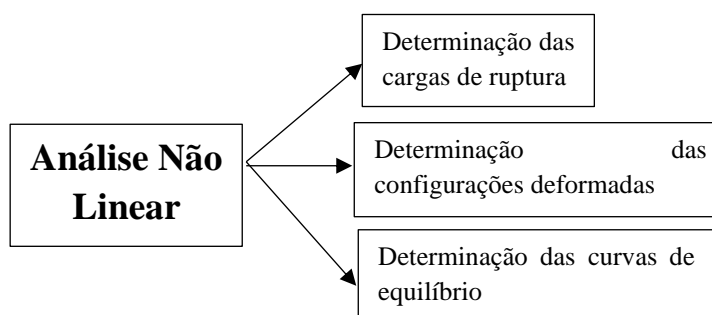
A primeira etapa das análises consiste na realização da análise linear de flambagem elástica. Essa análise é dividida em duas etapas, onde inicialmente serão determinadas as curvas de flambagem para todos os perfis analisados, e a partir dessas curvas serão selecionados perfis com interação D-G do tipo TI. Por fim, nas colunas selecionadas com interação D-G, um modo de flambagem global e um modo de flambagem distorcional serão escolhidos para serem utilizados com imperfeição geométrica na análise não linear. A Figura 6.4 mostra esquematicamente como será realizada a análise linear.

Figura 6.4: Esquema análise linear

Fonte: O autor (2021)

Nas colunas selecionadas com interação D-G na análise linear, será realizado a análise não linear física e geométrica com o intuito de estudar o comportamento das colunas com interação. As configurações deformadas dos modos de flambagem global e distorcional obtidos na análise linear serão combinados e utilizados como imperfeição geométrica, sendo que a inserção das imperfeições seguirá a mesma metodologia mostrada no Capítulo 2, onde para cada coluna selecionada serão realizadas várias análises não lineares variando apenas as imperfeições geométricas. A análise não linear será feita considerando um comportamento elástico-plástico perfeito, com tensão de escoamento no valor de 345 MPa, como mostrado no Capítulo 5. Os principais resultados obtidos nas análises não lineares são as cargas de ruptura, configurações deformadas e curvas de equilíbrio, estes resultados estão mostrados esquematicamente na Figura 6.5.

Figura 6.5: Esquema análise não linear



Fonte: O autor (2021)

Por fim, nas colunas selecionadas com interação D-G, o Método da Resistência Direta será aplicado, e os resultados de carga de ruptura obtido serão comparados com os obtidos na análise não linear.

CAPÍTULO 7

ANÁLISE LINEAR

Neste capítulo as análises lineares serão realizadas para determinar as curvas de flambagem dos perfis, e assim determinar comprimentos onde os perfis possuem interação D-G. No caso de perfis sem furos, as curvas de flambagem podem ser obtidas com auxílio dos softwares GBTUL e CUFSM. No entanto, como já mencionado anteriormente, esses dois softwares não realizam as análises em perfis com furos, devido a isso, neste trabalho as curvas de flambagem dos perfis perfurados serão determinados no software ABAQUS. Os modelos numéricos utilizados no ABAQUS para realização da análise linear e por consequência determinação das curvas de flambagem foram mostrados no Capítulo 5.

Inicialmente, para efeitos de comparação e validação dos resultados obtidos pelo software ABAQUS, as curvas de flambagem serão determinadas nos softwares GBTUL, CUFSM e comparadas com as curvas obtidas no ABAQUS considerando os perfis sem furos. Posteriormente, apenas no ABAQUS, os furos serão adicionados e as curvas de flambagem serão obtidas para os perfis com furos. No caso da condição apoiada com torção restringida, as curvas serão determinadas apenas no software ABAQUS.

Ao se analisar as curvas de flambagens, perfis com interação D-G serão selecionados para realização da análise não linear. Os perfis serão considerados com interação D-G quando a razão dos valores de carga crítica do modo global e distorcional tiverem valor próximo a 1, essa razão é denominada R_{GD} , essa interação é chamado do tipo TI. Esses valores tendem a ocorrer na transição entre a flambagem distorcional dominante para a flambagem global dominante.

Ainda na análise linear, nas colunas selecionadas com interação D-G, também serão determinadas as configurações deformadas dos modos de flambagem distorcional e global, que serão utilizados como imperfeição geométrica na análise não linear.

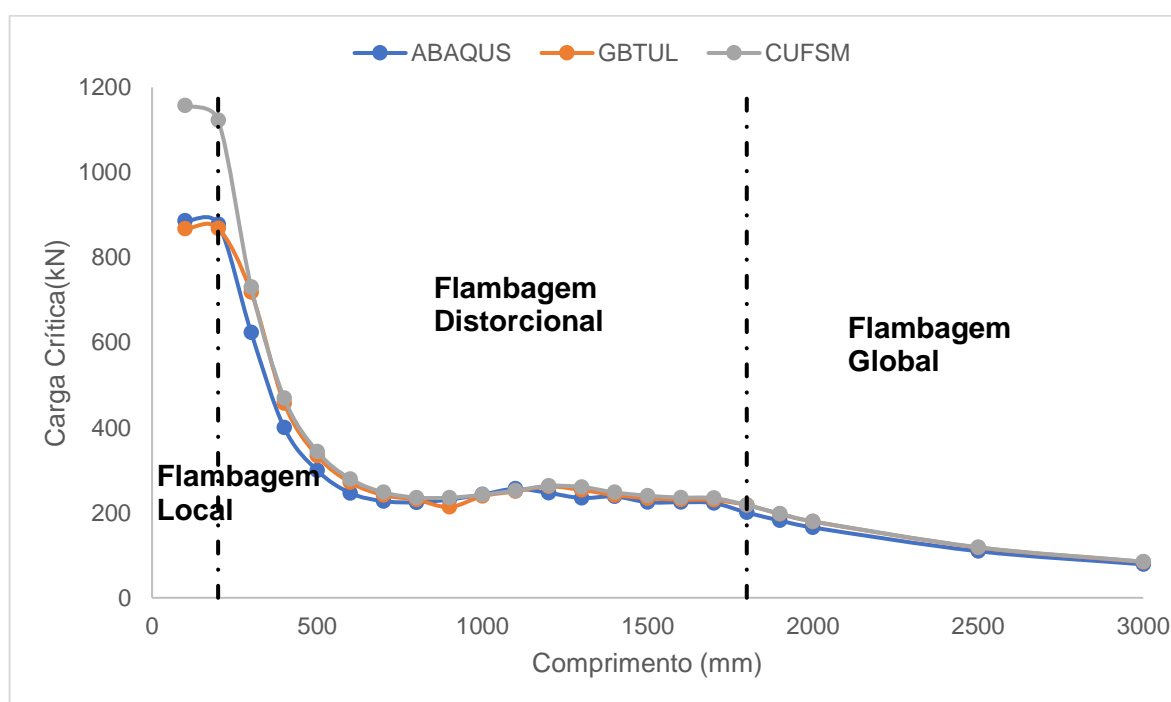
7.1 CURVAS DE FLAMBAGEM PARA SEÇÃO S1

Neste tópico serão determinadas as curvas de flambagem para a seção S1 considerando as condições apoiada, engastada e apoiada com torção restringida, além disso, as curvas serão determinadas para os valores de espessura especificados anteriormente.

7.1.1 Curvas de flambagem com condição apoiada para seção S1

Inicialmente, serão determinadas as curvas de flambagem considerando o perfil sem furos, sendo que as curvas serão determinadas por meio da utilização dos softwares GBTUL, CUFSM e ABAQUS, a curva de flambagem da seção S1 sem furos, com condição apoiada e espessura de 2mm é mostrada na Figura 7.1

Figura 7.1: Curva de flambagem seção S1 sem furos, condição apoiada, $t=2$



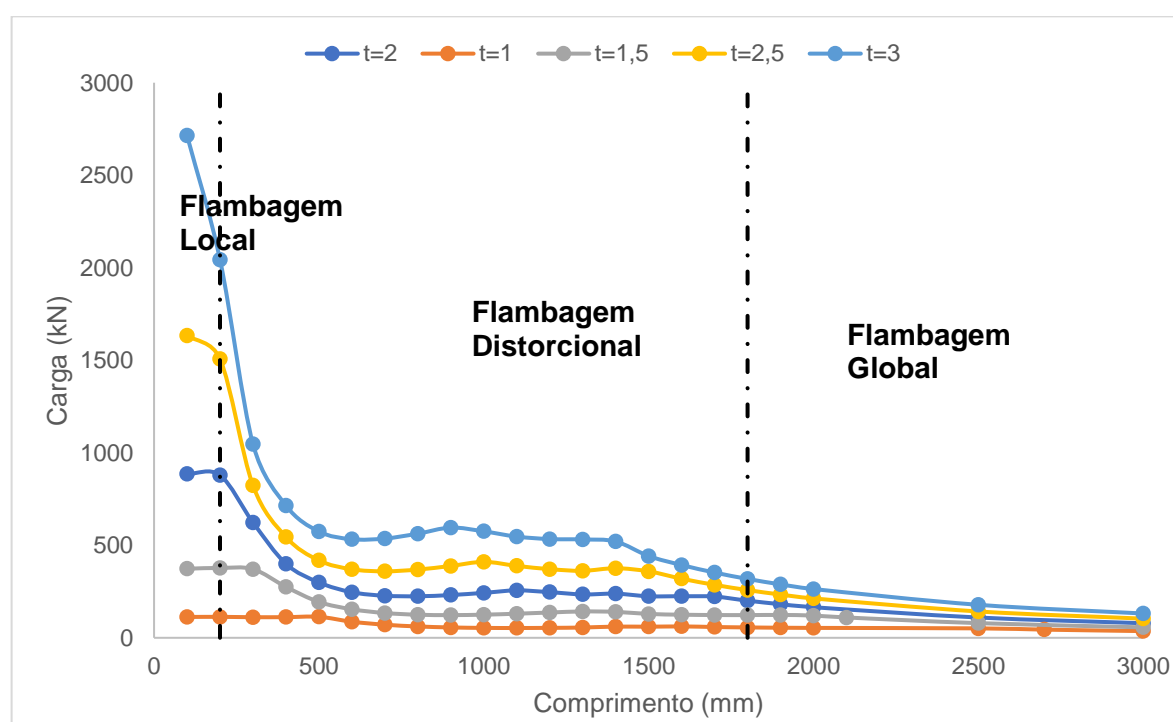
Fonte: O autor (2021)

As curvas obtidas pelos três softwares apresentam uma boa congruência nos resultados, com exceção dos comprimentos iniciais, onde ocorre uma predominância da flambagem local, e os valores de carga obtidos pelo software CUFSM são maiores. As curvas tem um comportamento característico das curvas de flambagem com condição apoiada, sendo que na seção S1, devido a presença de um enrijecedor na alma, os efeitos da flambagem local são

minimizados, logo, a flambagem local só ocorre para valores de comprimento inferiores a 200mm. O primeiro mínimo corresponde ao mínimo valor de flambagem distorcional, e a partir de 1800mm, a flambagem global começa a ser dominante, como mostra curva descendente, que corresponde a flambagem global.

A Figura 7.2 mostra as curvas de flambagens obtidas para as 5 espessuras utilizadas neste trabalho obtidas pelo software ABAQUS considerando os perfis sem furos.

Figura 7.2: Curva de flambagem seção S1 sem furos, condição apoiada para todas as espessuras



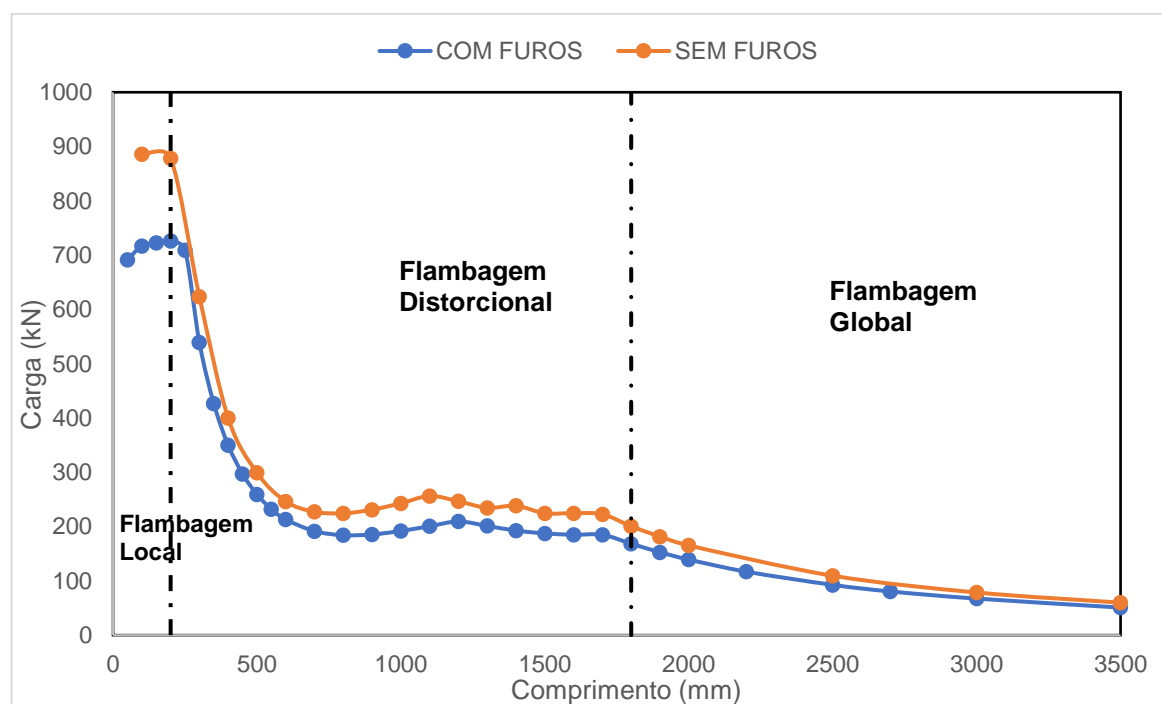
Fonte: O autor (2021)

Ao se observar a Figura 7.2, pode se observar que ao se aumentar a espessura do perfil, o valor da carga crítica também aumenta. No entanto, a partir do momento em que a flambagem global passa a ser dominante, os valores de flambagem global tendem a se aproximar para todas os valores de espessura, ou seja, no comprimento de 3000mm, onde a flambagem global é dominante para todas as espessuras, os valores de carga de flambagem tendem a se aproximar para todos os valores de espessura analisados. Por fim, ao aumentar o valor da espessura do perfil, a flambagem global começa a ser dominante com comprimentos menores, por exemplo, para a espessura de 2mm, a flambagem global começa a ser dominante com comprimento de 1800mm, e para a espessura de 3mm, a flambagem começa a ser dominante para um

comprimento de 1400mm. As conclusões observadas nesse parágrafo são válidas para todos os perfis com e sem furos analisados neste trabalho.

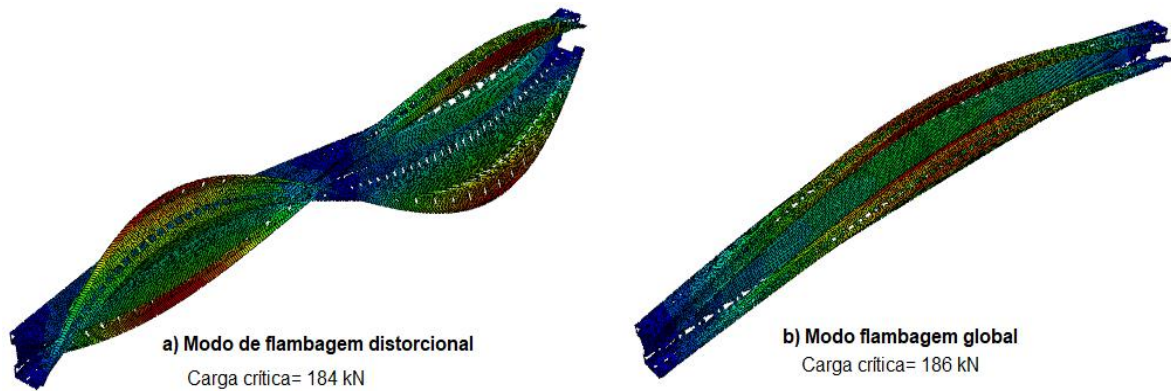
A Figura 7.3 mostra a curva de flambagem da seção S1 com furos com condição apoiada e espessura de 2mm.

Figura 7.3: Curva de flambagem seção S1 com furos, condição apoiada, $t=2$



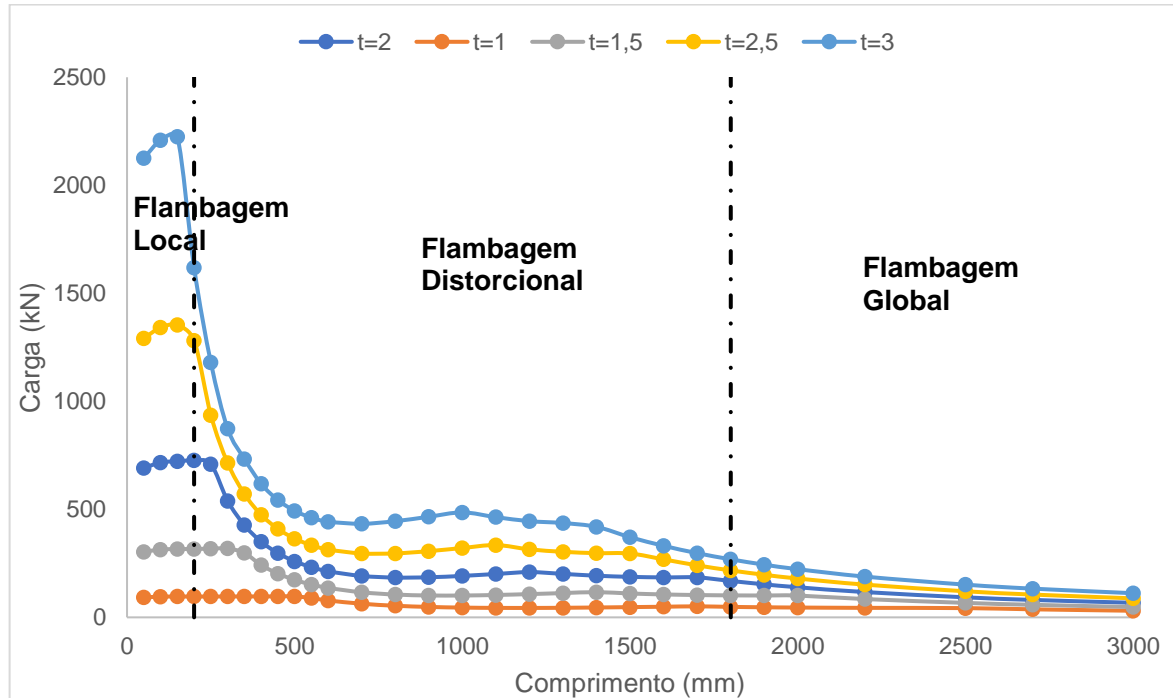
Fonte: O autor (2021)

Pela Figura 7.3, pode se observar inicialmente que as curvas de flambagem com e sem furos tem comportamento semelhante, e a presença de furos diminui a carga de flambagem, principalmente nos casos de flambagem distorcional e local. Novamente, no caso da flambagem global dominante, os valores de carga crítica de flambagem para o perfil com e sem furos tende a se aproximar. Para o perfil com furos com espessura de 2mm, a flambagem global passa a ser dominante em torno de 1800mm. No comprimento de 1700mm, o valor da carga crítica de flambagem global é de 186 kN, e o valor da carga crítica de flambagem distorcional é de 184 kN. Logo, temos que o valor do RDG tem valor próximo a 1, e este perfil no comprimento de 1700mm tem uma grande possibilidade de sofrer interação D-G. A Figura 7.4 mostra as configurações deformadas dos modos global e distorcional desse perfil. Na análise não linear, essas duas configurações deformadas serão utilizadas em conjunto como imperfeição geométrica.

Figura 7.4: Modos de flambagem global e distorcional – Seção S1, apoiada

Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.5 mostra as curvas de flambagens obtidas para as 5 espessuras utilizadas neste trabalho obtidas pelo software ABAQUS considerando os perfis com furos.

Figura 7.5: Curva de flambagem seção S1 com furos, condição apoiada para todas as espessuras

Fonte: O autor (2021)

As tabelas 7.1 e 7.2 mostram os perfis selecionados com possível interação D-G da seção S1 com e sem furos. Os comprimentos selecionados serão utilizados para realização da

análise não linear e estudo do comportamento dessa interação. A análise não linear será mostrada no próximo capítulo.

Tabela 7.1: Perfis selecionados com interação D-G seção S1 com furos e condição apoiada

L (mm)	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1400	3	418898,3	435176,7	0,96
1300	3	474346,7	436499,4	1,09
1500	2,5	300337,1	295534,9	1,02
1600	2,5	268088,8	297189,9	0,90
1700	2	186544,0	184814,5	1,01
1800	2	168529,2	186174,4	0,91
2000	1,5	92210,5	101516,4	0,91
2100	1,5	92210,5	102248,9	0,90
2400	1	46142,6	43792,4	1,05
2500	1	42808,9	44070,5	0,97

Fonte: O autor (2021)

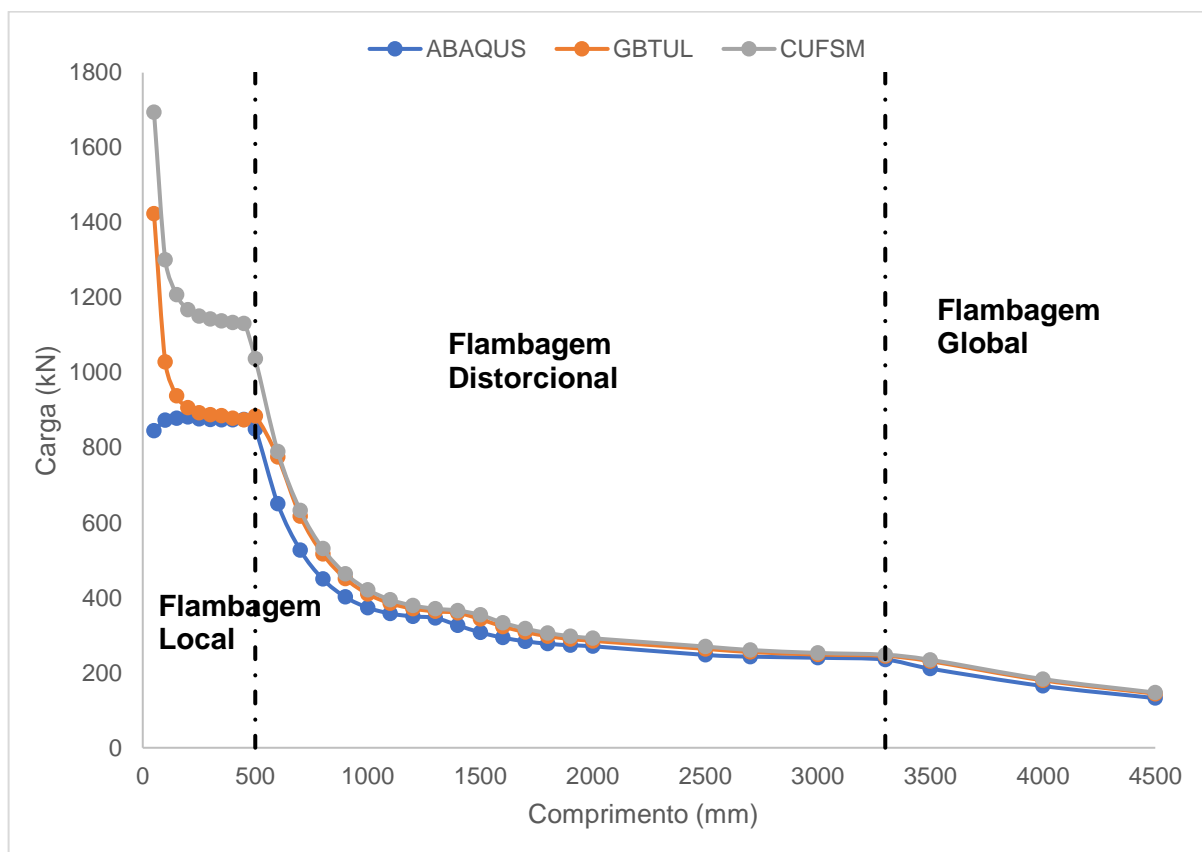
Tabela 7.2: Perfis selecionados com interação D-G seção S1 sem furos e condição apoiada

L (mm)	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1400	3	499951,3	537290,0	0,93
1300	3	570016,4	531490,8	1,07
1500	2,5	358939,4	362703,8	0,99
1600	2,5	319508,3	359821,2	0,89
1700	2	222675,4	227114,6	0,98
1800	2	200631,7	228915,5	0,88
2000	1,5	120182,3	125140,4	0,96
2100	1,5	109825,2	127253,3	0,86
2400	1	55051,6	53766,3	1,02
2500	1	51026,1	54532,7	0,94

Fonte: O autor (2021)

7.1.2 Curvas de flambagem com condição engastada para seção S1

A curva de flambagem da seção S1 sem furos, determinadas pelos três softwares, com condição engastada e espessura de 2mm é mostrada na Figura 7.6

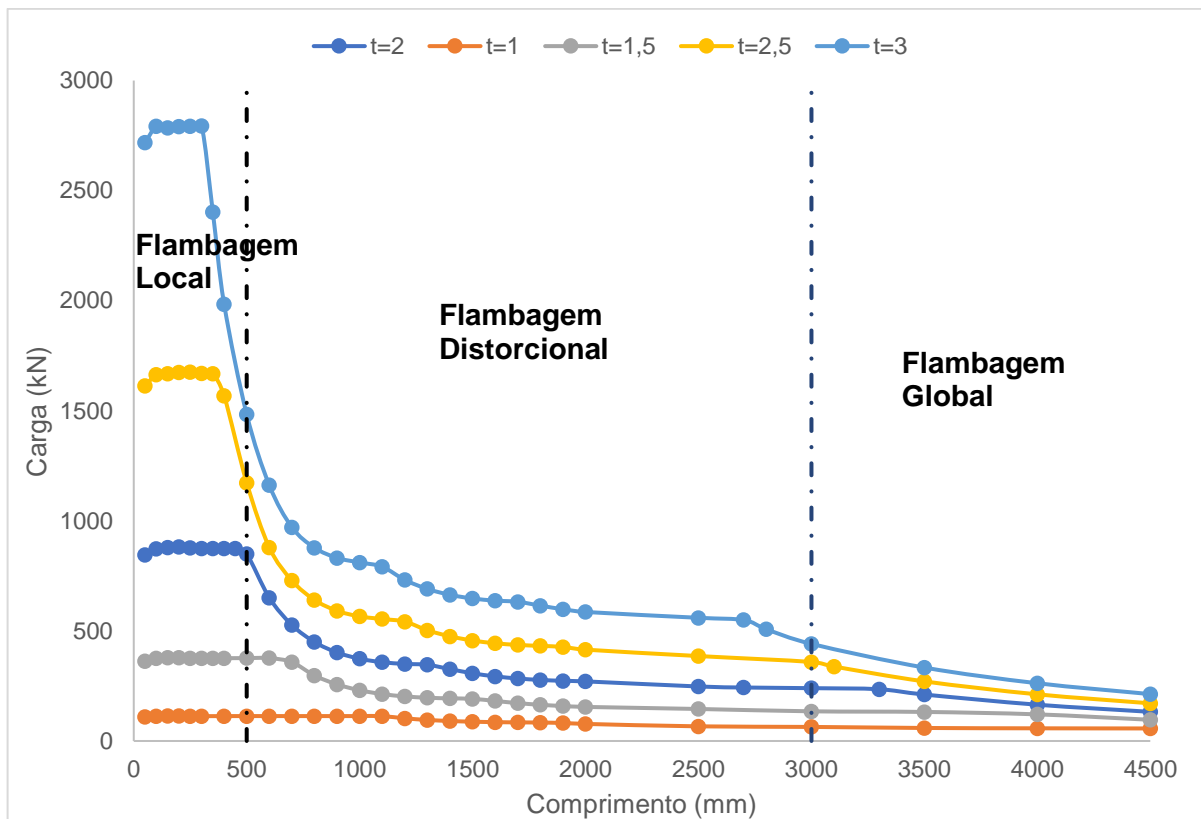
Figura 7.6: Curva de flambagem seção S1 sem furos, condição engastada, $t=2$ 

Fonte: O autor (2021)

As curvas obtidas pelos três softwares apresentam uma boa congruência nos resultados, com exceção novamente dos comprimentos iniciais, onde os valores de carga obtidos pelo software CUFSM são maiores. Diferentemente do caso da condição apoiada, as curvas de flambagem com condição engastada não possuem comportamento característico, sendo apenas uma curva descendente, havendo uma maior dificuldade em determinar as atuações das flambagens local, distorcional e global. Na seção S1 com espessura de 2mm, a flambagem global começa a ser predominante a partir de 3300mm.

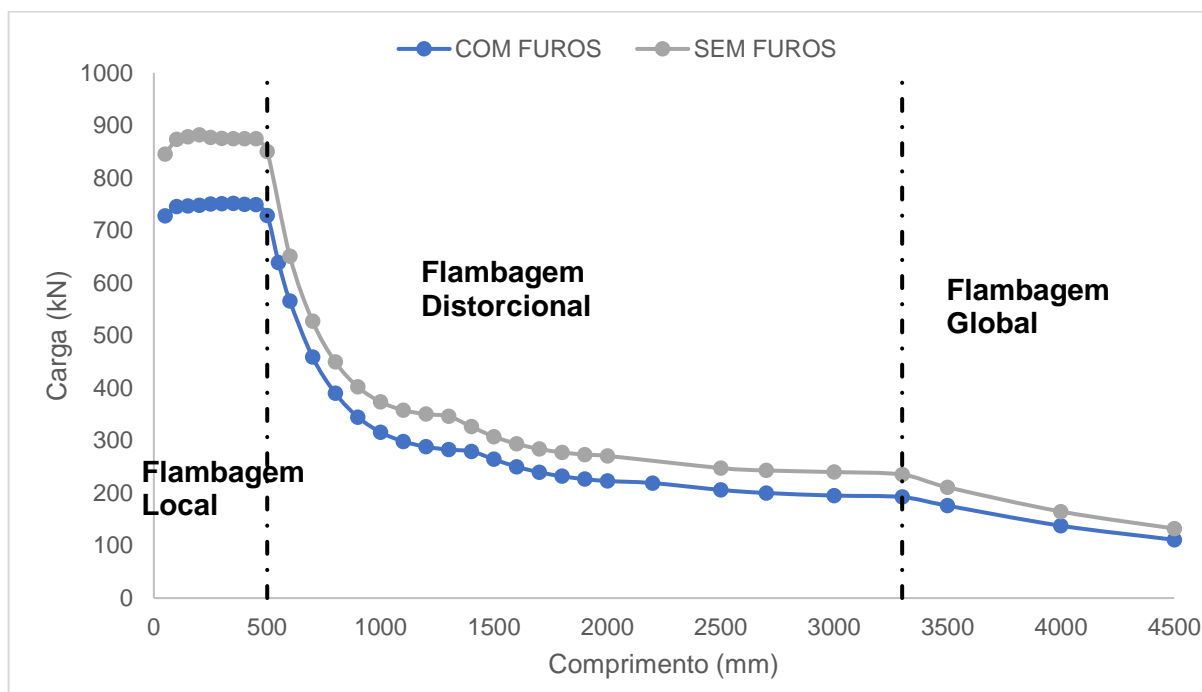
A Figura 7.7 mostra as curvas de flambagens obtidas para as 5 espessuras utilizadas neste trabalho obtidas pelo software ABAQUS considerando os perfis sem furos.

Figura 7.7: Curva de flambagem seção S1 sem furos, condição engastada para todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

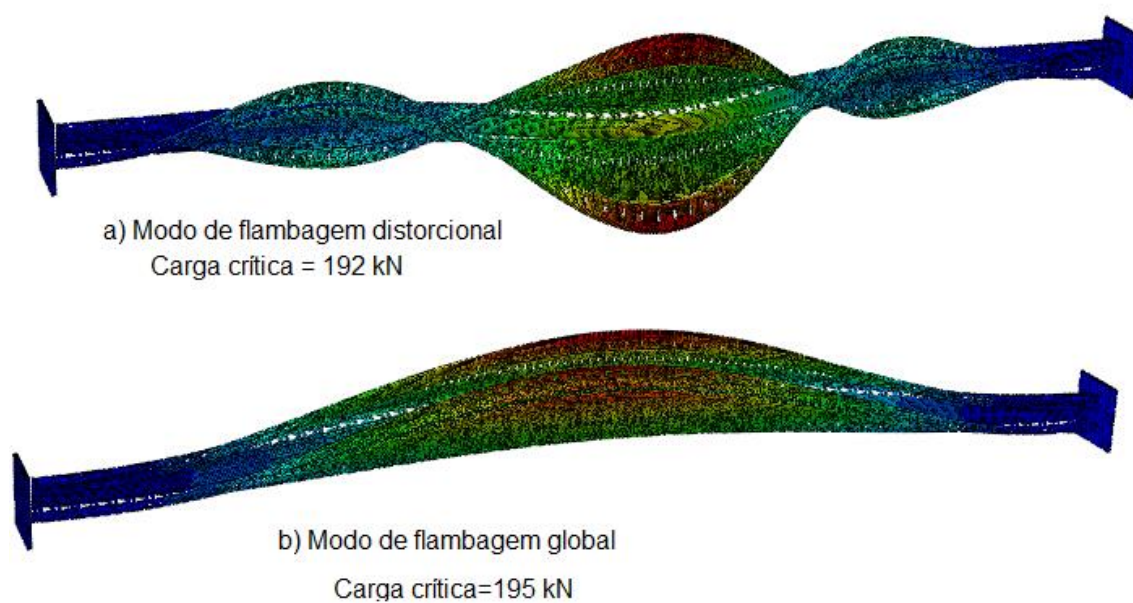
A Figura 7.8 mostra a curva de flambagem da seção S1 com furos com condição engastada e espessura de 2mm.

Figura 7.8: Curva de flambagem seção S1 com furos, condição engastada, $t=2$ 

Fonte: O autor (2021)

Pela Figura 7.8, pode se observar inicialmente que as curvas de flambagem com e sem furos tem comportamento semelhante, e a presença de furos diminui a carga de flambagem. No comprimento de 3300mm, onde a flambagem global começa a ser dominante, temos que o valor de carga crítica global é igual a 195 kN, e o valor de carga crítica distorcional é de 192 kN, sendo que a razão entre esses valores de carga é próxima a 1, temos que nesse comprimento a possibilidade de o perfil sofrer interação D-G é alta. A Figura 7.9 mostra as configurações deformadas desses dois modos.

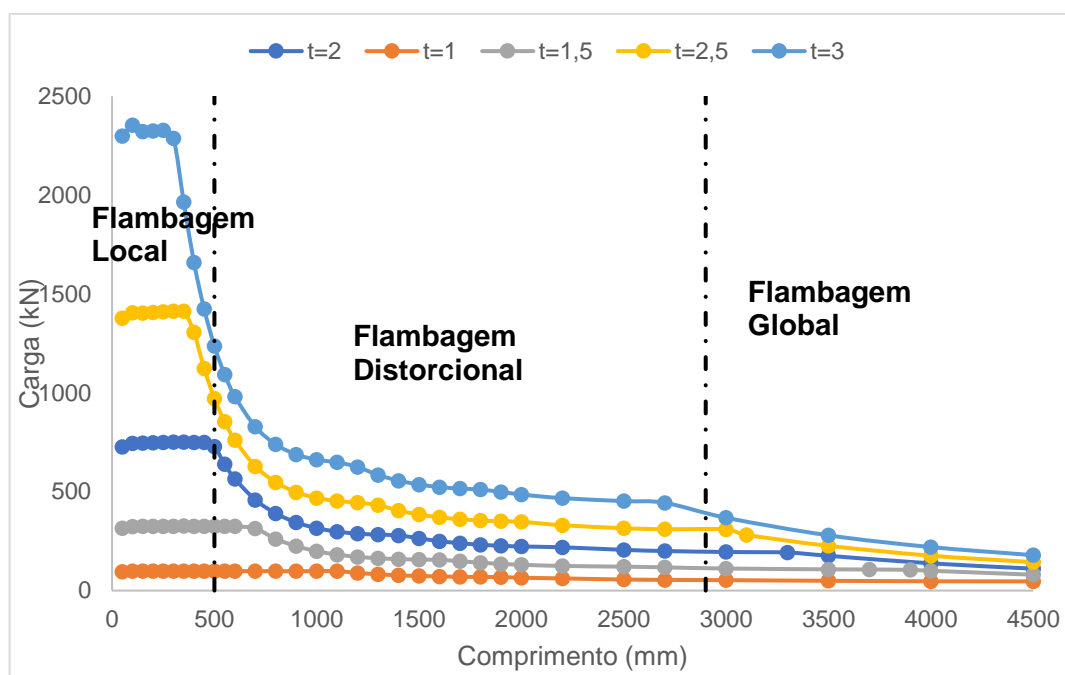
Figura 7.9: Modos de flambagem global e distorcional – seção S1 engastada



Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.10 mostra as curvas de flambagens obtidas para as 5 espessuras utilizadas neste trabalho obtidas pelo software ABAQUS considerando os perfis com furos.

Figura 7.10: Curva de flambagem seção S1 com furos, condição engastada para todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

As tabelas 7.3 e 7.4 mostram os perfis selecionados com possível interação D-G da seção S1 com e sem furos.

Tabela 7.3: Perfis selecionados com interação D-G seção S1 com furos e condição engastada

L (mm)	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
2700	3	416360,0	437760,0	0,95
2800	3	444000,0	444080,0	1,00
3000	2,5	299008,0	303532,0	0,99
3100	2,5	281776,0	299976,0	0,94
3300	2	195628,0	192332,0	1,02
3500	2	189336,0	175956,0	1,08
3600	1,5	121056,0	107140,0	1,13
3700	1,5	115252,0	106772,0	1,08
4000	1	63312,0	47276,0	1,34
4100	1	60724,0	47064,0	1,29

Fonte: O autor (2021)

Tabela 7.4: Perfis selecionados com interação D-G seção S1 sem furos e condição engastada

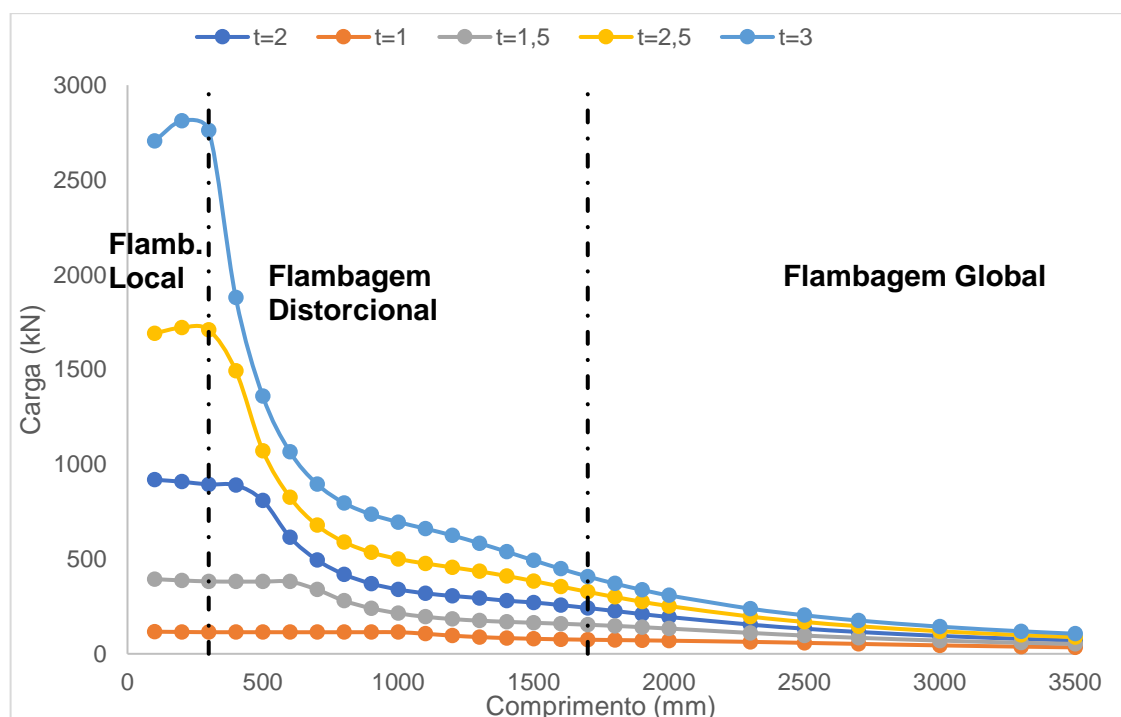
L (mm)	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
2700	3	533600,0	549920,0	0,97
2800	3	540040,0	499760,0	1,08
3000	2,5	358972,0	375316,0	0,96
3100	2,5	3381680,0	3696520,0	0,91
3300	2	235152,0	237504,0	0,99
3500	2	211048,0	233148,0	0,91
3600	1,5	145844,0	131764,0	1,11
3700	1,5	138720,0	131452,0	1,06

Fonte: O autor (2021)

7.1.3 Curvas de flambagem com condição apoiada com torção restringida para seção S1

Os softwares GBTUL e CUFSM não determinam as curvas de flambagem para a condição apoiada com torção restringida, devido a isso, neste caso, as curvas de flambagem serão geradas apenas pelo software ABAQUS. A Figura 7.11 mostra as curvas de flambagens com todas as espessuras do perfil S1 sem furos.

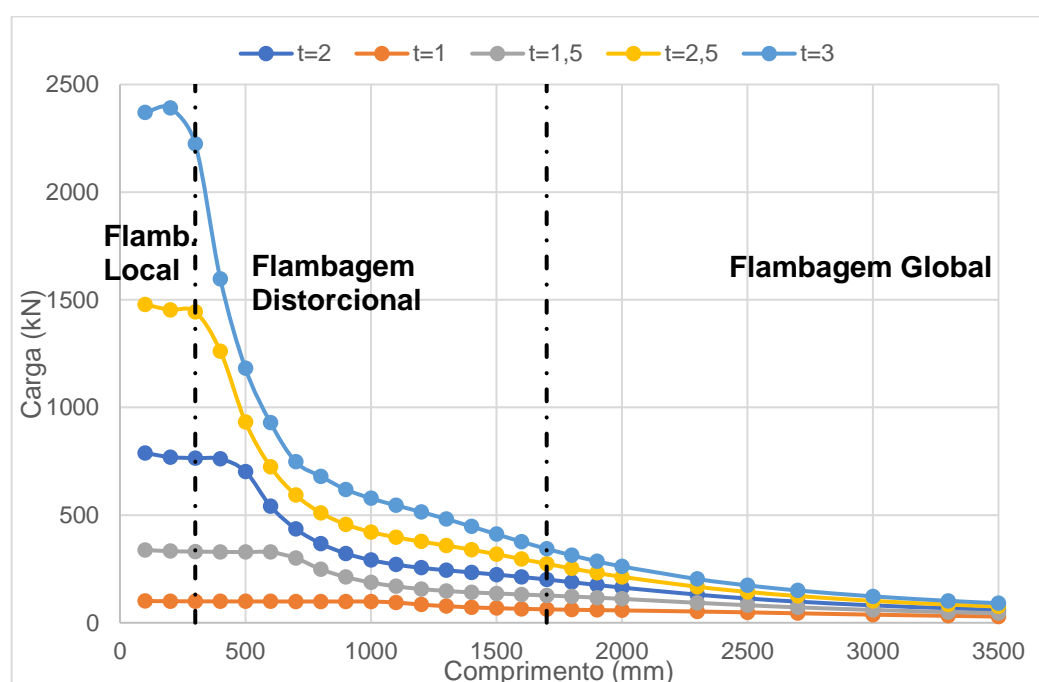
Figura 7.11: Curva de flambagem seção S1 sem furos, condição apoiada com torção restringida para todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.12 mostra as curvas de flambagens dos perfis com furos, considerando as 5 espessuras utilizadas neste trabalho. Diferentemente da condição apenas apoiada que foi modelada sem chapas de ligação, a condição apoiada com torção restringida foi modelada com placas como mostrado no Capítulo 5, devido a isso, as curvas não possuem uma curva característica como na condição apoiada, se assemelhando ao comportamento das curvas com condição engastada, ou seja, uma curva descendente.

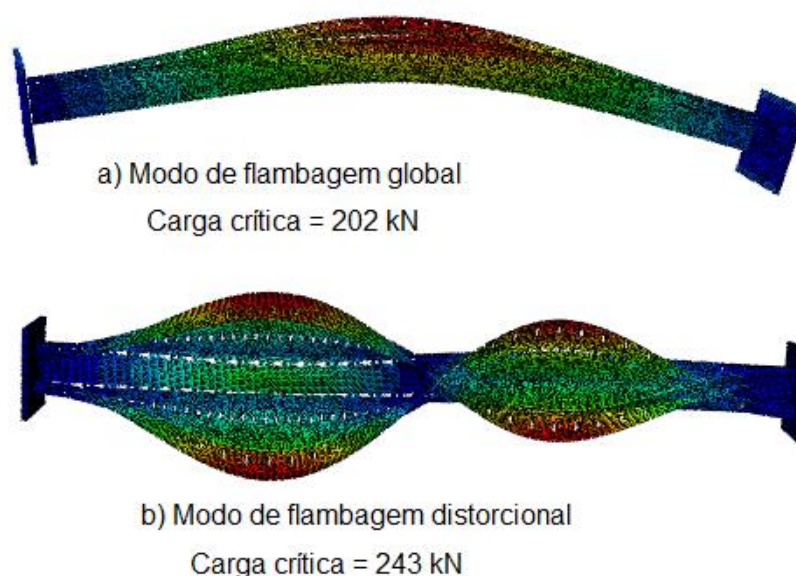
Figura 7.12: Curva de flambagem seção S1 com furos, condição apoiada com torção restringida para todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

Pela Figura 7.12, para a espessura de 2mm, a flambagem global passar a ser dominante em torno de 1700mm, neste comprimento o valor da carga crítica global é de 202 kN, e o valor da carga crítica distorcional é de 243 kN, com valor de RGD de 0.8. Nesta condição de apoio, houve uma maior dificuldade em determinar comprimentos com RGD próximo a 1, sendo que nesta condição foram selecionados comprimento com RGD com valores mínimos de 0.8. A Figura 7.13 mostra os modos de flambagem distorcional e global do perfil com 1700mm e 2mm de espessura.

Figura 7.13: Modos de flambagem global e distorcional – seção S1 apoiada com torção restringida



Fonte: O autor (2021)

Nas condições de apoio apoiada e engastada, o modo de flambagem global corresponde a flexo-torção. Nesta condição de apoio, a torção é restringida, e como pode ser observado pela Figura 7.13, a torção é restringida, e o modo global corresponde a flexão.

As tabelas 7.5 e 7.6 mostram os perfis selecionados com possível interação D-G da seção S1 com e sem furos.

Tabela 7.5: Perfis selecionados com interação D-G seção S1 com furos e condição apoiada com torção restringida

L (mm)	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1400	3	546172,0	450556,0	1,21
1300	3	487609,0	598356,0	0,81
1400	2,5	343655,0	414873,0	0,83
1500	2,5	320540,0	391289,0	0,82
1700	2	202344,0	243935,0	0,83
1800	2	189326,0	235671,0	0,80
2000	1,5	110827,0	128570,0	0,86
2100	1,5	104833,0	125081,0	0,84
2400	1	50297,0	56792,0	0,89
2500	1	48218,0	55297,0	0,87

Fonte: O autor (2021)

Tabela 7.6: Perfis selecionados com interação D-G seção S1 sem furos e condição apoiada com torção restringida

L (mm)	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1400	3	569828,0	642226,0	0,84
1300	3	585520,0	666114,0	0,88
1400	2,5	412261,0	459784,0	0,90
1500	2,5	384646,0	442641,0	0,87
1700	2	242340,0	276051,0	0,88
1800	2	226111,0	269688,0	0,84
2000	1,5	133406,0	150802,0	0,88
2100	1,5	125656,0	147959,0	0,85
2400	1	60587,0	66194,0	0,92
2500	1	57899,0	64955,0	0,89

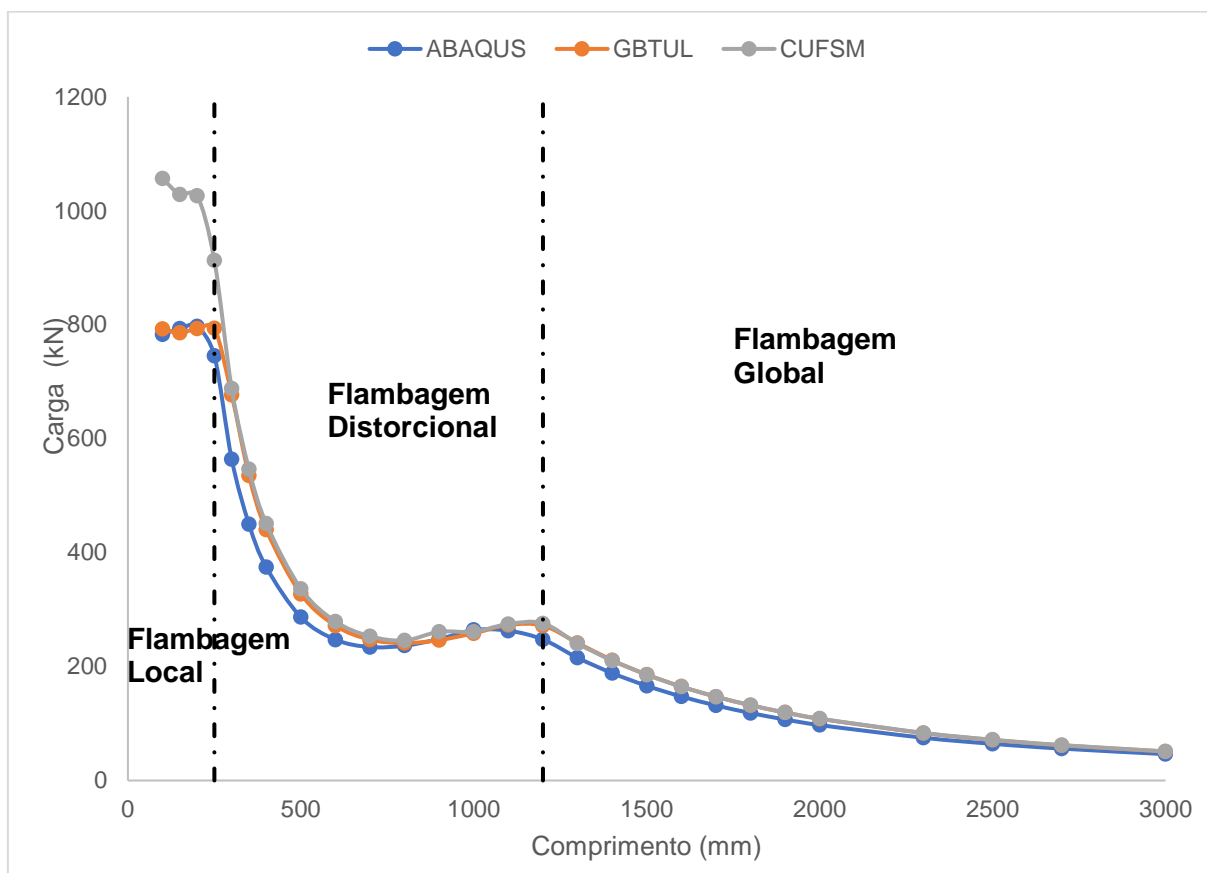
Fonte: O autor (2021)

7.2 CURVAS DE FLAMBAGEM PARA SEÇÃO S2

Neste tópico serão determinadas as curvas de flambagem para a seção S2 considerando as condições apoiada, engastada e apoiada com torção restringida.

7.2.1 Curvas de flambagem com condição apoiada para seção S2

As curvas de flambagem da seção S2 sem furos, com condição apoiada e espessura de 2mm e determinados pelos softwares GBTUL, CUFSM e ABAQUS é mostrada na Figura 7.14

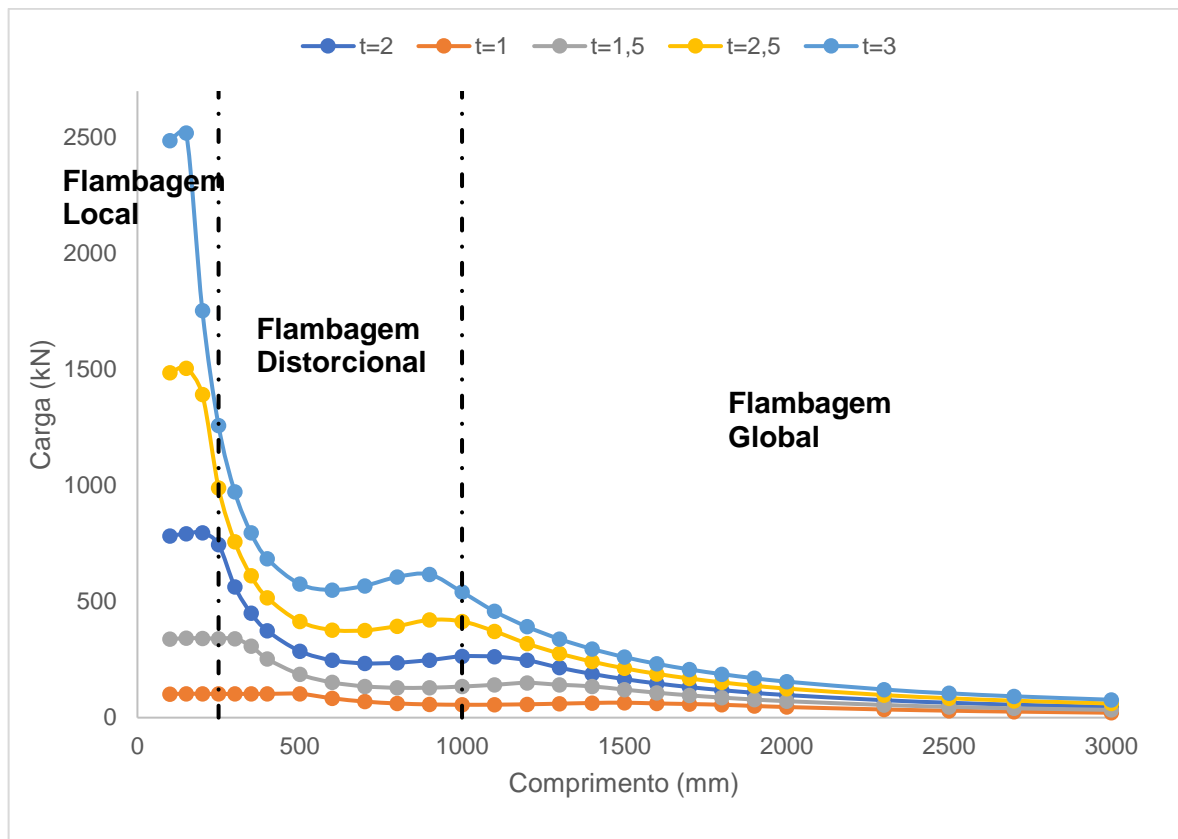
Figura 7.14: Curva de flambagem seção S2 sem furos, condição apoiada, $t=2$ 

Fonte: O autor (2021)

Como as seções S1 e S2 tem seções transversais parecidas, mudando apenas o valor do comprimento da alma, as observações feitas para a seção S1 também são válidas para a seção S2.

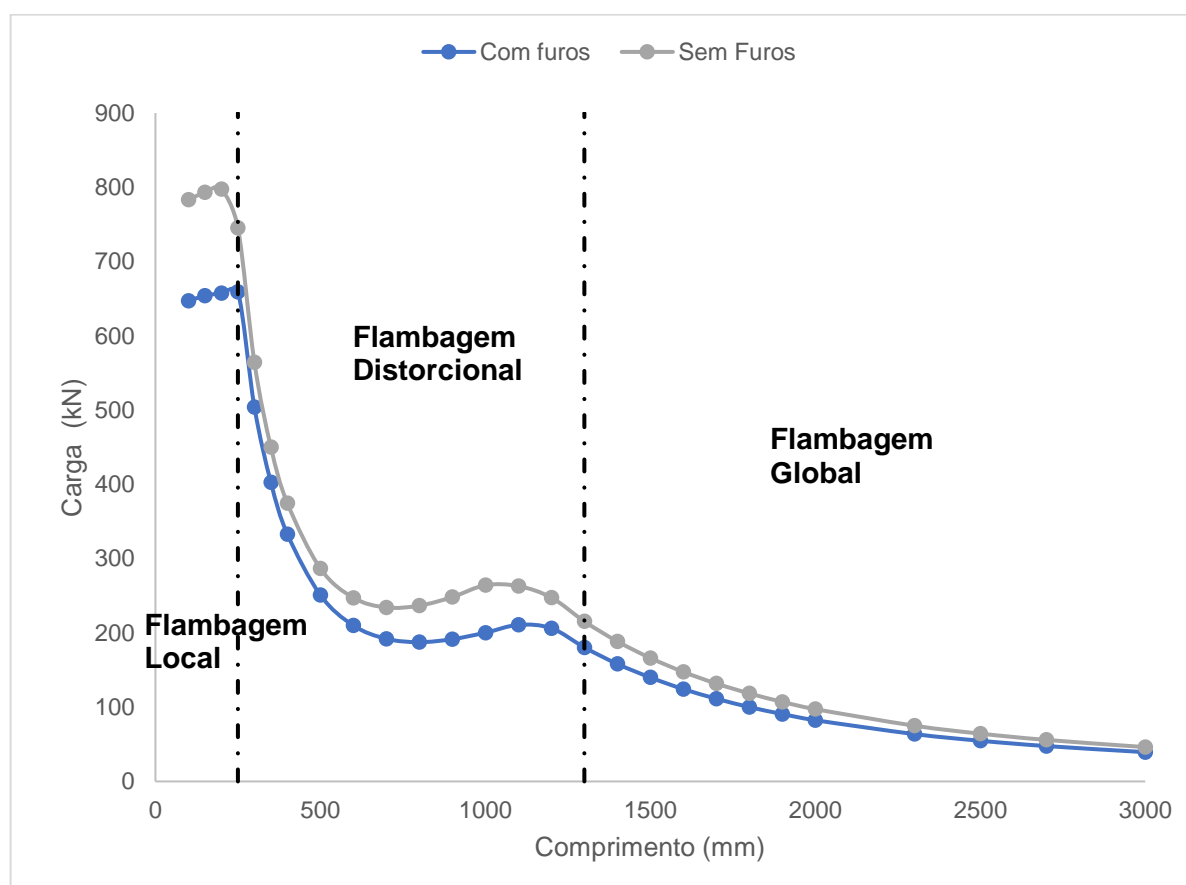
A Figura 7.15 mostra as curvas de flambagens obtidas para as 5 espessuras utilizadas neste trabalho obtidas pelo software ABAQUS considerando os perfis sem furos.

Figura 7.15: Curva de flambagem seção S2 sem furos, condição apoiada para todas as espessuras



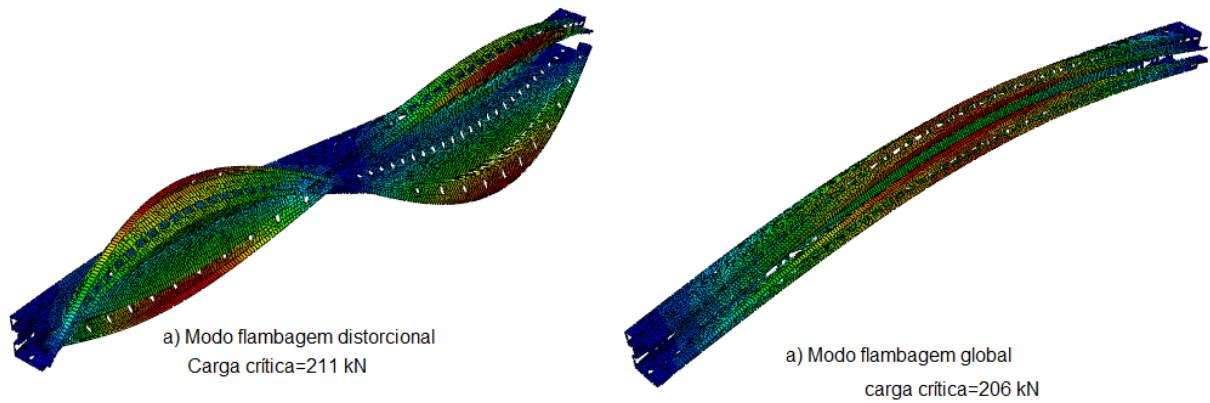
Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.16 mostra a curva de flambagem da seção S2 com furos com condição apoiada e espessura de 2mm.

Figura 7.16: Curva de flambagem seção S2 com furos, condição apoiada, $t=2$ 

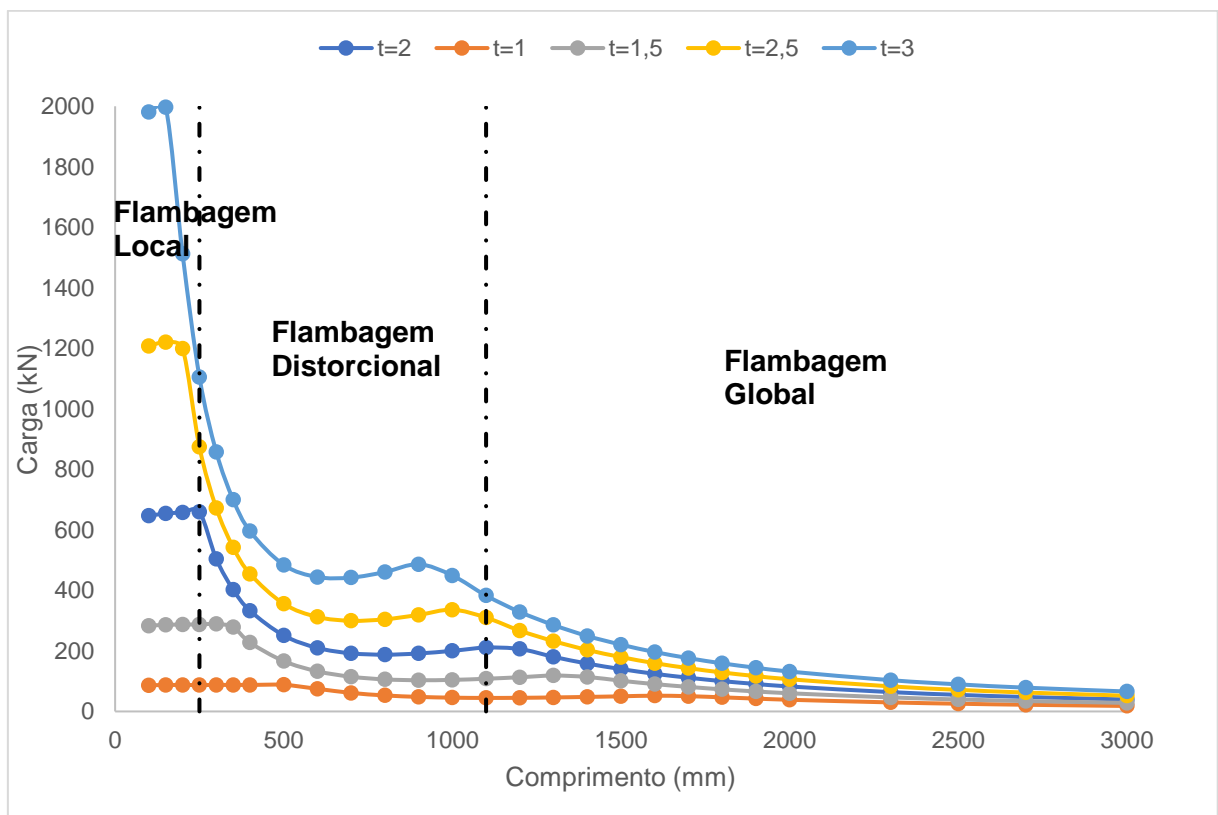
Fonte: O autor (2021)

Para o perfil com furos com espessura de 2mm, a flambagem global passa a ser dominante em torno de 1300mm. No comprimento de 1200mm, o valor da carga crítica de flambagem global é de 206 kN, e o valor da carga crítica de flambagem distorcional é de 211 kN. Logo, temos que o valor da razão entre as cargas é de 0.98, este perfil no comprimento de 1200mm tem uma grande possibilidade de sofrer interação D-G. A Figura 7.17 mostra as configurações deformadas dos modos global e distorcional desse perfil com comprimento de 1200mm.

Figura 7.17: Modos de flambagem global e distorcional – Seção S2, apoiada

Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.18 mostra as curvas de flambagens obtidas para as 5 espessuras utilizadas neste trabalho obtidas pelo software ABAQUS considerando os perfis com furos.

Figura 7.18: Curva de flambagem seção S2 com furos, condição apoiada para todas as espessuras

Fonte: O autor (2021)

As tabelas 7.7 e 7.8 mostram os perfis selecionados com possível interação D-G da seção S2 com e sem furos.

Tabela 7.7: Perfis selecionados com interação D-G seção S2 com furos e condição apoiada

L (mm)	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1000	3	436822,1	414962,6	1,05
1100	3	382940,8	460320,9	0,83
1100	2,5	310024,6	330686,7	0,94
1200	2,5	267103,7	313800,8	0,85
1200	2	206326,9	211150,1	0,98
1300	2	180390,2	199962,5	0,90
1400	1,5	115321,3	113995,0	1,01
1500	1,5	101419,6	109948,5	0,92
1800	1	46525,2	48269,0	0,96
1900	1	42365,1	46767,7	0,91

Fonte: O autor (2021)

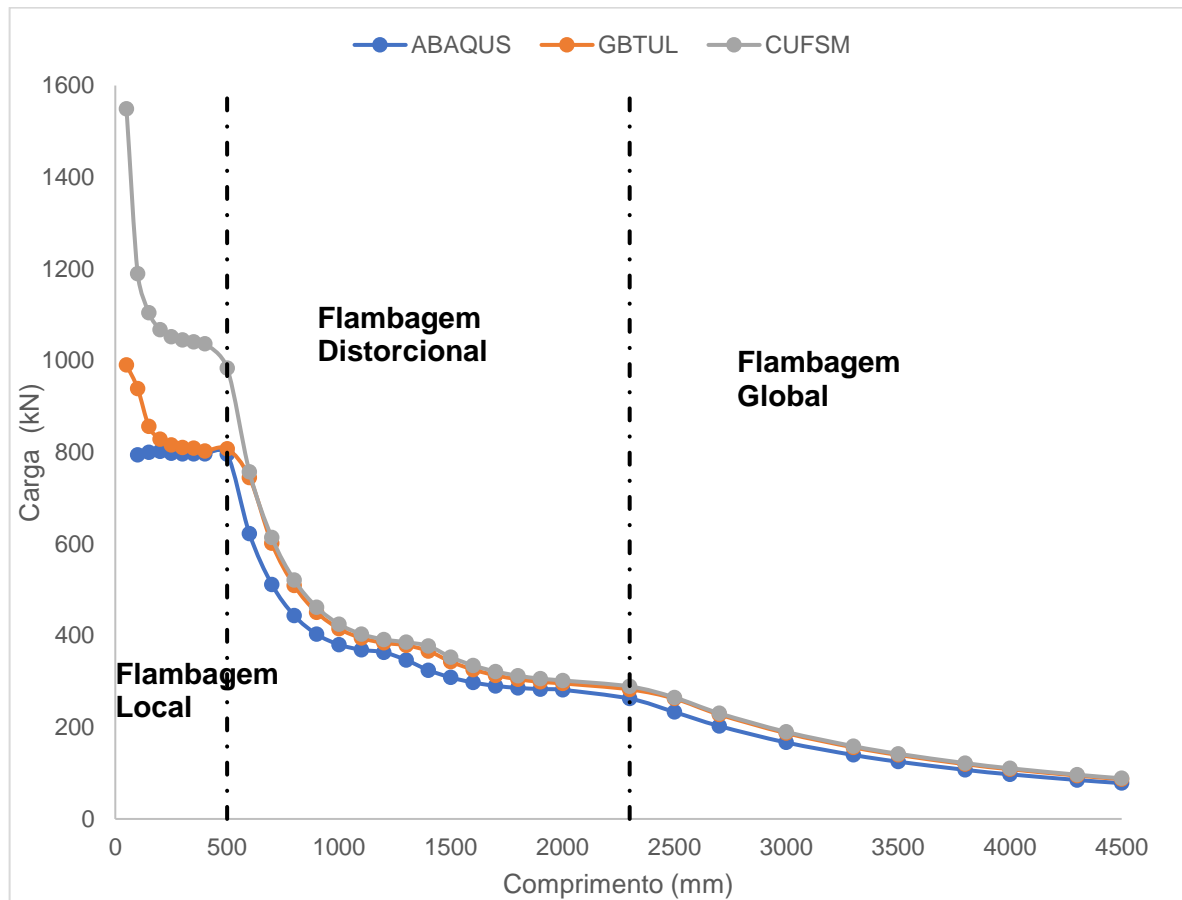
Tabela 7.8: Perfis selecionados com interação D-G seção S2 sem furos e condição apoiada

L (mm)	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1000	3	436822,1	414962,6	1,05
1100	3	458251,8	552874,1	0,83
1100	2,5	372450,1	390769,7	0,95
1200	2,5	319449,9	377936,4	0,85
1200	2	247844,6	247522,2	1,00
1300	2	215469,8	238514,4	0,90
1400	1,5	135031,7	136579,0	0,99
1500	1,5	120921,2	130853,2	0,92
1800	1	55539,2	57080,4	0,97
1900	1	50365,9	56061,1	0,90

Fonte: O autor (2021)

7.2.2 Curvas de flambagem com condição engastada para seção S2

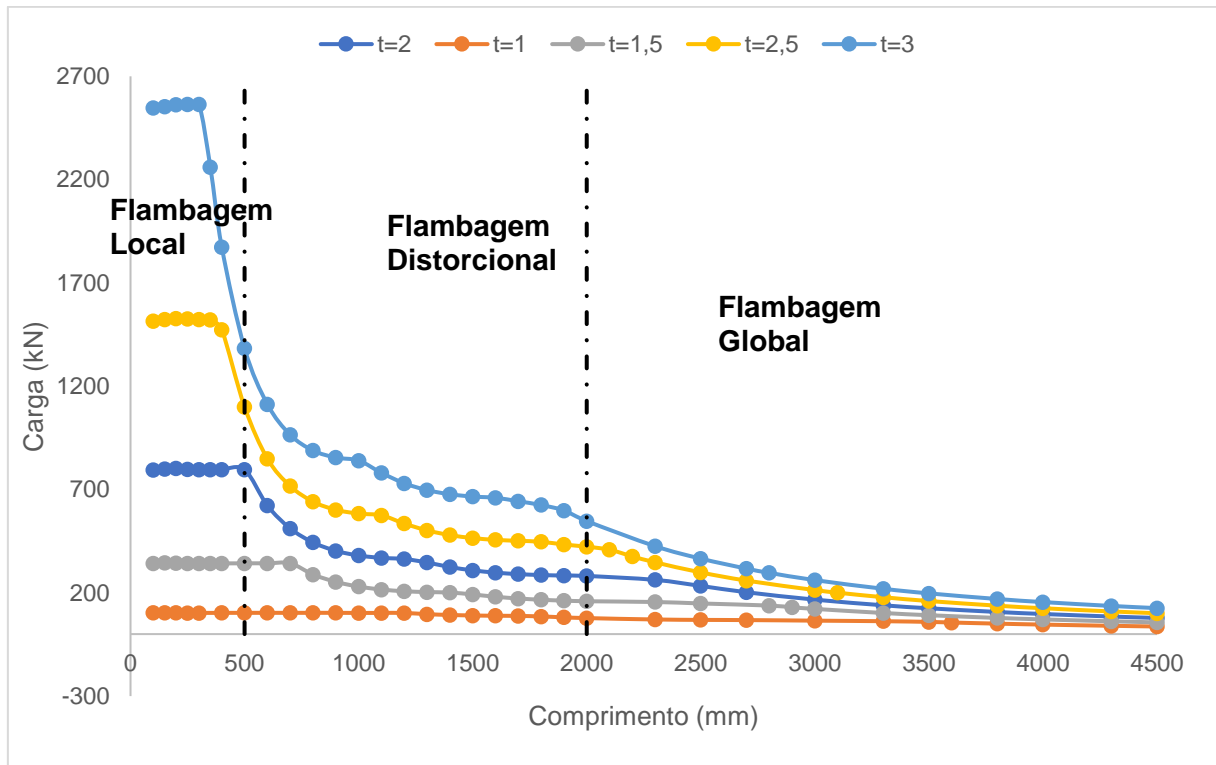
As curvas de flambagem da seção S2 sem furos, com condição engastada obtidas via GBTUL, CUFSM e ABAQUS, e espessura de 2mm é mostrada na Figura 7.19.

Figura 7.19: Curva de flambagem seção S2 sem furos, condição engastada, $t=2$ 

Fonte: O autor (2021)

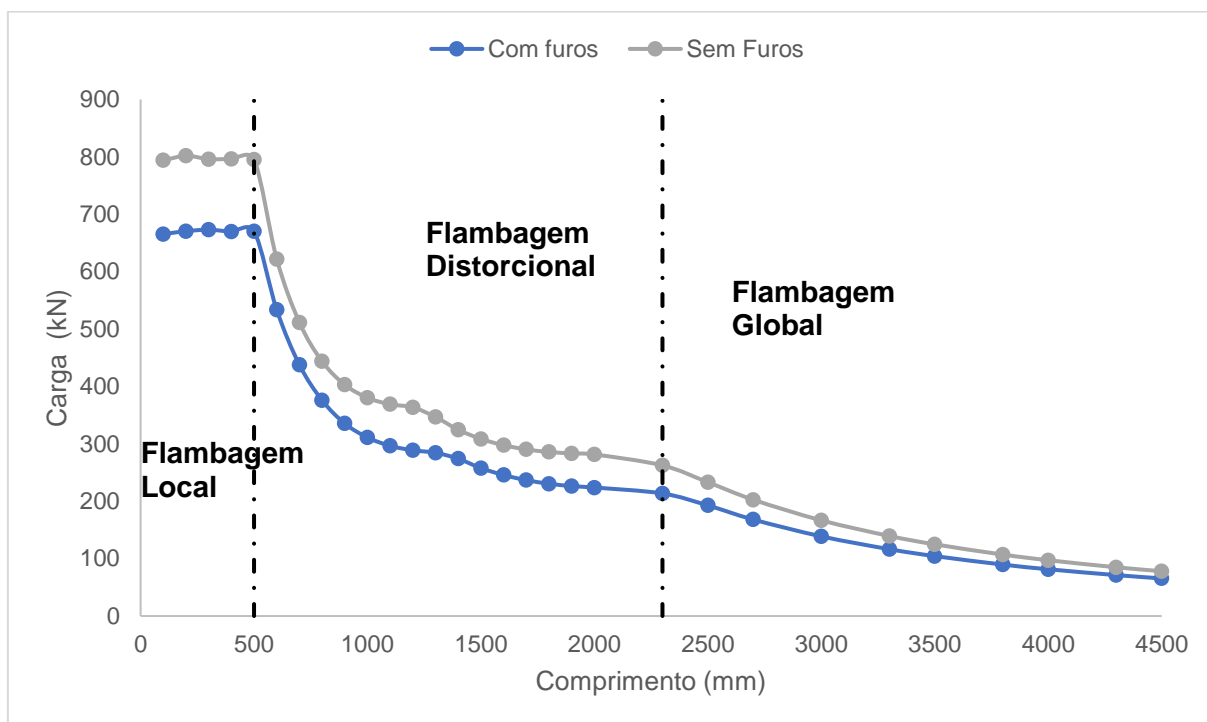
A Figura 7.20 mostra as curvas de flambagens obtidas para as 5 espessuras utilizadas neste trabalho obtidas pelo software ABAQUS considerando os perfis sem furos.

Figura 7.20: Curva de flambagem seção S2 sem furos, condição engastada para todas as espessuras



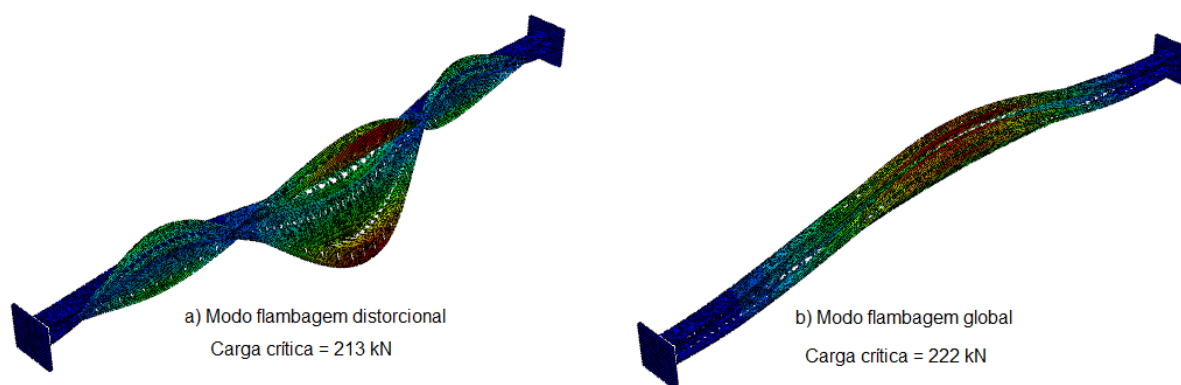
Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.21 mostra a curva de flambagem da seção S2 com furos com condição engastada e espessura de 2mm.

Figura 7.21: Curva de flambagem seção S2 com furos, condição engastada, $t=2$ 

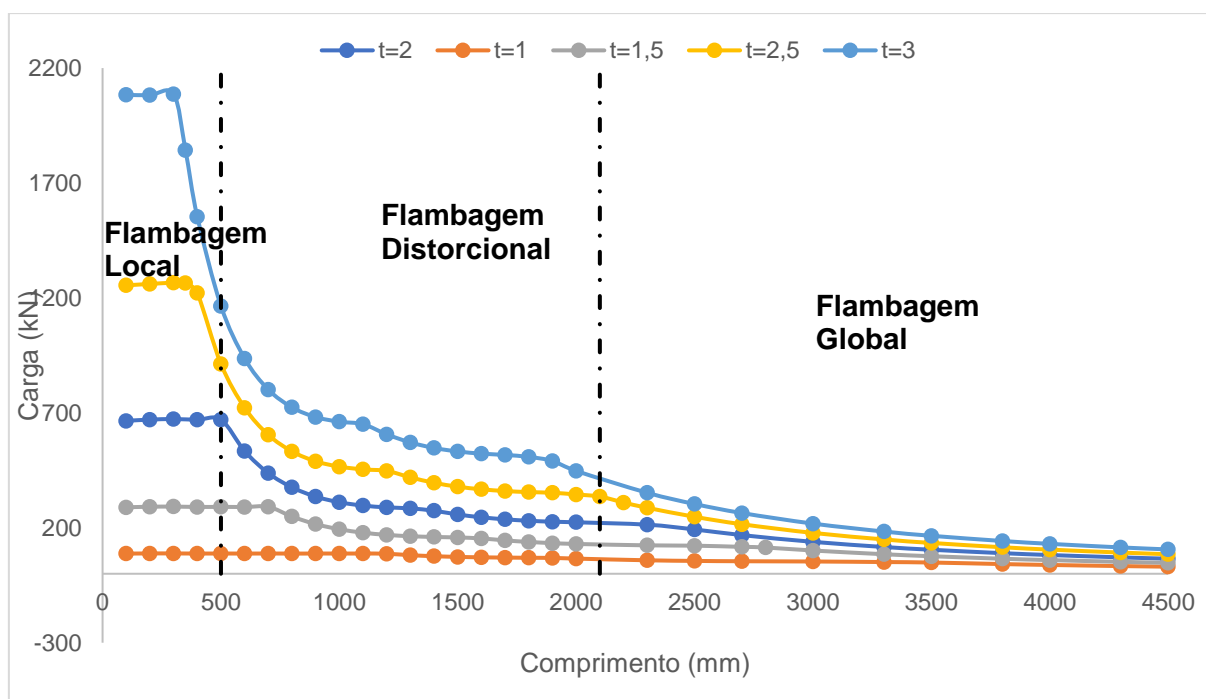
Fonte: O autor (2021)

No comprimento de 2300mm, onde a flambagem global começa a ser dominante, temos que o valor de carga crítica global é igual a 222 kN, e o valor de carga crítica distorcional é de 213 kN, sendo que a razão entre esses valores de carga é próxima a 1, temos que nesse comprimento a possibilidade de o perfil sofrer interação D-G é alta. A Figura 7.22 mostra as configurações deformadas desses dois modos no comprimento de 2300mm.

Figura 7.22: Modos de flambagem global e distorcional – seção S2 engastada

Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.23 mostra as curvas de flambagens obtidas para as 5 espessuras utilizadas neste trabalho obtidas pelo software ABAQUS considerando os perfis com furos.

Figura 7.23: Curva de flambagem seção S2 com furos, condição engastada para todas as espessuras

Fonte: O autor (2021)

As tabelas 7.9 e 7.10 mostram os perfis selecionados com possível interação D-G da seção S2 com e sem furos.

Tabela 7.9: Perfis selecionados com interação D-G seção S2 com furos e condição engastada

L (mm)	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1900	3	490657,5	493942,5	0,99
2000	3	449797,5	482985,0	0,93
2100	2,5	335812,5	335992,5	1,00
2200	2,5	310050,0	329377,5	0,94
2300	2	222468,8	213646,5	1,04
2500	2	192800,3	205731,0	0,94
2900	1,5	107388,0	113379,8	0,95
3000	1,5	101108,3	112126,5	0,90
3500	1	48901,5	49671,0	0,98
3600	1	46458,0	49198,5	0,94

Fonte: O autor (2021)

Tabela 7.10: Perfis selecionados com interação D-G seção S2 sem furos e condição engastada

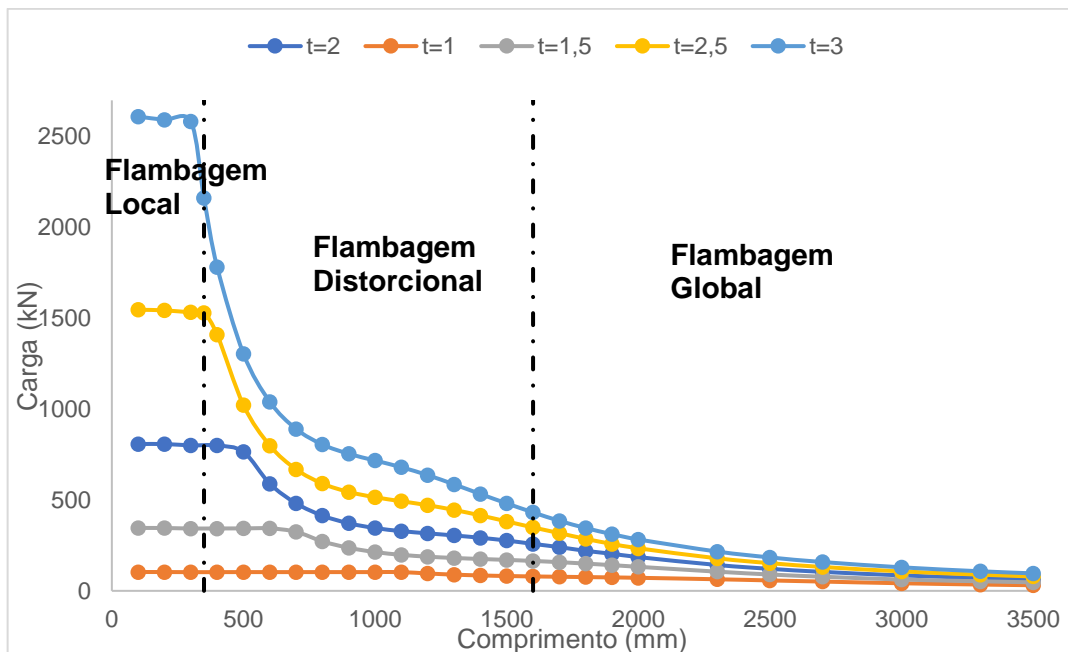
L (mm)	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1900	3	598522,5	611887,5	0,98
2000	3	547087,5	602820,0	0,91
2100	2,5	408442,5	415597,5	0,98
2200	2,5	376200,0	410310,0	0,92
2300	2	270405,0	262485,0	1,03
2500	2	233212,5	256455,0	0,91
2900	1,5	129687,8	141093,0	0,92
3000	1,5	126398,3	140348,3	0,90
3500	1	59000,0	61448,0	0,96
3600	1	56043,0	61175,3	0,92

Fonte: O autor (2021)

7.2.3 Curvas de flambagem com condição apoiada com torção restringida para seção S2

As curvas de flambagem da seção S2 sem furos, considerando a condição apoiada com torção restringida e considerando todas as espessuras é mostrada na Figura 7.24.

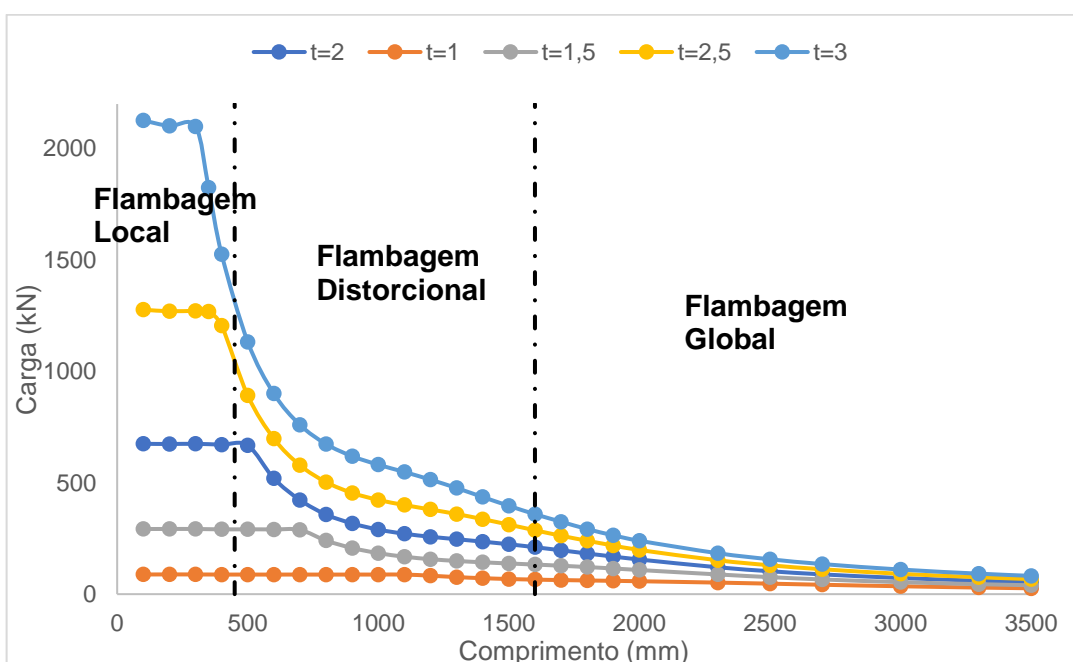
Figura 7.24: Curva de flambagem seção S2 sem furos, condição apoiada com torção restringida para todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.25 mostra as curvas de flambagens dos perfis com furos, considerando as 5 espessuras utilizadas neste trabalho.

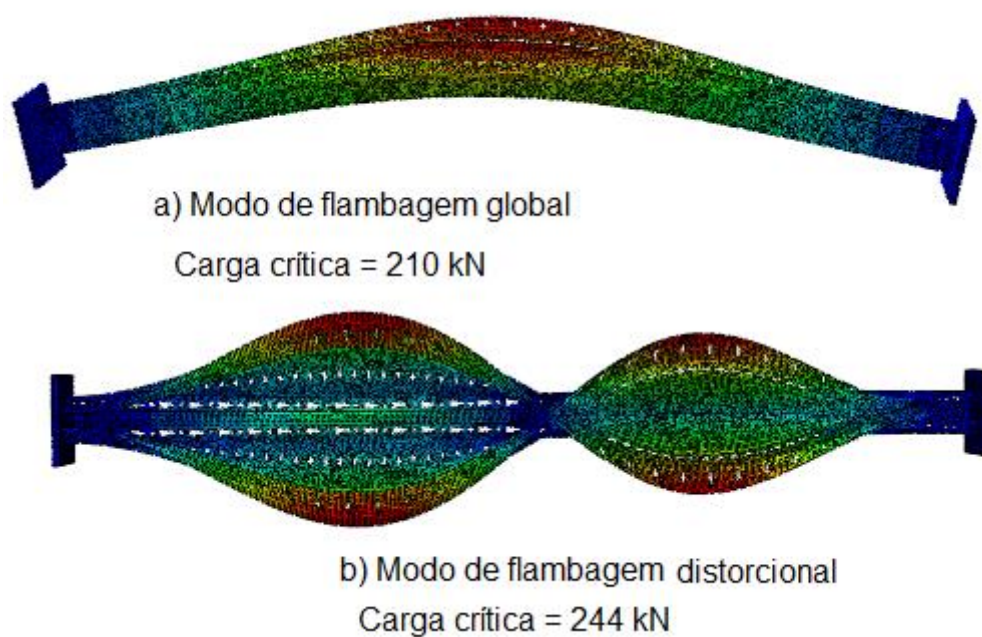
Figura 7.25: Curva de flambagem seção S2 com furos, condição apoiada com torção restringida para todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

Para a espessura de 2mm, a flambagem global passar a ser dominante em torno de 1600mm, neste comprimento o valor da carga crítica global é de 210 kN, e o valor da carga crítica distorcional é de 244 kN, com valor de RGD de 0.86. A Figura 7.26 mostra os modos de flambagem distorcional e global do perfil com 1700mm e 2mm de espessura.

Figura 7.26: Modos de flambagem global e distorcional – seção S2 apoiada com torção restringida



Fonte: O autor (2021)

As tabelas 7.11 e 7.12 mostram os perfis selecionados com possível interação D-G da seção S2 com e sem furos.

Tabela 7.11: Perfis selecionados com interação D-G seção S2 com furos e condição apoiada com torção restringida

L (mm)	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1100	3	548287,0	654673,0	0,84
1200	3	513817,0	604166,0	0,85
1300	2,5	359640,0	418418,0	0,86
1400	2,5	336700,0	393881,0	0,85
1500	2	223916,0	256993,0	0,87
1600	2	210742,0	244395,0	0,86
1800	1,5	121614,0	137940,0	0,88
1900	1,5	115201,0	132712,0	0,87
2200	1	54089,0	60382,0	0,90
2300	1	51864,0	58390,0	0,89

Fonte: O autor (2021)

Tabela 7.12: Perfis selecionados com interação D-G seção S2 sem furos e condição apoiada com torção restringida

L (mm)	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1100	3	680333,0	760906,0	0,89
1200	3	636704,0	710279,0	0,90
1300	2,5	415154,0	466030,0	0,89
1400	2,5	445457,0	488857,0	0,91
1500	2	276868,0	300639,0	0,92
1600	2	259386,0	289405,0	0,90
1800	1,5	149976,0	161974,0	0,93
1900	1,5	141338,0	157525,0	0,90
2200	1	66721,0	70654,0	0,94
2300	1	63727,0	68968,0	0,92

Fonte: O autor (2021)

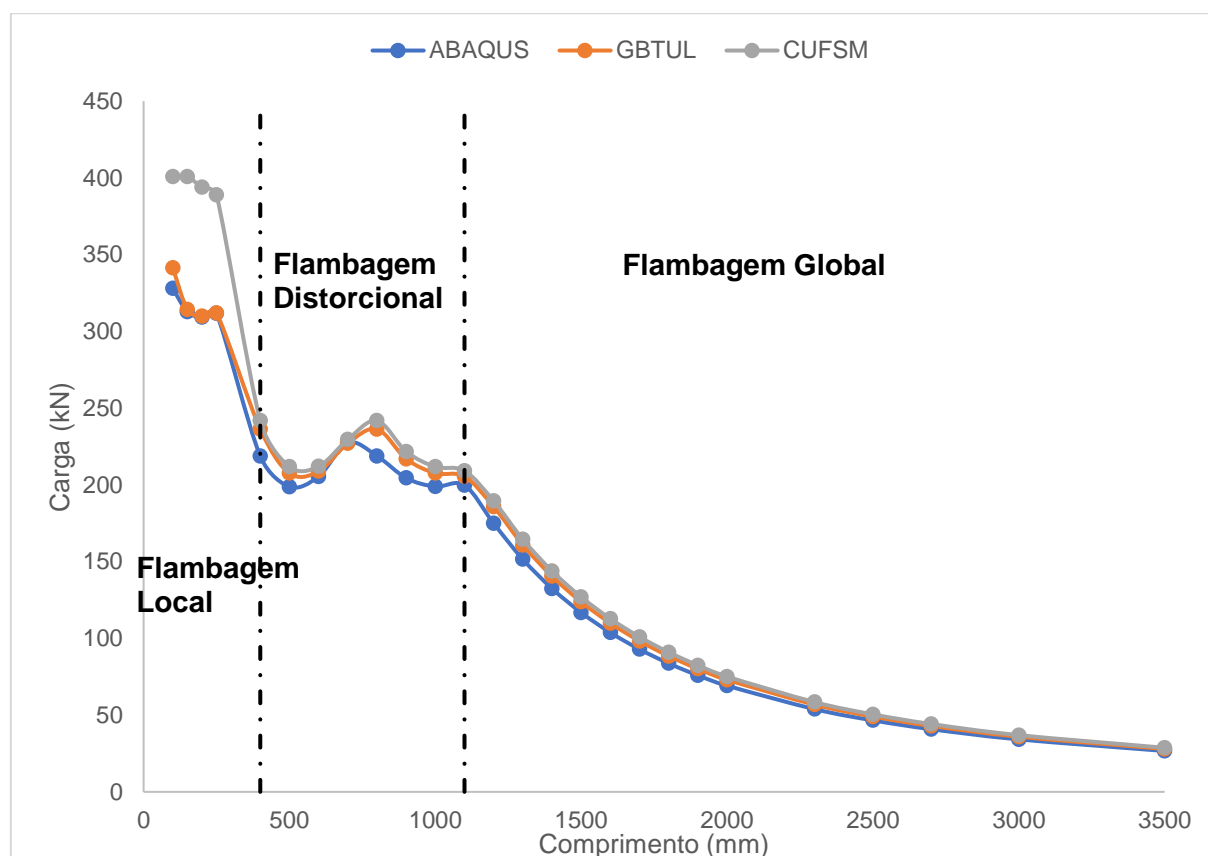
7.3 CURVAS DE FLAMBAGEM PARA SEÇÃO S3

Neste tópico serão determinadas as curvas de flambagem para a seção S3 considerando as condições apoiada, engastada e apoiada com torção restringida.

7.3.1 Curvas de flambagem com condição apoiada para seção S3

As curvas de flambagem da seção S3 sem furos, com condição apoiada e espessura de 2mm e determinados pelos softwares GBTUL, CUFSM e ABAQUS é mostrada na Figura 7.27.

Figura 7.27: Curva de flambagem seção S3 sem furos, condição apoiada, $t=2$

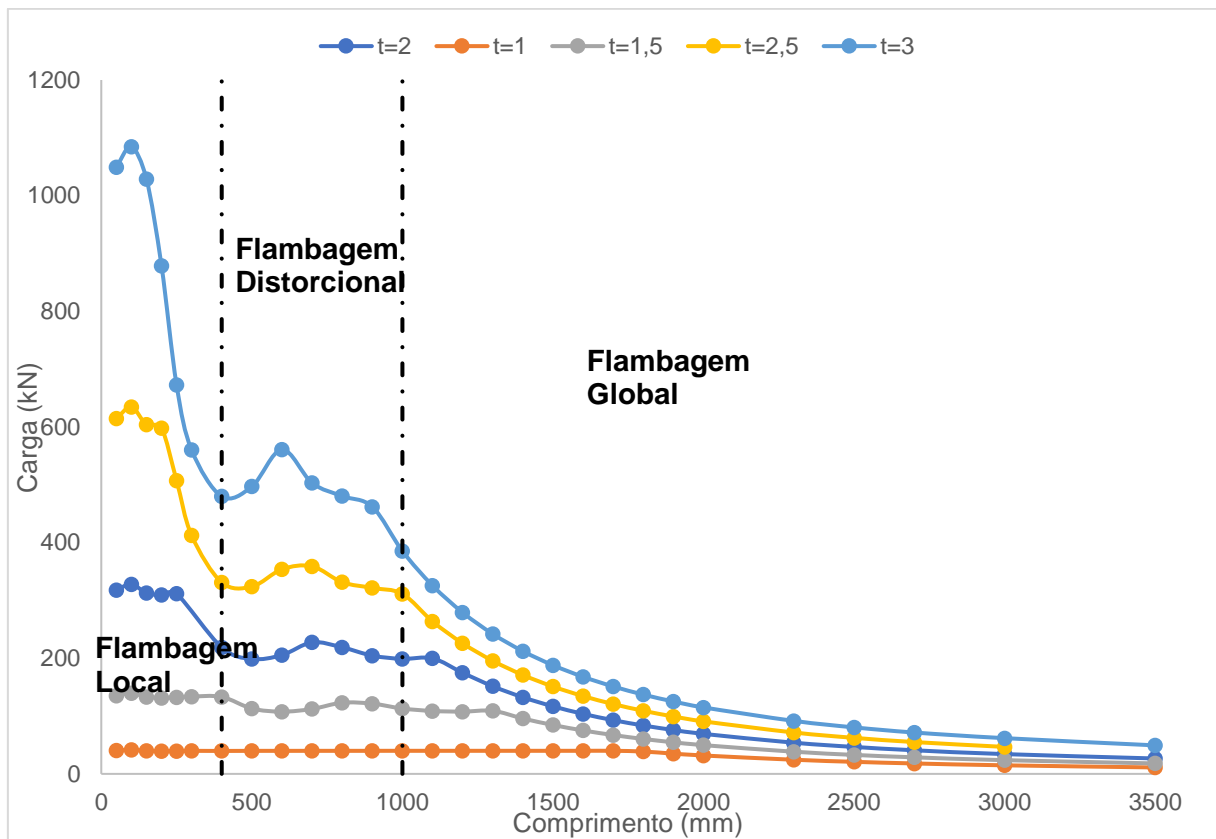


Fonte: O autor (2021)

Novamente, as curvas obtidas pelos três softwares obtiveram boa congruência nos resultados, com exceção dos comprimentos iniciais, onde os valores obtidos pelo software CUFSM também são maiores. Nesta seção, como não há enrijecedores na alma, a flambagem local é mais relevante, como pode ser observado pelo primeiro mínimo da curva, que corresponde a flambagem local. O segundo mínimo corresponde a flambagem distorcional e a curva descendente a flambagem global.

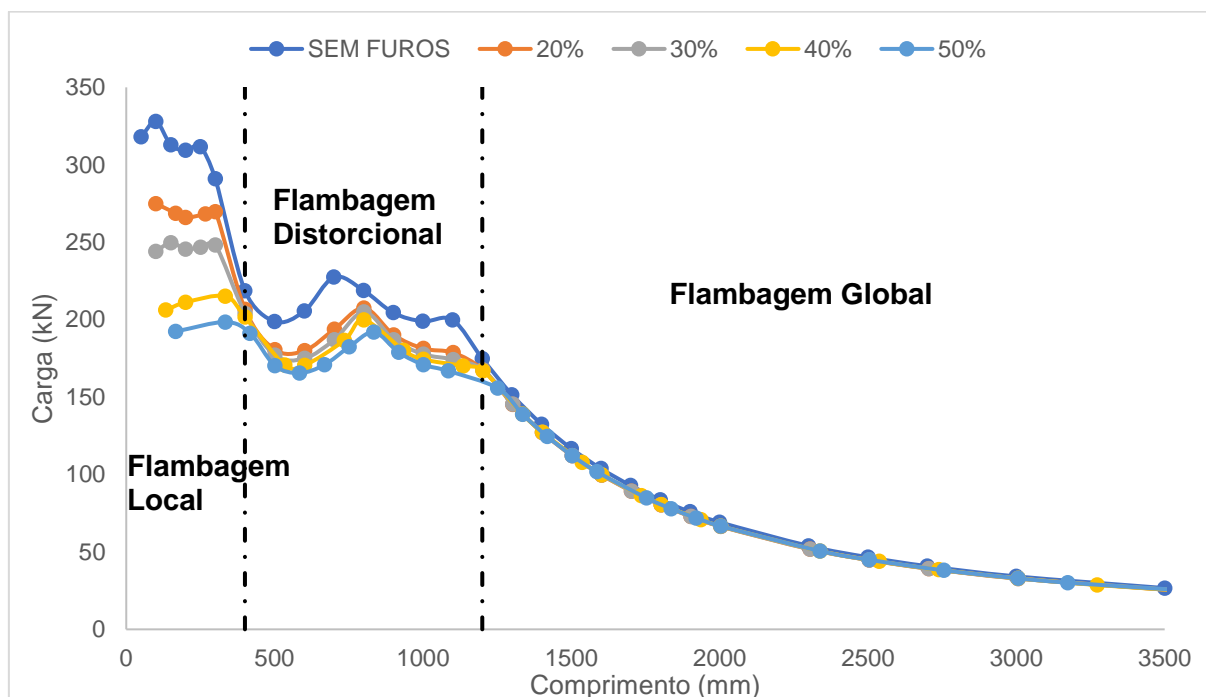
A Figura 7.28 mostra as curvas de flambagens obtidas para as 5 espessuras utilizadas neste trabalho obtidas pelo software ABAQUS considerando os perfis sem furos.

Figura 7.28: Curva de flambagem seção S3 sem furos, condição apoiada para todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

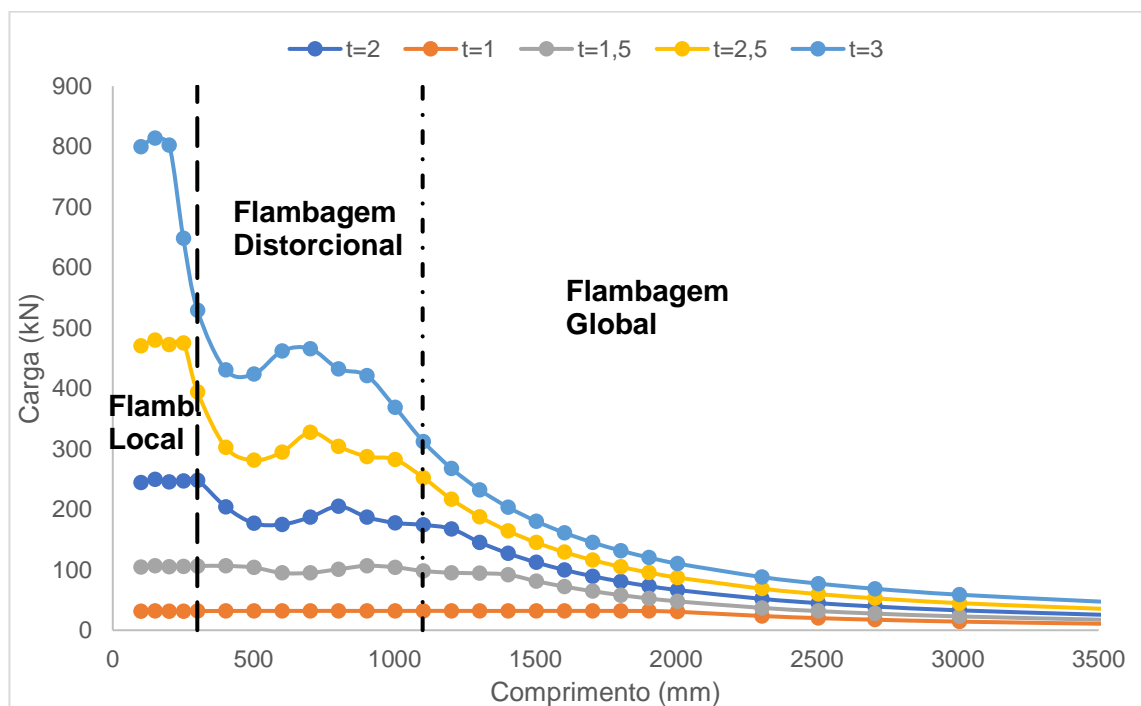
A Figura 7.29 mostra as curvas de flambagem da seção S2 com furos de 20%, 30%, 40% e 50%, com condição apoiada e espessura de 2mm.

Figura 7.29: Curva de flambagem seção S3 com furos, condição apoiada, $t=2$ 

Fonte: O autor (2021)

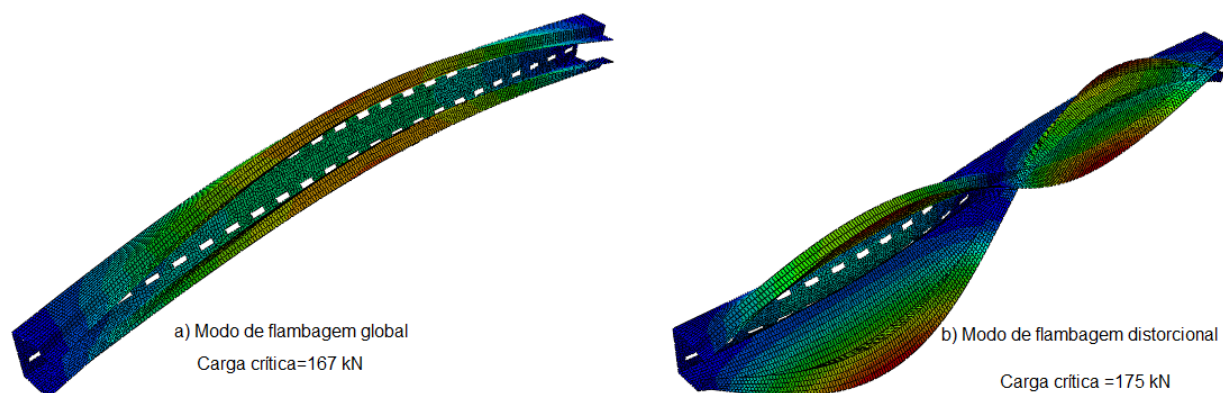
Pode ser observado pela Figura 7.29, ao se aumentar a altura do furo a carga crítica tende a diminuir nos comprimentos onde a flambagem local e distorcional são dominantes. A partir do momento onde a flambagem global passa a ser dominante, os valores de carga crítica global tendem a se igualar a todos os tipos de furos. Além disso, também foi observado que ao aumentar o tamanho dos furos, a flambagem global passa a ser dominante em comprimentos maiores.

Por fim, a Figura 7.30 mostra as curvas de flambagens para todas as espessuras e com furos de 30%.

Figura 7.30: Curva de flambagem seção S3 apoiada, furos 30%, todas as espessuras

Fonte: O autor (2021)

Pela Figura 7.30, considerando a espessura de 2mm, a flambagem global passa a ser dominante a partir de 1200mm. Neste comprimento a carga crítica de flambagem global tem valor de 167 kN, enquanto que a flambagem distorcional tem valor de 175 kN, com valor de razão RGD de aproximadamente 0.95, logo, este perfil tem grandes chances de sofrer interação. A Figura 7.31 mostra os dois modos de flambagem neste comprimento.

Figura 7.31: Modos de flambagem global e distorcional – seção S3 apoiada

Fonte: O autor (2021)

A Tabela 7.13 mostram os perfis selecionados com possível interação D-G da seção S3 sem furos e com os furos utilizados na seção S3.

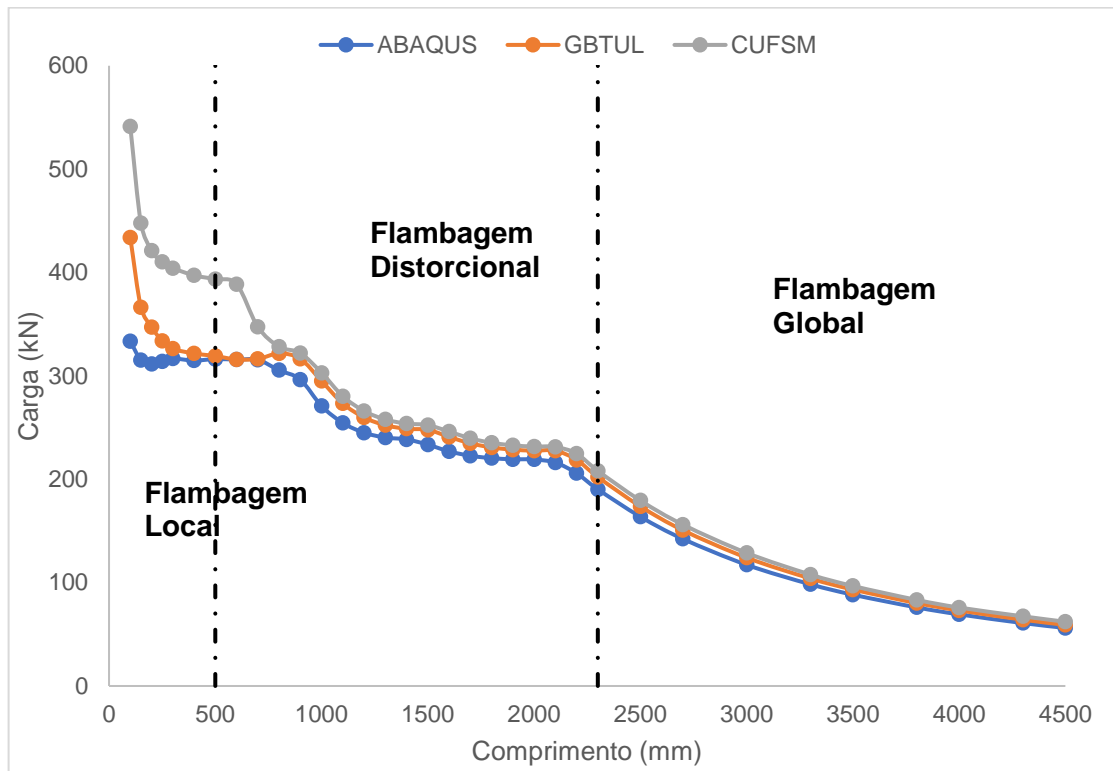
Tabela 7.13: Perfis selecionados com interação D-G seção S3 com condição apoiada

L (mm)	TIPO	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
900	Sem furos	3	461936,5	480769,7	0,96
1000	Sem furos	2,5	311192,7	324150,3	0,96
1200	Sem furos	2	174846,6	205380,9	0,85
1400	Sem furos	1,5	95792,0	112264,4	0,85
901,8	20%	3	441503,4	430958,9	1,02
1002	20%	2,5	297763,0	289369,4	1,03
1202,4	20%	2	167562,5	180554,2	0,93
1402,8	20%	1,5	91878,4	98210,4	0,94
901,8	30%	3	441162,4	421201,3	1,05
1002	30%	2,5	297684,3	282418,4	1,05
1202,4	30%	2	167562,5	175308,2	0,96
1402,8	30%	1,5	91941,4	95207,0	0,97
935,2	40%	3	414407,8	412256,9	1,01
1002	40%	2,5	297107,2	276359,3	1,08
1202,4	40%	2	167483,8	170909,4	0,98
1402,8	40%	1,5	91888,9	92327,0	1,00
918,5	50%	3	425791,6	404833,8	1,05
1002	50%	2,5	296320,3	270824,8	1,09
1252,5	50%	2	155690,8	167656,9	0,93
1419,5	50%	1,5	89879,7	88919,7	1,01

Fonte: O autor (2021)

7.3.2 Curvas de flambagem com condição engastada para seção S3

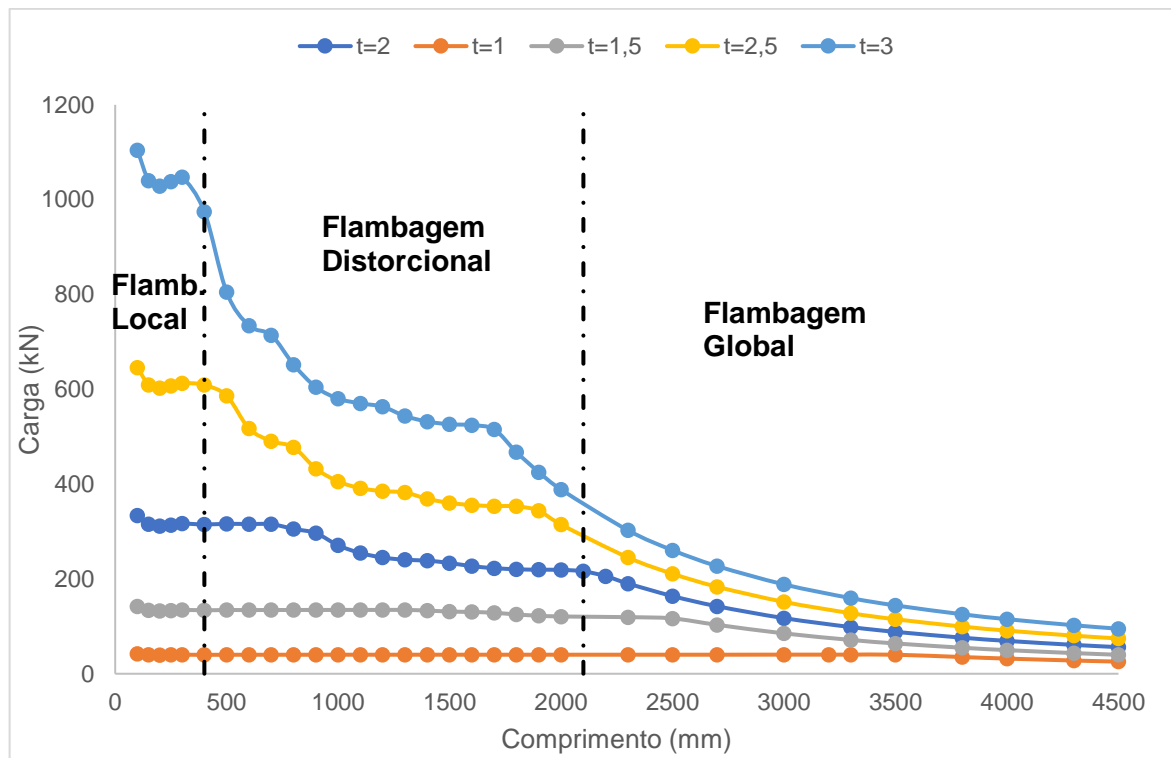
As curvas de flambagem da seção S3 sem furos, com condição engastada obtidas via GBTUL, CUFSM e ABAQUS, e espessura de 2mm é mostrada na Figura 7.32

Figura 7.32: Curva de flambagem seção S3 sem furos, condição engastada, $t=2$ 

Fonte: O autor (2021)

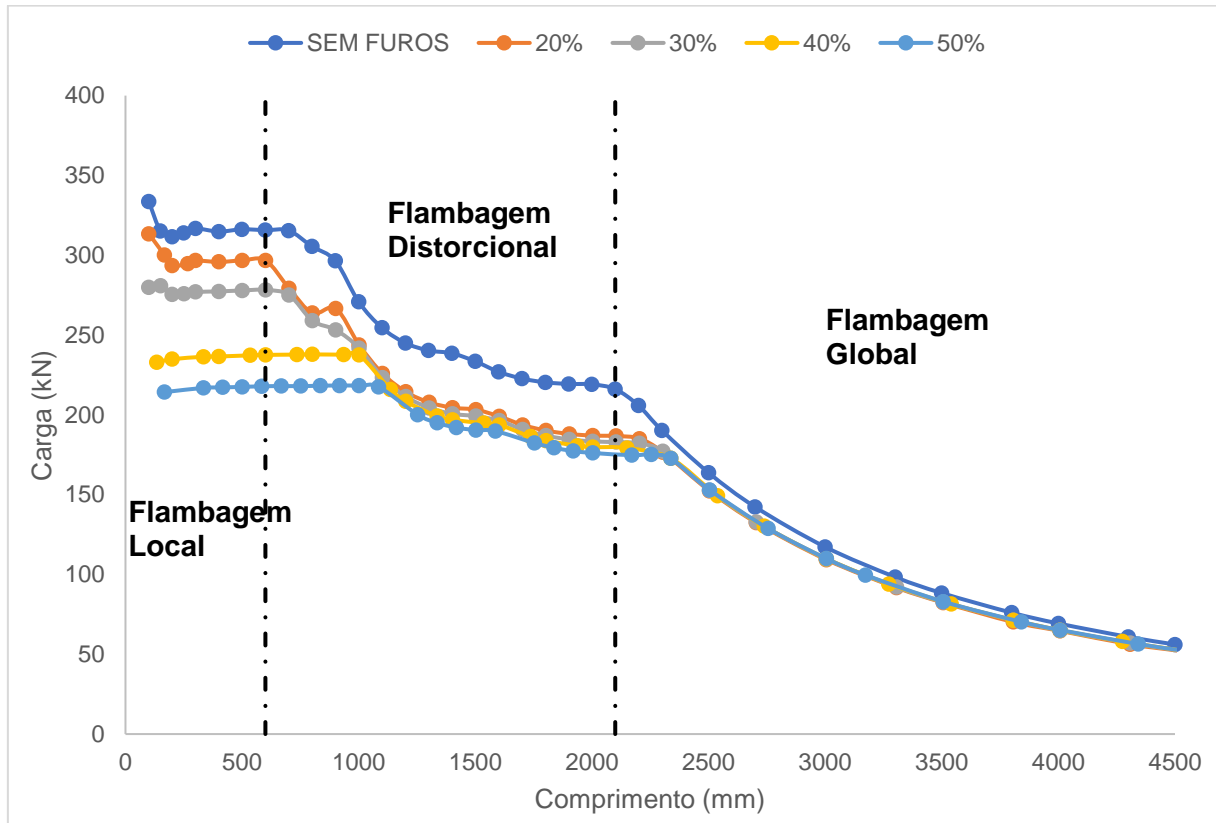
A Figura 7.33 mostra as curvas de flambagens obtidas para as 5 espessuras utilizadas neste trabalho obtidas pelo software ABAQUS considerando os perfis sem furos.

Figura 7.33: Curva de flambagem seção S3 sem furos, condição engastada para todas as espessuras



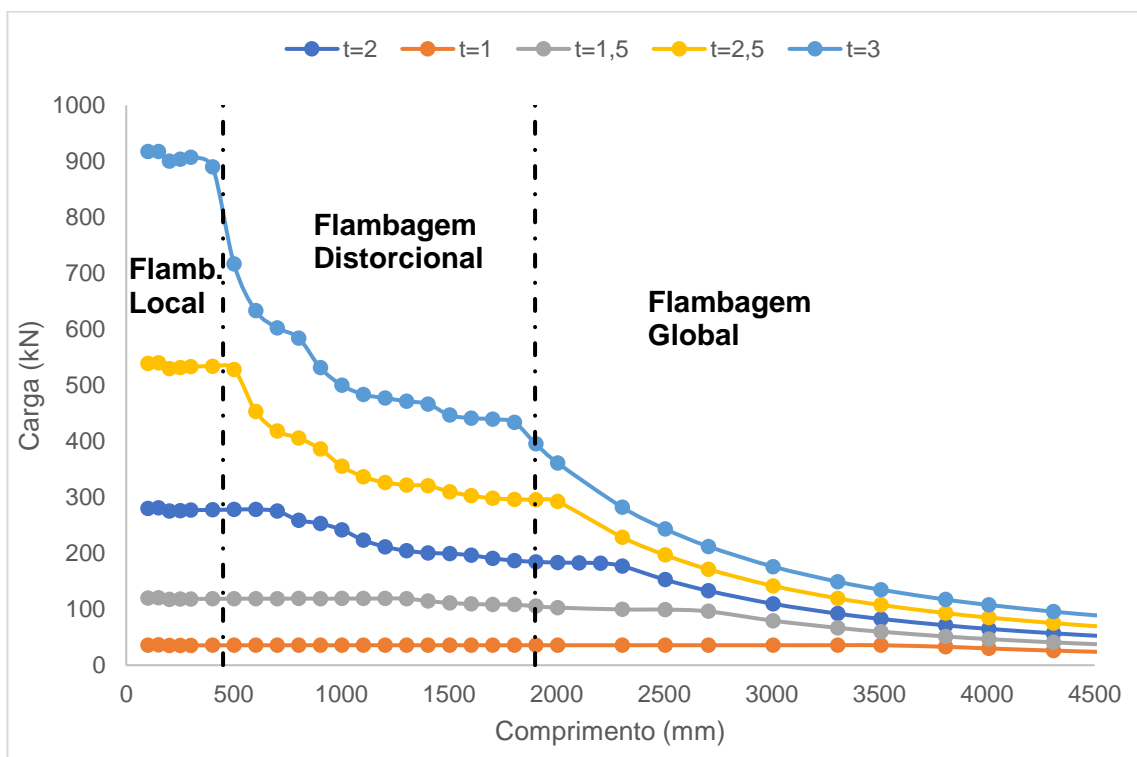
Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.34 mostra as curvas de flambagem da seção S3 com todos os tipos de furos com condição engastada e espessura de 2mm.

Figura 7.34: Curva de flambagem seção S3 com furos, condição engastada, $t=2$ 

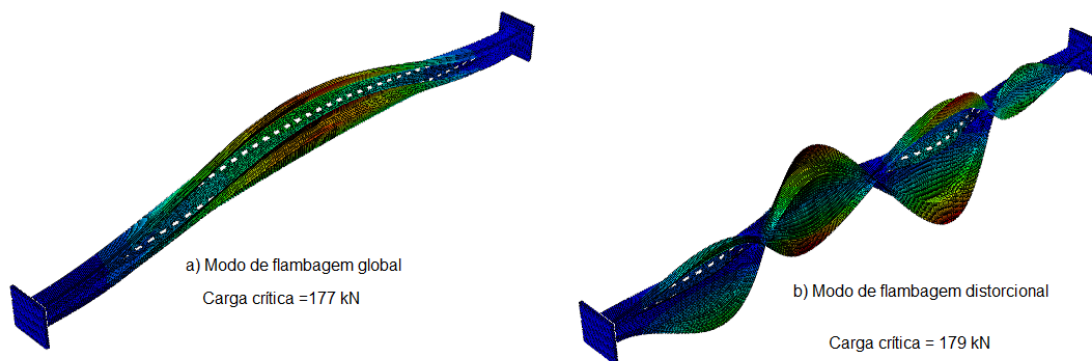
Fonte: O autor (2021)

Por fim, a Figura 7.35 mostra as curvas de flambagens para todas as espessuras e com furos de 30%.

Figura 7.35: Curva de flambagem seção S3 engastada, furos 30%, todas as espessuras

Fonte: O autor (2021)

Pela Figura 7.35, considerando a espessura de 2mm, a flambagem global passa a ser dominante a partir de 2300mm. Neste comprimento a carga crítica de flambagem global tem valor de 177 kN, enquanto que a flambagem distorcional tem valor de 179 kN, com valor de razão RGD de aproximadamente 1, logo, este perfil tem grandes chances de sofrer interação. A Figura 7.36 mostra os dois modos de flambagem neste comprimento.

Figura 7.36: Modos de flambagem global e distorcional – seção S3 engastada

Fonte: O autor (2021)

A Tabela 7.14 mostram os perfis selecionados com possível interação D-G da seção S3 sem furos e com os furos utilizados na seção S3.

Tabela 7.14: Perfis selecionados com interação D-G seção S3 com condição engastada

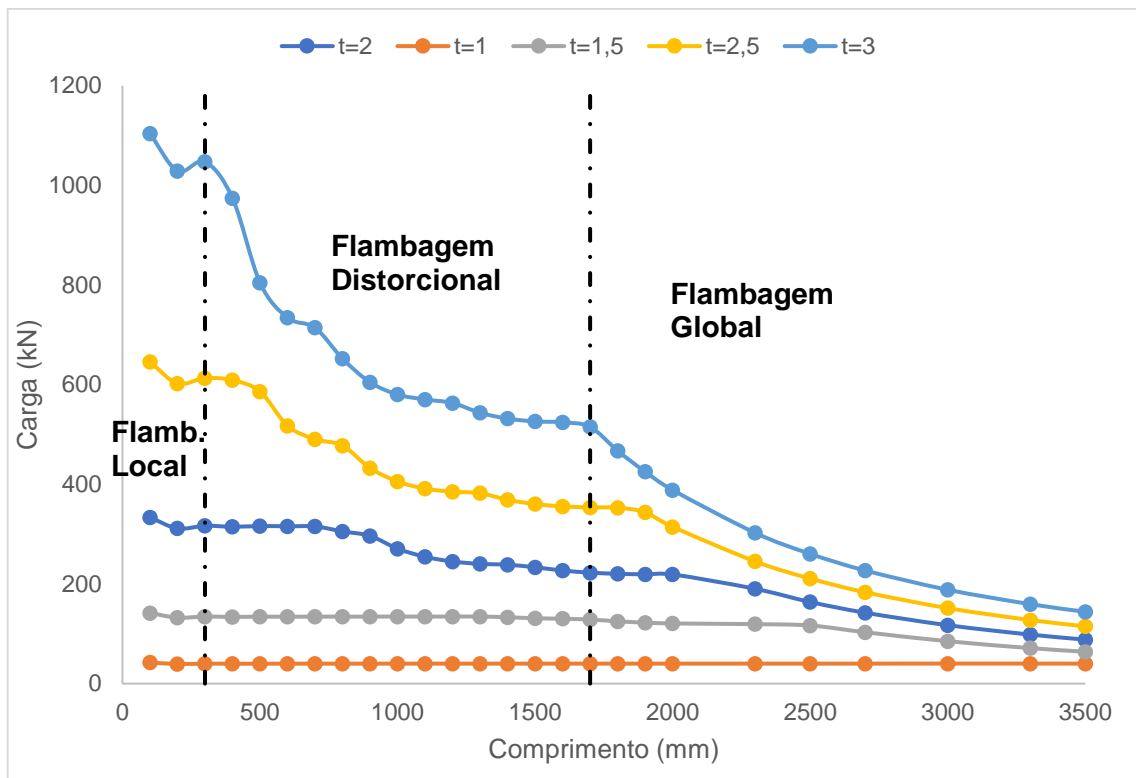
L (mm)	TIPO	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1800	Sem furos	3	467257,5	512730,0	0,91
2000	Sem furos	2,5	314595,0	344295,0	0,91
2300	Sem furos	2	190266,8	212496,8	0,90
2700	Sem furos	1,5	103146,8	115337,3	0,89
1803,6	20%	3	432450,0	444600,0	0,97
2004	20%	2,5	291532,5	297742,5	0,98
2304,6	20%	2	176589,0	183006,0	0,96
2705,4	20%	1,5	95820,8	98982,0	0,97
1803,6	30%	3	433440,0	437962,5	0,99
2004	30%	2,5	292230,0	293062,5	1,00
2304,6	30%	2	177050,3	179835,8	0,98
2705,4	30%	1,5	96117,8	97137,0	0,99
1803,6	40%	3	431775,0	431145,0	1,00
2004	40%	2,5	289665,0	288607,5	1,00
2338	40%	2	172773,0	176148,0	0,98
2738,8	40%	1,5	94126,5	96691,5	0,97
1837	50%	3	419422,5	423540,0	0,99
2004	50%	2,5	291915,0	284287,5	1,03
2338	50%	2	172689,8	172919,3	1,00
2755,5	50%	1,5	93107,3	92182,5	1,01

Fonte: O autor (2021)

7.3.3 Curvas de flambagem com condição apoiada com torção restringida para seção S3

As curvas de flambagem da seção S3 sem furos, considerando a condição apoiada com torção restringida e considerando todas as espessuras é mostrada na Figura 7.37.

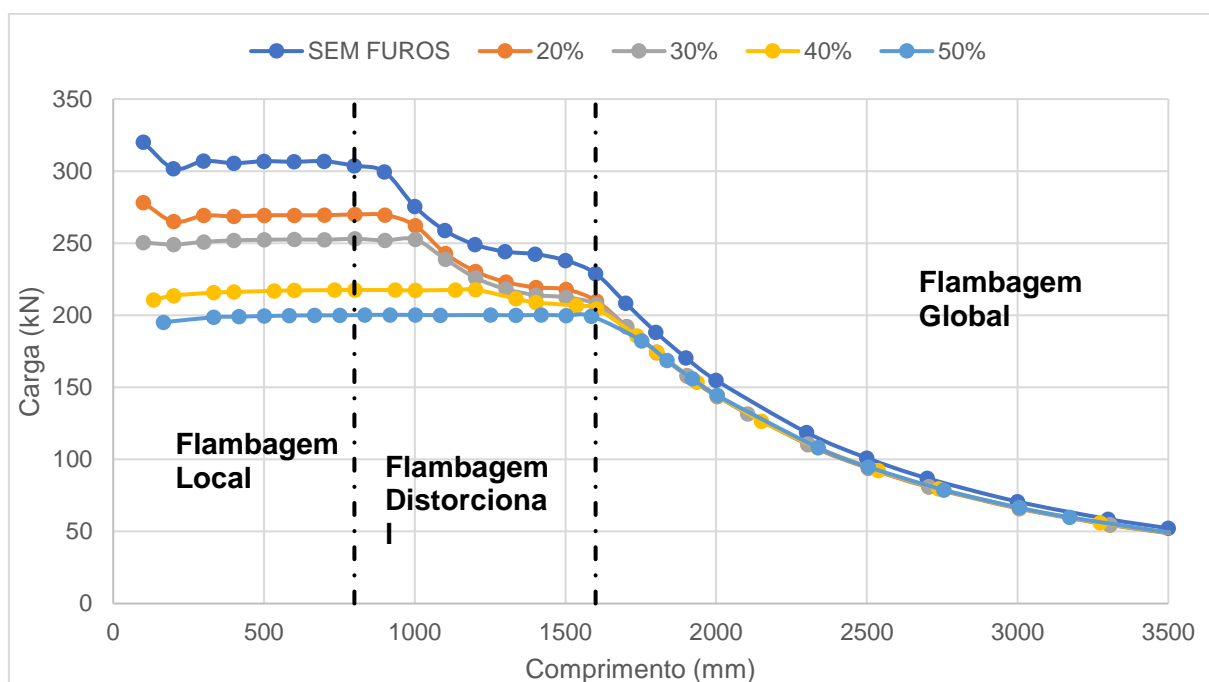
Figura 7.37: Curva de flambagem seção S3 sem furos, condição apoiada com torção restringida para todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.38 mostra as curvas de flambagens dos perfis com todas as tipologias de furos, considerando a espessura de 2mm.

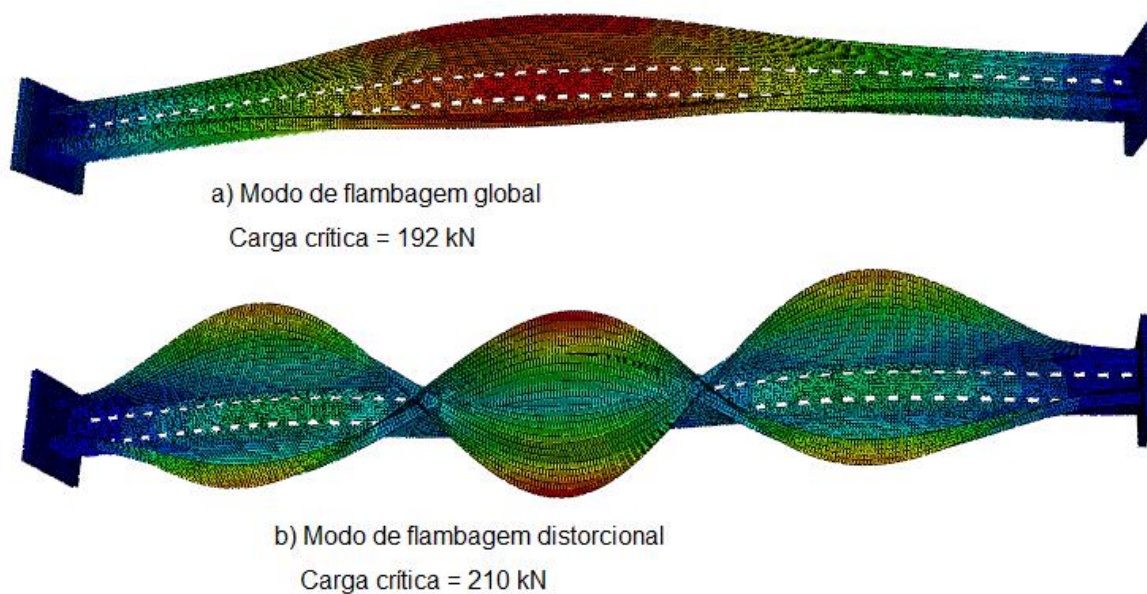
Figura 7.38: Curva de flambagem seção S3 com furos, condição apoiada com torção restringida, $t=2$



Fonte: O autor (2021)

Observando a Figura 7.38, e considerando o perfil com furos de 20% e espessura de 2mm, a flambagem global passa a ser dominante em torno de 1600mm. No comprimento de 1700mm, a carga crítica global tem valor de 192 kN, enquanto que a carga crítica distorcional tem valor de 210 kN, com RGD com valor de 0.91, logo, este perfil tem chances de sofrer interação D-G. A Figura 7.39 mostra os modos de flambagem desse perfil.

Figura 7.39: Modos de flambagem global e distorcional – seção S3 apoiada com torção restringida



Fonte: O autor (2021)

A Tabela 7.15 mostram os perfis selecionados com possível interação D-G da seção S3 sem furos e com os furos utilizados na seção S3.

Tabela 7.15: Perfis selecionados com interação D-G seção S3 com condição apoiada com torção restringida

L (mm)	TIPO	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1400	Sem furos	3	458361,0	544922,0	0,84
1500	Sem furos	2,5	332202,0	369426,0	0,90
1700	Sem furos	2	208479,0	228339,0	0,91
2000	Sem furos	1,5	113967,0	123761,0	0,92
1402,8	20%	3	423059,0	501489,0	0,84
1503	20%	2,5	306067,0	341139,0	0,90
1703,4	20%	2	192101,0	210327,0	0,91
2004	20%	1,5	105087,0	113568,0	0,93
1402,8	30%	3	423562,0	492196,0	0,86
1503	30%	2,5	306025,0	335127,0	0,91
1703,4	30%	2	192062,0	206388,0	0,93
2004	30%	1,5	105051,0	111248,0	0,94
1402,8	40%	3	423562,0	492196,0	0,86
1536,4	40%	2,5	294870,0	325820,0	0,91
1736,8	40%	2	185762,0	200525,0	0,93
2004	40%	1,5	104529,0	111265,0	0,94
1402,8	50%	3	414472,0	473781,0	0,87
1503	50%	2,5	303929,0	324329,0	0,94
1753,5	50%	2	182204,0	194760,0	0,94
2004	50%	1,5	104529,0	108905,0	0,96

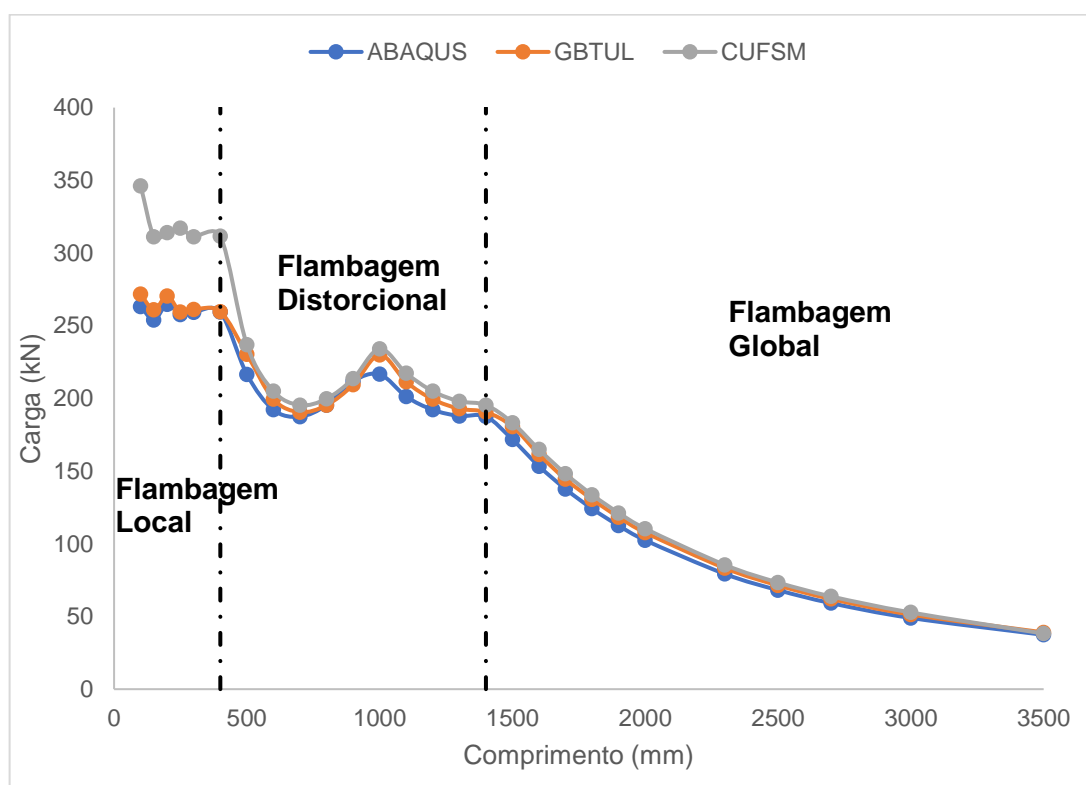
Fonte: O autor (2021)

7.4 CURVAS DE FLAMBAGEM PARA SEÇÃO S4

Neste tópico serão determinadas as curvas de flambagem para a seção S4 considerando as condições apoiada, engastada e apoiada com torção restringida.

7.4.1 Curvas de flambagem com condição apoiada para seção S4

As curvas de flambagem da seção S4 sem furos, com condição apoiada e espessura de 2mm e determinados pelos softwares GBTUL, CUFSM e ABAQUS é mostrada na Figura 7.40

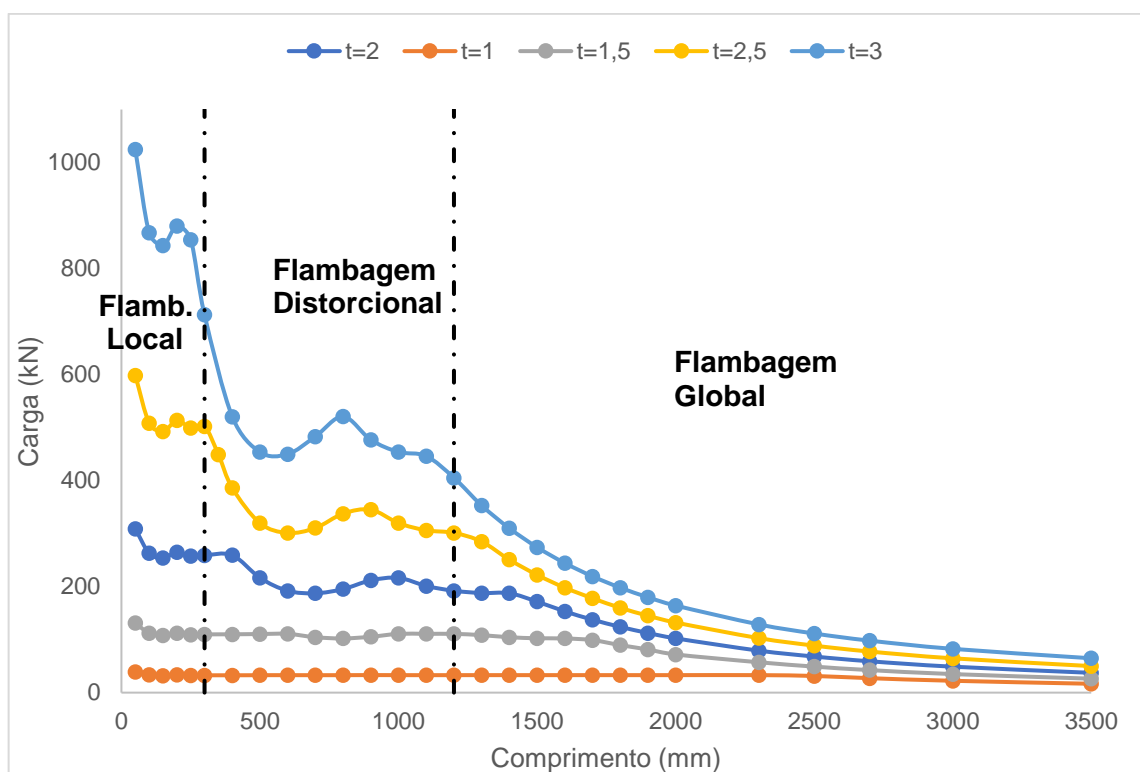
Figura 7.40: Curva de flambagem seção S4 sem furos, condição apoiada, $t=2\text{mm}$ 

Fonte: O autor (2021)

As observações feitas para seção S3 também são válidas par a seção S4, os perfis possuem a mesma geometria, mudando apenas os valores de largura da alma. Novamente, as curvas obtidas pelos três softwares obtiveram boa congruência nos resultados.

A Figura 7.41 mostra as curvas de flambagens obtidas para as 5 espessuras utilizadas neste trabalho obtidas pelo software ABAQUS considerando os perfis sem furos.

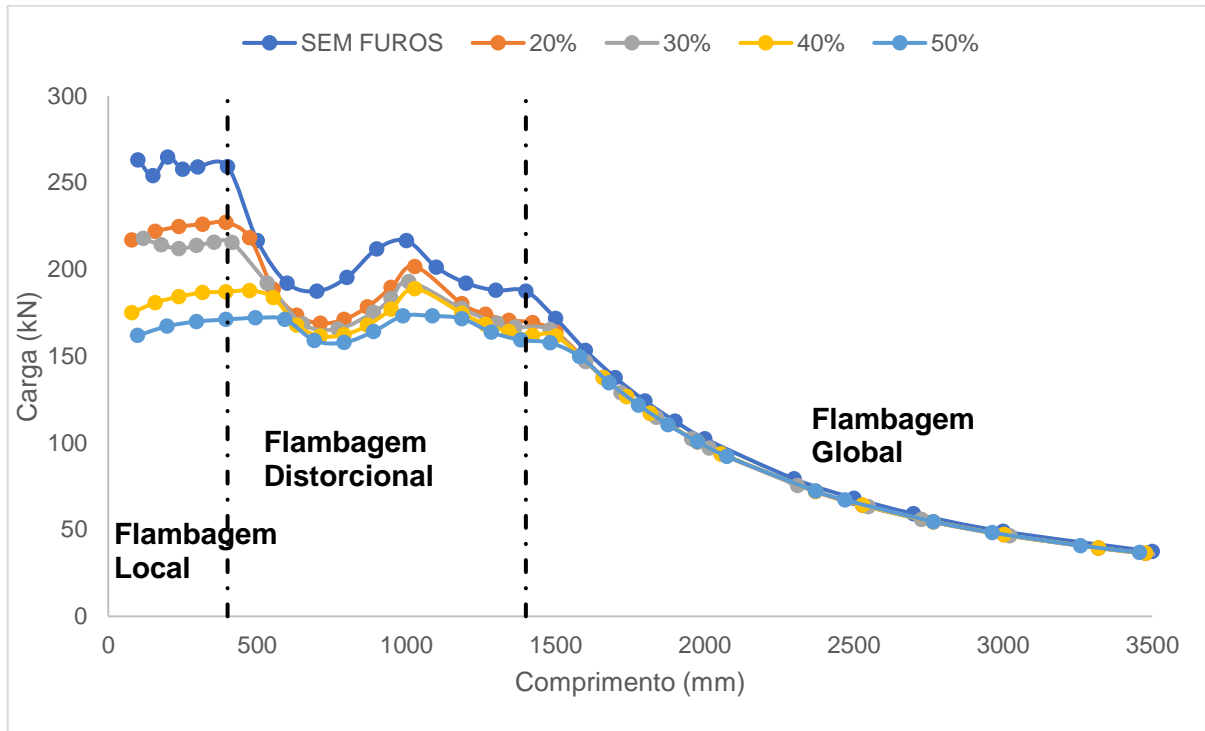
Figura 7.41: Curva de flambagem seção S4 sem furos, condição apoiada para todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.42 mostra as curvas de flambagem da seção S4 com furos de 20%, 30%, 40% e 50%, com condição apoiada e espessura de 2mm.

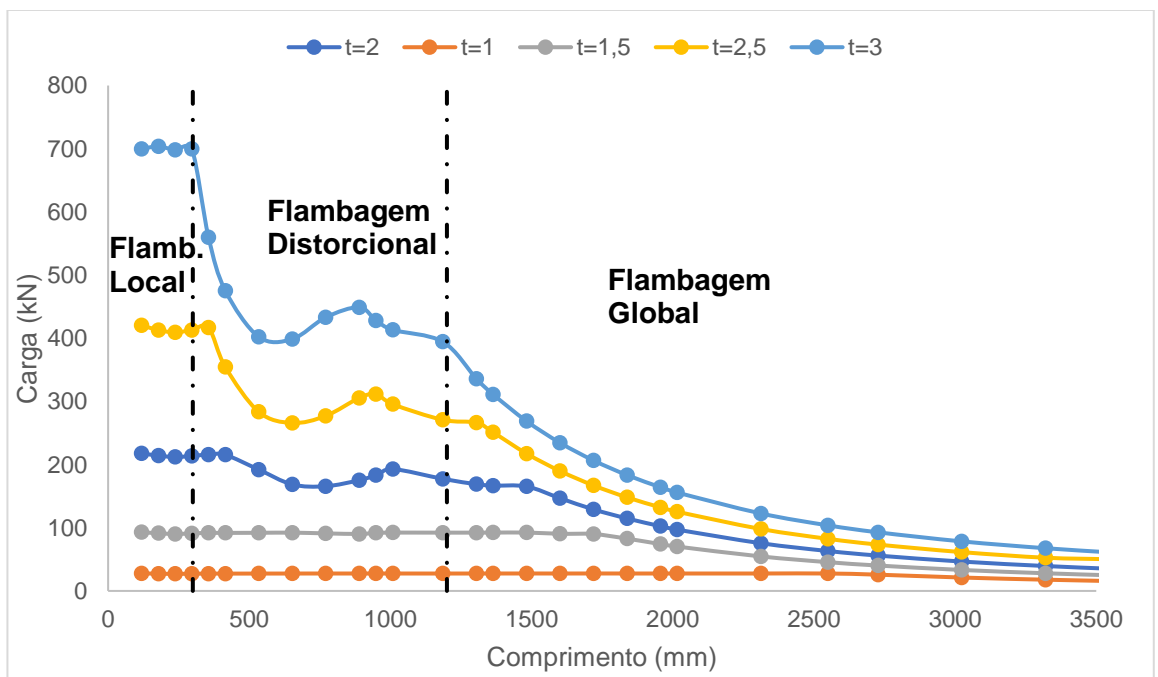
Figura 7.42: Curva de flambagem seção S4 com furos, condição apoiada, t=2



Fonte: O autor (2021)

Por fim, a Figura 7.43 mostra as curvas de flambagens para todas as espessuras e com furos de 30%.

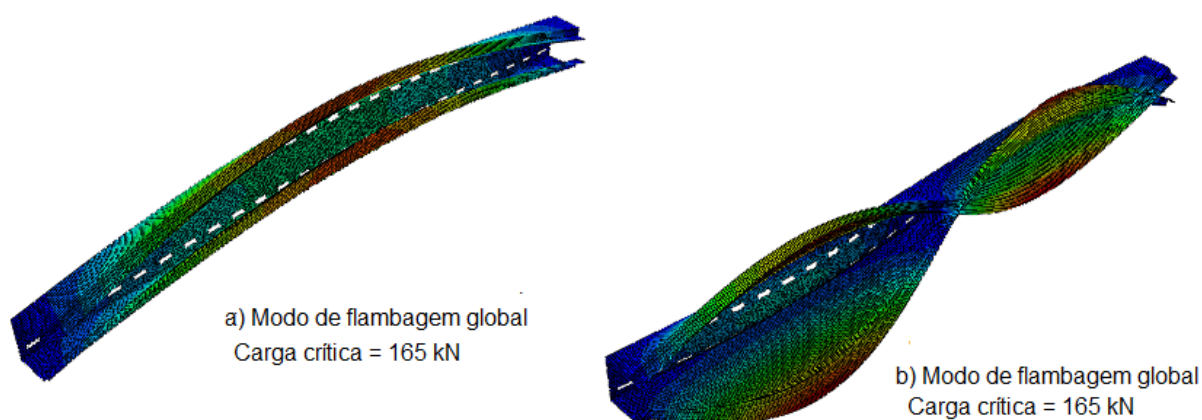
Figura 7.43: Curva de flambagem seção S4 apoiada, furos 30%, todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

Pela Figura 7.43, considerando a espessura de 2mm, a flambagem global passa a ser dominante a partir de 1400mm. No comprimento de 1482mm, a carga crítica de flambagem global tem valor de 167 kN, enquanto que a flambagem distorcional tem valor de 165 kN, com valor de razão RGD de aproximadamente 1, logo, este perfil tem grandes chances de sofrer interação. A Figura 7.44 mostra os dois modos de flambagem neste comprimento.

Figura 7.44: Modos de flambagem global e distorcional – seção S4 apoiada



Fonte: O autor (2021)

A Tabela 7.16 mostram os perfis selecionados com possível interação D-G da seção S3 sem furos e com os furos utilizados na seção S4.

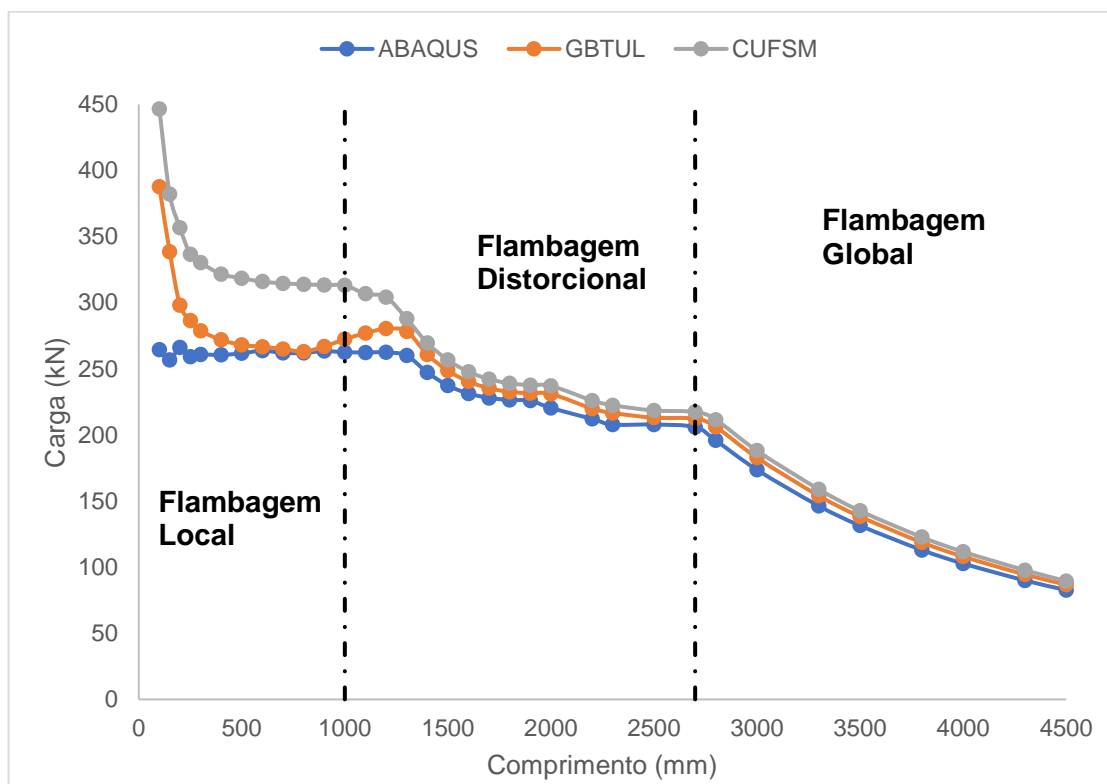
Tabela 7.16: Perfis selecionados com interação D-G seção S4 com condição apoiada

L (mm)	TIPO	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1185	Sem furos	3	413663,6	448988,6	0,92
1250	Sem furos	2,5	304196,9	301600,1	1,01
1500	Sem furos	2	171701,5	190142,7	0,90
1700	Sem furos	1,5	99111,0	103258,9	0,96
1185,6	20%	3	394698,0	404086,6	0,98
1264,64	20%	2,5	272793,8	284907,9	0,96
1501,76	20%	2	163895,4	169660,5	0,97
1738,88	20%	1,5	91191,9	92526,4	0,99
1185,6	30%	3	394384,0	395326,0	1,00
1304,16	30%	2,5	270580,1	266473,0	1,02
1482	30%	2	167578,7	165383,8	1,01
1837,68	30%	1,5	82830,1	91044,3	0,91
1185,6	40%	3	393630,4	387507,4	1,02
1343,68	40%	2,5	257043,5	260877,5	0,99
1501,76	40%	2	163653,7	161615,8	1,01
1817,92	40%	1,5	84353,0	88171,2	0,96
1185,6	50%	3	393630,4	380307,4	1,04
1383,2	50%	2,5	244389,3	255636,8	0,96
1482	50%	2	167010,3	157668,8	1,06
1877,2	50%	1,5	79664,9	84751,7	0,94

Fonte: O autor (2021)

7.4.2 Curvas de flambagem com condição engastada para seção S4

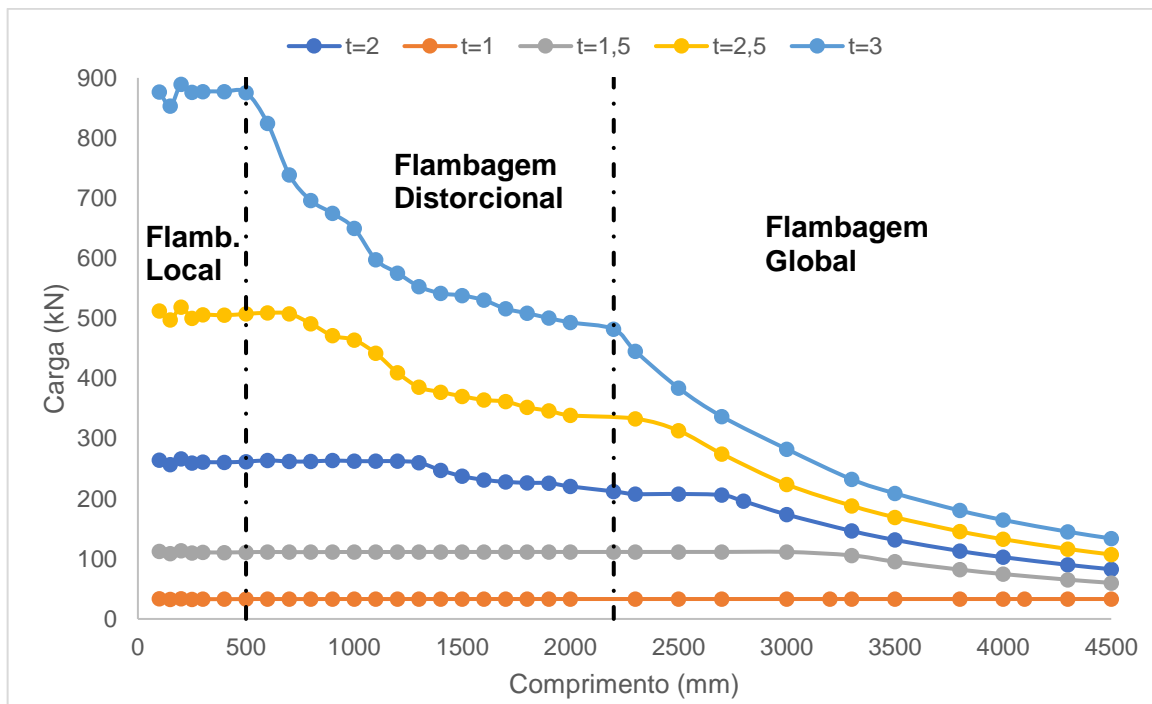
As curvas de flambagem da seção S4 sem furos, com condição engastada obtidas via GBTUL, CUFSM e ABAQUS, e espessura de 2mm é mostrada na Figura 7.45

Figura 7.45: Curva de flambagem seção S4 sem furos, condição engastada, $t=2$ 

Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.46 mostra as curvas de flambagens obtidas para as 5 espessuras utilizadas neste trabalho obtidas pelo software ABAQUS considerando os perfis sem furos.

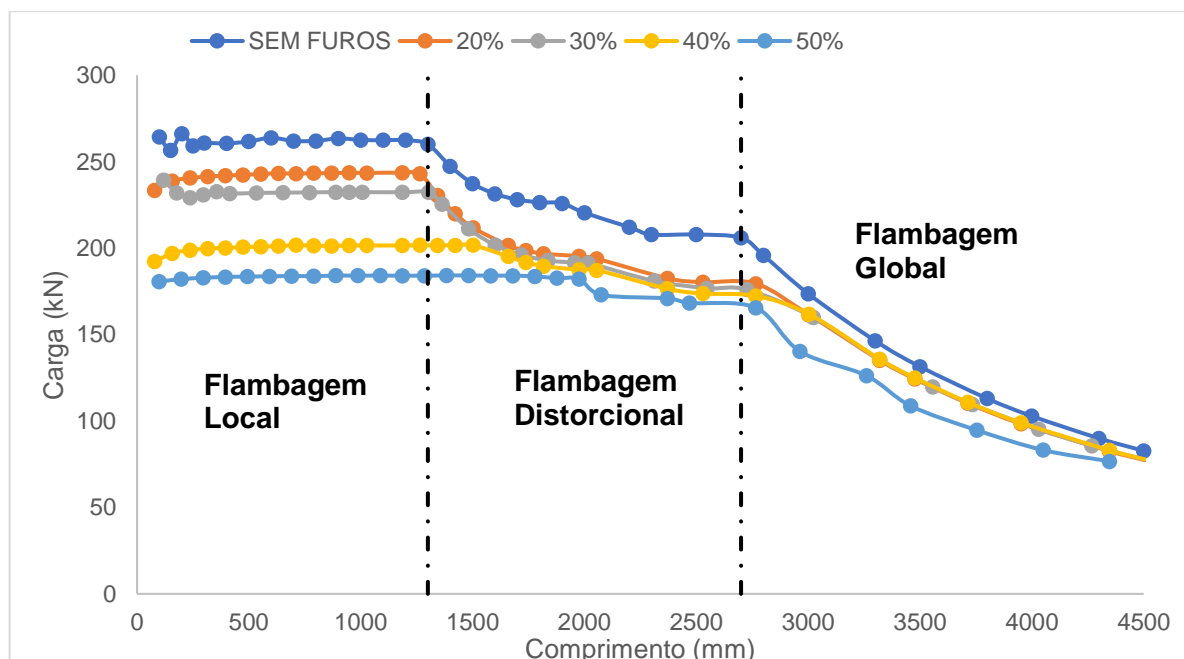
Figura 7.46: Curva de flambagem seção S4 sem furos, condição engastada para todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.47 mostra as curvas de flambagem da seção S4 com todos os tipos de furos com condição engastada e espessura de 2mm.

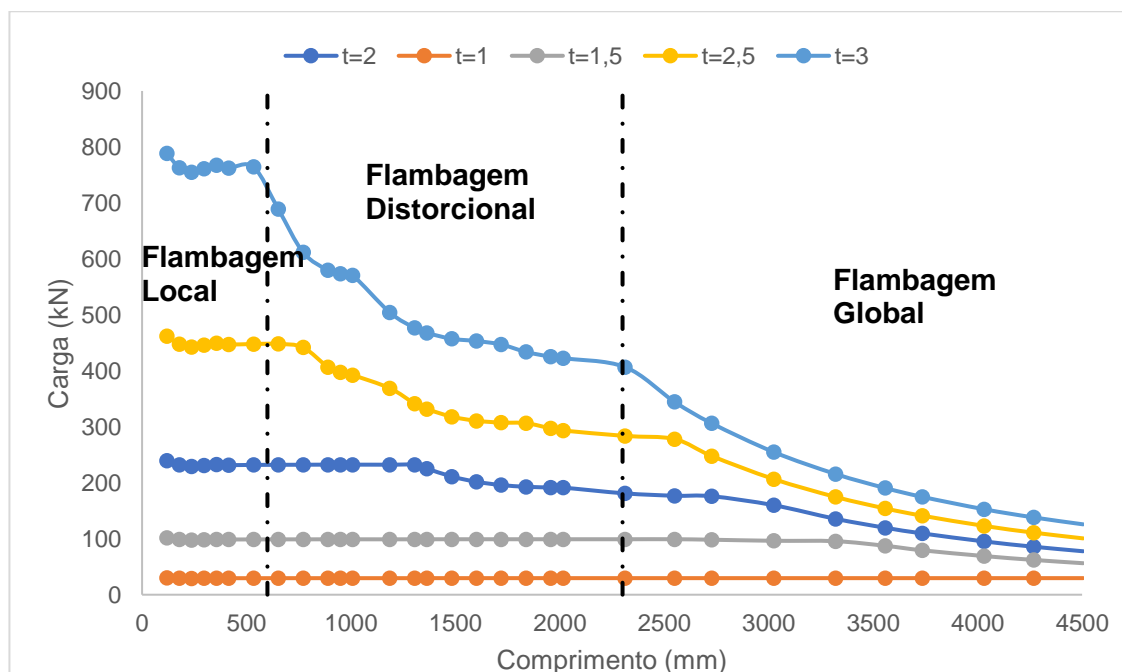
Figura 7.47: Curva de flambagem seção S4 com furos, condição engastada, t=2



Fonte: O autor (2021)

Por fim, a Figura 7.48 mostra as curvas de flambagens para todas as espessuras e com furos de 30%.

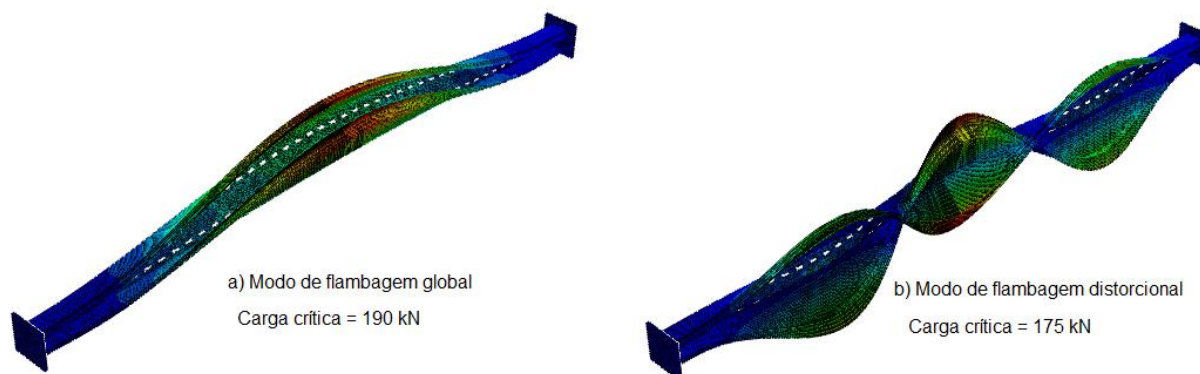
Figura 7.48: Curva de flambagem seção S4 engastada, furos 30%, todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

Pela Figura 7.48, considerando a espessura de 2mm, a flambagem global passa a ser dominante a partir de 2700mm. Neste comprimento, a carga crítica de flambagem global tem valor de 190 kN, enquanto que a flambagem distorcional tem valor de 175 kN, com valor de razão RGD de aproximadamente 1.08, logo, este perfil tem grandes chances de sofrer interação. A Figura 7.49 mostra os dois modos de flambagem neste comprimento.

Figura 7.49: Modos de flambagem global e distorcional – seção S4 engastada



Fonte: O autor (2021)

A Tabela 7.17 mostram os perfis selecionados com possível interação D-G da seção S3 sem furos e com os furos utilizados na seção S4.

Tabela 7.17: Perfis selecionados com interação D-G seção S4 com condição engastada

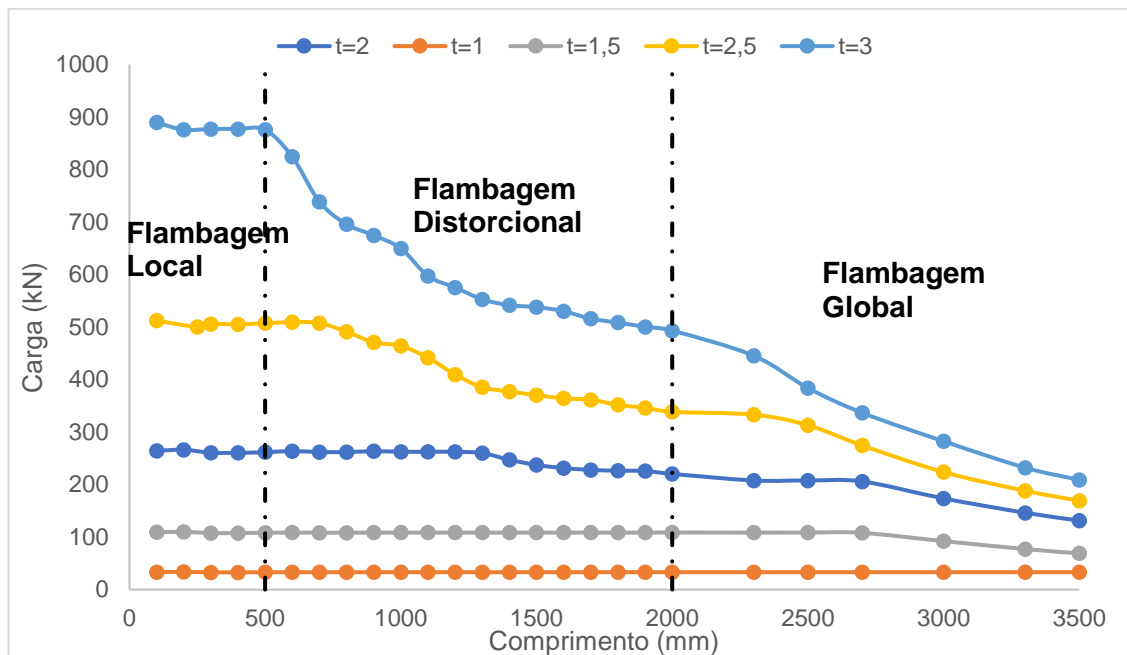
L (mm)	TIPO	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
2350	Sem furos	3	425092,5	472500,0	0,90
2550	Sem furos	2,5	298350,0	325755,0	0,92
2750	Sem furos	2	201946,5	204822,0	0,99
3450	Sem furos	1,5	97735,5	110074,5	0,89
2134,08	20%	3	462420,0	426555,0	1,08
2371	20%	2,5	389205,0	421155,0	0,92
2766,4	20%	2	180189,0	179417,3	1,00
3319,68	20%	1,5	97254,0	97200,0	1,00
2311,92	30%	3	406732,5	417825,0	0,97
2549,04	30%	2,5	277987,5	282172,5	0,99
2726,8	30%	2	190354,5	175932,0	1,08
3319,68	30%	1,5	97510,5	95589,0	1,02
2371,2	40%	3	389857,5	408982,5	0,95
2529,4	40%	2,5	281520,0	277110,0	1,02
2766,4	40%	2	185814,0	172289,3	1,08
3477	40%	1,5	90031,5	90582,8	0,99
2371,2	50%	3	377932,5	392737,5	0,96
2568,8	50%	2,5	266467,5	265365,0	1,00
2766,4	50%	2	180609,8	164756,3	1,10
3477	50%	1,5	90031,5	90582,8	0,99

Fonte: O autor (2021)

7.4.3 Curvas de flambagem com condição apoiada com torção restringida para seção S4

As curvas de flambagem da seção S4 sem furos, considerando a condição apoiada com torção restringida e considerando todas as espessuras é mostrada na Figura 7.50.

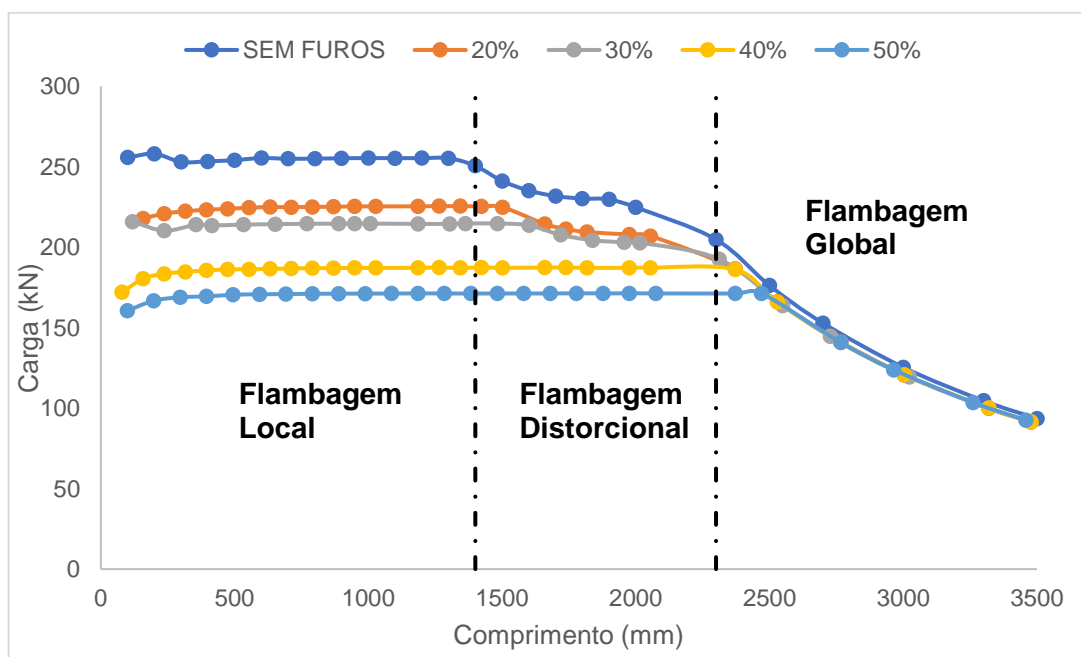
Figura 7.50: Curva de flambagem seção S4 sem furos, condição apoiada com torção restringida para todas as espessuras



Fonte: O autor (2021)

A Figura 7.51 mostra as curvas de flambagens dos perfis com todas as tipologias de furos, considerando a espessura de 2mm.

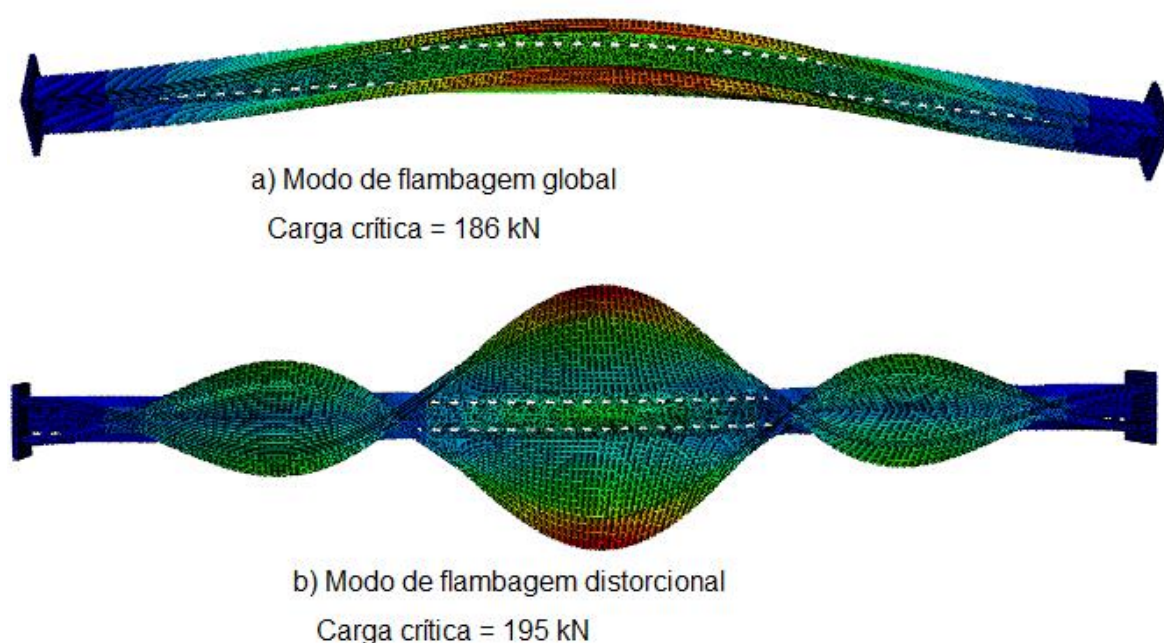
Figura 7.51: Curva de flambagem seção S4 com furos, condição apoiada com torção restringida, t=2



Fonte: O autor (2021)

Observando a Figura 7.51, considerando o perfil com furos de 20% e espessura de 2mm, a flambagem global passa a ser dominante em torno de 2300mm. No comprimento de 2371 mm, a carga crítica global tem valor de 186 kN, enquanto que a carga crítica distorcional tem valor de 195 kN, com RGD com valor de 0.95, logo, este perfil tem chances de sofrer interação D-G. A Figura 7.52 mostra os modos de flambagem desse perfil.

Figura 7.52: Modos de flambagem global e distorcional – seção S4 apoiada com torção restringida



Fonte: O autor (2021)

Pode ser observado pela Figura 7.52 e em todas as análises realizados no perfil S4 com condição apoiada com torção restringida que mesmo tentando impedir que a torção ocorra, para esse perfil a flambagem global se manifesta na forma de flexo-torção.

A Tabela 7.18 mostram os perfis selecionados com possível interação D-G da seção S3 sem furos e com os furos utilizados na seção S4.

Tabela 7.18: Perfis selecionados com interação D-G seção S4 com condição apoiada com torção restringida

L (mm)	TIPO	t (mm)	PcrG (N)	PcrD (N)	RGD
1800	Sem furos	3	494630,0	511566,0	0,97
2000	Sem furos	2,5	335731,0	345346,0	0,97
2371	Sem furos	2	193927,0	212917,0	0,91
1817,92	20%	3	466472,0	470972,0	0,99
2055,4	20%	2,5	307429,0	315477,0	0,97
2371,2	20%	2	186509,0	194892,0	0,96
1837,68	30%	3	457428,0	460839,0	0,99
2015,52	30%	2,5	317720,0	311908,0	1,02
2311,92	30%	2	194929,0	192537,0	1,01
1817,92	40%	3	461386,0	454822,0	1,01
2055,4	40%	2,5	304561,0	303705,0	1,00
2371,2	40%	2	186193,0	186901,0	1,00
1877,2	50%	3	435821,0	441417,0	0,99
2074,8	50%	2,5	296716,0	298933,0	0,99
2371,2	50%	2	184674,0	181727,0	1,02

Fonte: O autor (2021)

Neste capítulo foram realizadas as análises lineares elásticas dos perfis, no caso das seções com furos, as análises foram realizadas no software ABAQUS, para os casos das seções sem furos, as análises foram realizadas nos softwares GBTUL e CUFSM e também no software ABAQUS.

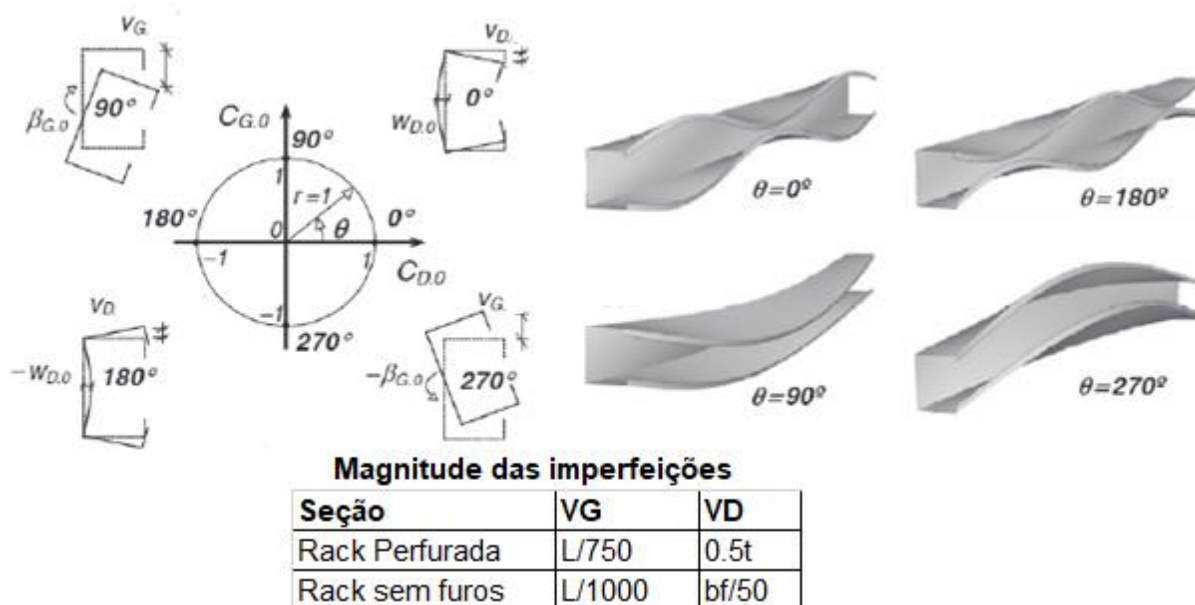
Inicialmente foram determinadas as curvas de flambagem dos perfis com e sem furos para três condições de apoio (apoiada, engastada e apoiada com torção restringida), e também para 5 valores diferentes de espessura. As curvas de flambagem foram determinadas com o intuito de selecionar colunas com interação D-G, sendo selecionadas colunas com RGD variando ente 0,8 e 1,2. Foram selecionadas 235 colunas com interação D-G, sendo que nestas colunas serão realizadas as análises não lineares.

Por fim, na análise linear também foram determinados os modos de flambagem global e distorcional que serão utilizados com imperfeição geométrica na análise não linear.

CAPÍTULO 8

ANÁLISE NÃO LINEAR

Neste capítulo serão realizadas as análises não lineares dos perfis com interação D-G das seções selecionadas no Capítulo 7. As análises serão realizadas no software ABAQUS com os procedimentos mostrados no Capítulo 5. As configurações deformadas dos modos de flambagem distorcional e global obtidos na análise linear serão combinados e utilizados como imperfeição geométrica na análise não linear. A combinação dos modos de flambagem será feita com o mesmo procedimento de Camotim e Dinis (2011) e mostrado na Figura 8.1. Neste procedimento, inicialmente a análise não linear será feita com modos de flambagem isolados, ou seja, não haverá combinação dos modos, e sim uma análise não linear com um modo distorcional como imperfeição e outra análise com um modo global como imperfeição. Os valores das magnitudes de imperfeição geométrica utilizados também estão mostrados na Figura 8.1. Após as análises com os modos isolados, os mesmos irão ser combinados variando o valor da magnitude da imperfeição geométrica. Os valores de magnitude dependem do ângulo definido para análise e do seu correspondente valor de seno ou cosseno. Neste estudo, as análises foram conduzidas a cada 15° , sendo que ângulos de 0° e 180° correspondem aos modos puros de flambagem distorcional e o ângulo de 90° corresponde ao modo global. Nos demais ângulos, ocorrerá a combinação desses modos de flambagem.

Figura 8.1: Metodologia para inserção das imperfeições geométricas para interação D-G

Fonte: Camotim e Dinis (2011), adaptado

Para estudo da interação D-G, para cada coluna selecionada foram realizadas 13 análises não lineares variando as imperfeições geométricas por meio das combinações dos modos de flambagem distorcional e global. Foram feitas análises em 235 colunas, resultando num total de 3055 análises não lineares realizadas. Em cada análise foram determinadas a carga de ruptura e o comportamento da seção por meio da determinação das curvas de equilíbrio e suas configurações deformadas para estudo do comportamento da interação D-G.

8.1 ANÁLISES NÃO LINEARES SEÇÃO S1

Neste tópico serão mostrados os resultados obtidos das análises não lineares da seção S1 com as condições apoiada, engastada e apoiada com torção restringida.

8.1.1 Análise não linear seção S1 com condição apoiada

As Tabelas 8.1 e 8.2 mostram as cargas de rupturas obtidas nos perfis S1 com e sem furos e com comprimento de 1800mm. Sendo que VG corresponde a magnitude da imperfeição referente ao modo global e Vd corresponde a magnitude da imperfeição referente ao modo distorcional.

Tabela 8.1 Carga de ruptura perfil sem furos, L=1800, t=2

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	199391,20	1,16	0,00
90	219508,00	0,00	1,80
180	199391,60	1,16	0,00
15	199960,80	1,12	0,47
30	201758,00	1,00	0,90
45	205008,00	0,82	1,27
60	209690,00	0,58	1,56
75	216238,00	0,30	1,74
105	216258,00	-0,30	1,74
120	209686,00	-0,58	1,56
135	205008,00	-0,82	1,27
150	201758,00	-1,00	0,90
165	199961,60	-1,12	0,47

Fonte: O autor (2021)

Tabela 8.2 Carga de ruptura perfil com furos, L=1800, t=2

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	161094,55	1,00	0,00
90	168081,04	0,00	2,40
180	160902,45	-1,00	0,00
15	161158,47	0,97	0,62
30	162494,16	0,87	1,20
45	164166,62	0,71	1,70
60	166460,43	0,50	2,08
75	168002,84	0,26	2,32
105	168024,26	-0,26	2,32
120	166197,78	-0,50	2,01
135	163988,29	-0,71	1,70
150	162329,26	-0,87	1,20
165	161352,10	-0,97	0,62

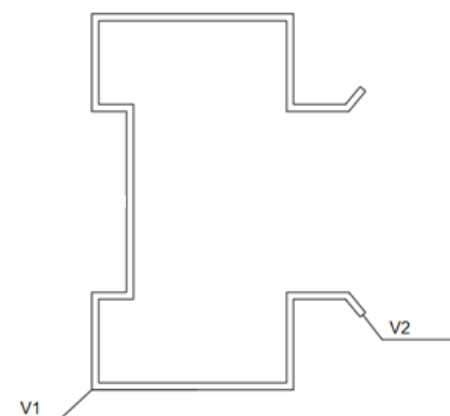
Fonte: O autor (2021)

Inicialmente podemos observar que a presença de furos reduz a capacidade resistente da seção. Além disso, é possível observar as diferenças nos resultados considerando como imperfeição apenas os modos puros de flambagem, no caso do perfil sem furos e utilizando apenas o modo distorcional como imperfeição, foi obtido um valor de carga de ruptura de aproximadamente 199 kN, e ao se utilizar apenas o modo global foi obtido um valor de carga de aproximadamente 220 kN. Em todos os perfis selecionados, os menores valores de carga de

ruptura ocorreram utilizando os modos puramente distorcionais (0° e 180°) e também a combinação com ângulo de 165° .

Para se analisar o comportamento da seção foram determinadas as curvas de equilíbrio do elemento, que consiste em uma curva de carga (N) por deslocamento (mm) em um ponto da seção. Para as seções analisadas, foram determinadas curvas em 2 pontos, o ponto V1 localizada na junção entre mesa e alma, e o ponto V2 localizado na extremidade da mesa, esses pontos são mostrados na Figura 8.2. Esses pontos também foram utilizados para determinar as curvas de equilíbrio para a seção S2.

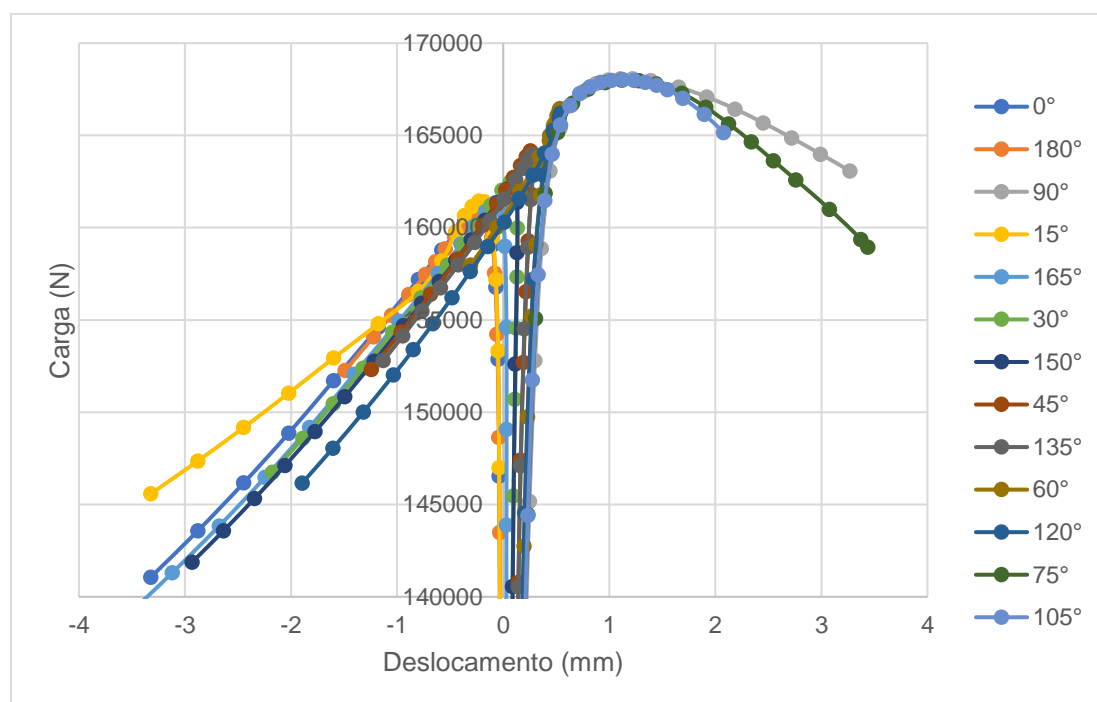
Figura 8.2 Pontos para determinação das curvas de equilíbrio para as seções S1 e S2



Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V1 da seção com 1800mm de comprimento, espessura de 2mm e com furos, está mostrada na Figura 8.3.

Figura 8.3 Curvas de equilíbrio, Seção S1, condição apoiada, L=1800mm, t=2mm, ponto V1

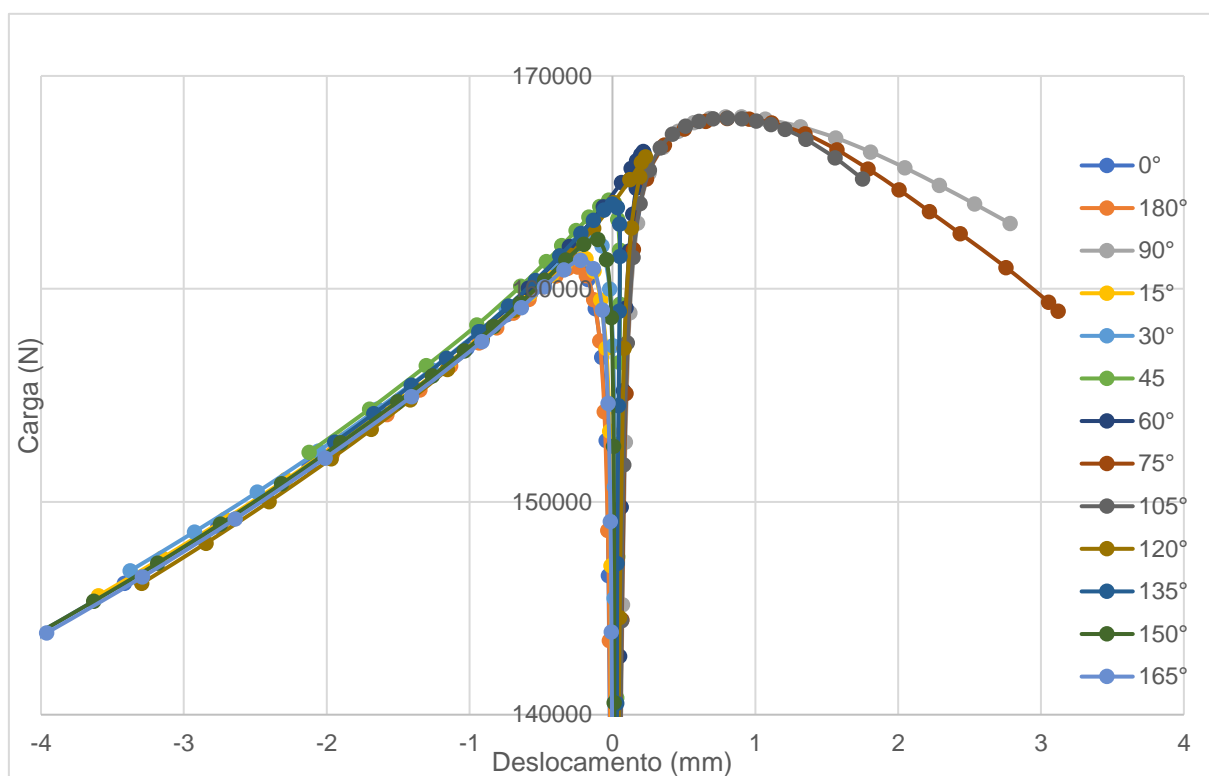


Fonte: O autor (2021)

Podemos observar pela Figura 8.3 que as curvas com modo puramente global (90°) e as combinações de 75° e 105° possuem comportamento diferente das demais curvas e uma carga de ruptura maior. Essas três curvas ter uma maior influência da flambagem global.

As curvas de equilíbrio para o ponto V2 da seção com 1800mm de comprimento, espessura de 2mm e com furos, está mostrada na Figura 8.4.

Figura 8.4 Curvas de equilíbrio, Seção S1, condição apoiada, L=1800mm, t=2mm, ponto V2

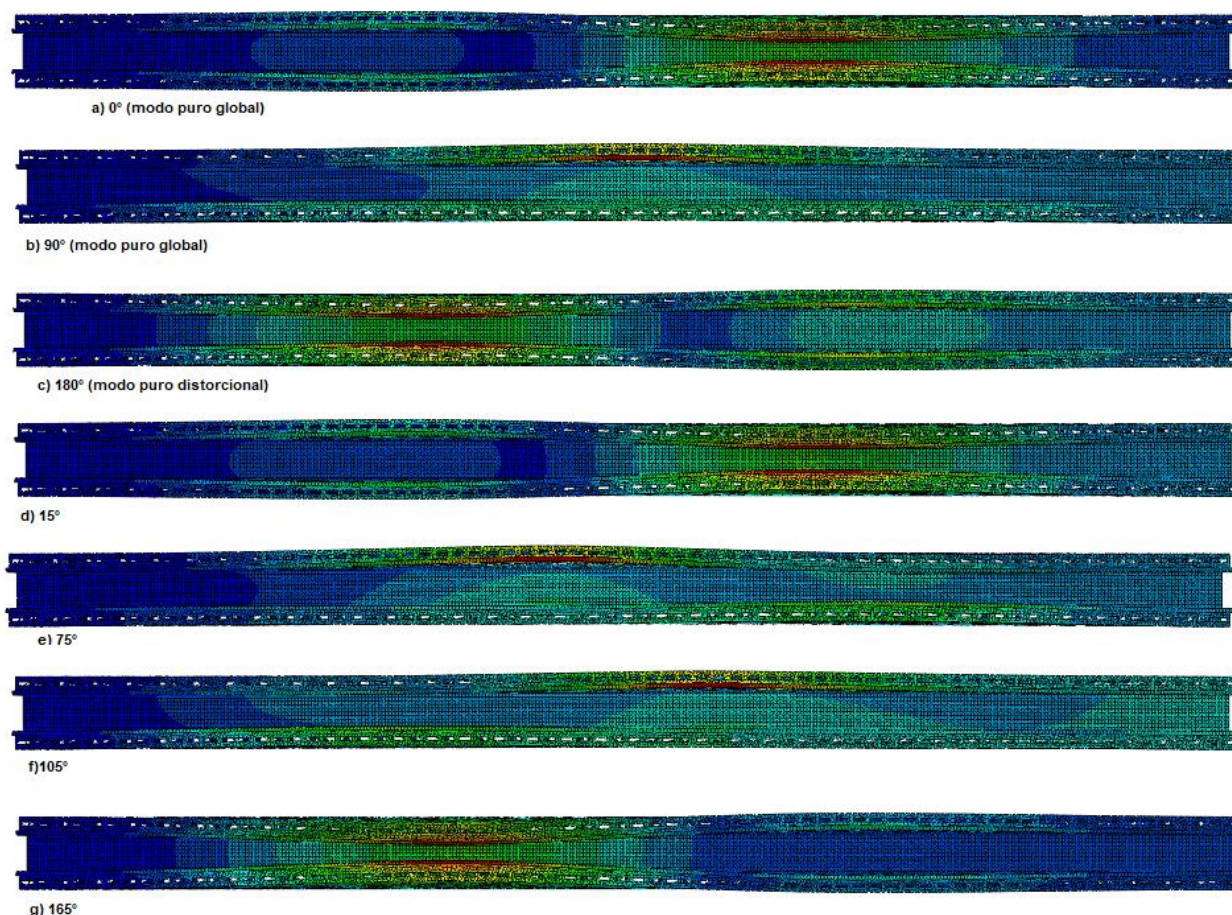


Fonte: O autor (2021)

Na Figura 8.4 também é possível observar o diferente comportamento das seções com modo puramente global (90°) e os modos de 75° e 105°.

A Figura 8.5 mostra as configurações deformadas das análises não lineares conduzidas para os ângulos de 0°, 90°, 180°, 15°, 75°, 105° e 165° da seção com furos com comprimento de 1800mm, e espessura de 2mm.

Figura 8.5 Configurações deformadas, Seção S1, condição apoiada, $L=1800\text{mm}$,
 $t=2\text{mm}$



Fonte: O autor (2021)

A partir da Figura 8.5 é possível observar que os modos com ângulos de 90° , 75° e 105° tem forte influência da flambagem global, e possuem curvas de equilíbrio com comportamento diferente dos demais ângulos de análise, como pode ser constatado pelas Figuras 8.3 e 8.4. Além disso, como pode ser visto pela Figura 8.5, nas outras análises não lineares, a flambagem distorcional é predominante.

Diferentemente deste trabalho, nos trabalhos de Camotim e Dinis (2011a), Camotim e Dinis (2011b) e Martins, Camotim e Dinis (2018) sobre interação D-G em perfis sem furos com condição apoiada, a menor carga de ruptura ocorreu ao se utilizar o modo puro de flambagem global como imperfeição.

8.1.2 Análise não linear seção S1 com condição engastada

As Tabelas 8.3 e 8.4 mostram as cargas de rupturas obtidas nos perfis S1 com e sem furos, com comprimento de 3000mm, espessura de 2,5mm e condição engastada.

Tabela 8.3 Carga de ruptura perfil sem furos, L=3000, t=2,5

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	262750,00	1,16	0,00
90	240790,00	0,00	3,00
180	251326,00	1,16	0,00
270	240790,00	0,00	3,00
15	253124,00	1,12	0,78
30	246348,00	1,00	1,50
45	241948,00	0,82	2,12
60	240324,00	0,58	2,60
75	238794,00	0,30	2,90
105	243952,00	-0,30	2,90
120	245112,00	-0,58	2,60
135	251044,80	-0,82	2,12
150	253414,00	-1,00	1,50
165	251132,00	-1,12	0,78

Fonte: O autor (2021)

Tabela 8.4 Carga de ruptura perfil com furos, L=3000, t=2,5

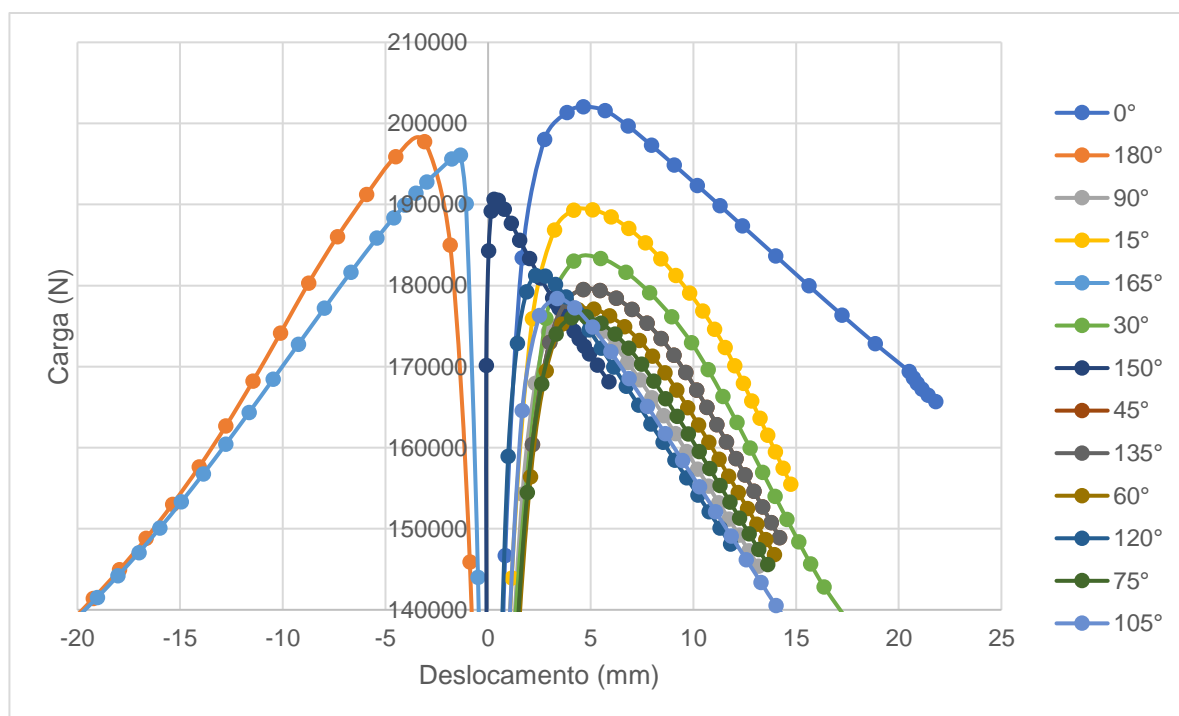
θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	202044,90	1,25	0,00
90	176577,00	0,00	4,00
180	197736,30	-1,25	0,00
15	189348,30	1,21	1,04
30	183342,90	1,08	2,00
45	179520,90	0,88	2,83
60	177084,90	0,63	3,46
75	176161,80	0,32	3,86
105	178392,60	-0,32	3,86
120	181152,60	-0,63	3,46
135	179397,00	-0,88	2,83
150	190629,60	-1,08	2,00
165	196085,10	-1,21	1,04

Fonte: O autor (2021)

Na condição engastada também podemos observar que a presença de furos reduz a capacidade resistente da seção. Nesta condição, para todas as análises conduzidas a carga de ruptura são menores utilizando como imperfeição apenas o modo de flambagem global (0°) e para a combinação dos modos global e distorcional de 75° . Também é possível notar que a diferenças nas cargas de ruptura utilizando apenas os modos puros, ao se utilizar como imperfeição apenas o modo distorcional, a carga de ruptura obtida foi de aproximadamente 198 kN. Ao se utilizar apenas o modo global como imperfeição, foi obtido uma carga de 177 kN.

As curvas de equilíbrio para o ponto V1 da seção com 3000 de comprimento, espessura de 2mm, condição engastada e com furos, está mostrada na Figura 8.6.

Figura 8.6 Curvas de equilíbrio, Seção S1, condição engastada, $L=3000\text{mm}$, $t=2,5\text{mm}$, ponto V1

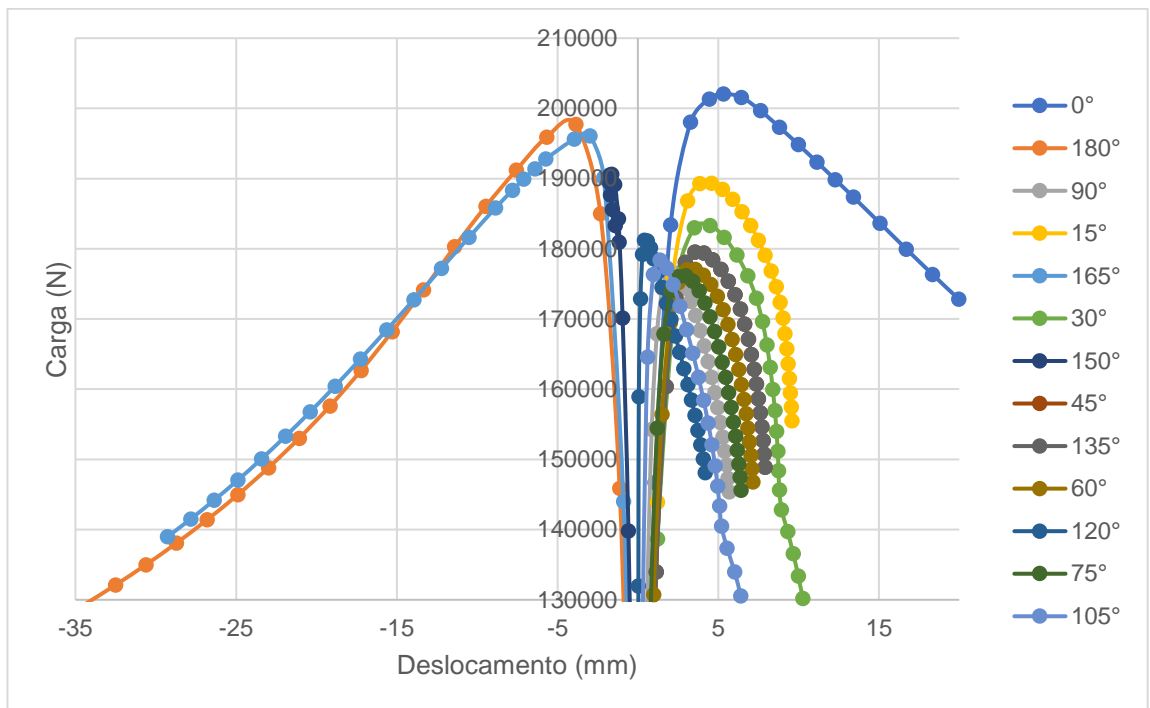


Fonte: O autor (2021)

Podemos observar pela Figura 8.6 que as curvas com modo puramente distorcional (0° e 180°) possuem uma curva de ruptura maior. Além disso, as curvas de 180° e 165° possuem um comportamento diferente.

As curvas de equilíbrio para o ponto V2 da seção com 3000mm de comprimento, espessura de 2,5mm, condição engastada e com furos, está mostrada na Figura 8.7.

Figura 8.7 Curvas de equilíbrio, Seção S1, condição engastada, L=3000, t=2,5mm, ponto V2

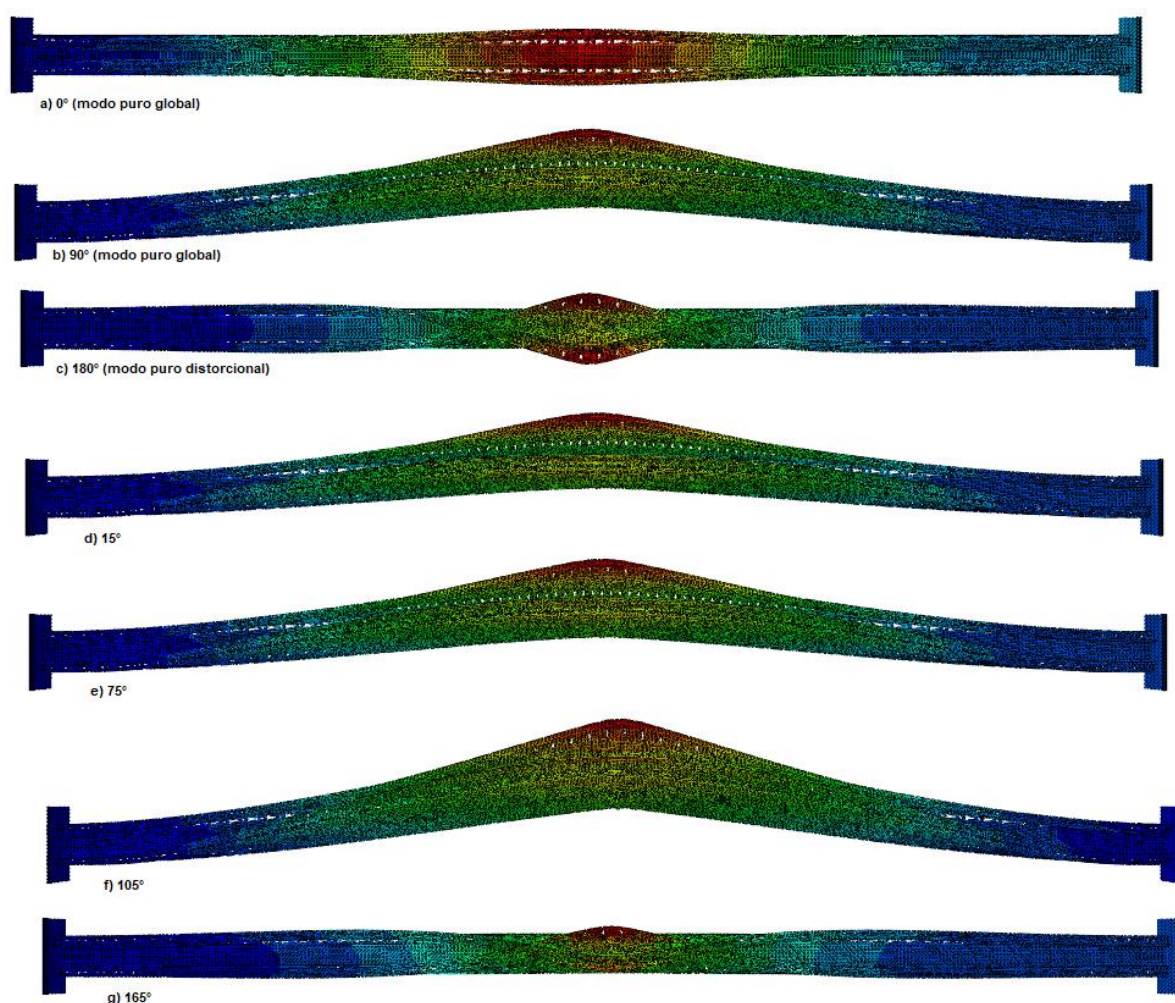


Fonte: O autor (2021)

Na Figura 8.7 também é possível observar o diferente comportamento das seções com 0° e 180°.

A Figura 8.8 mostra as configurações deformadas das análises não lineares conduzidas para os ângulos de 0°, 90°, 180°, 15°, 75°, 105° e 165° para a seção de 3000mm e espessura de 2,5mm.

Figura 8.8 Configurações deformadas, Seção S1, condição engastada, $L=3000\text{mm}$,
 $t=2,5\text{mm}$



Fonte: O autor (2021)

Observando a Figura 8.8 podemos confirmar os diferentes comportamentos das seções com ângulos de 180° e 165° observados nas curvas de equilíbrio das Figuras 8.6 e 8.5. Essas duas seções apresentaram a flambagem distorcional como dominante em suas rupturas. Nas outras análises pode ser observado a maior influência da flambagem global.

Nos trabalhos de Camotim et al. (2018) e Martins, Camotim e Dinis (2018) sobre interação D-G em perfis sem furos com condição engastada realizados com a mesma metodologia deste trabalho, a menor carga de ruptura também ocorreu ao se utilizar o modo puro de flambagem global como imperfeição, de acordo com os autores, isso ocorre devido a maior reserva de energia pós flambagem do modo distorcional.

8.1.3 Análise não linear seção S1 com condição apoiada com torção restringida

As Tabelas 8.5 e 8.6 mostram as cargas de rupturas obtidas nos perfis S1 com e sem furos, com comprimento de 1400mm, espessura de 3mm e condição apoiada com torção restringida.

Tabela 8.5 Carga de ruptura perfil sem furos, L=1400, t=3

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	294514,92	1,16	0,00
90	307510,02	0,00	1,40
180	294459,84	1,16	0,00
15	303089,58	1,12	0,36
30	323971,92	1,00	0,70
45	305943,48	0,82	0,99
60	305709,12	0,58	1,21
75	304892,10	0,30	1,35
105	304952,58	-0,30	1,35
120	305785,80	-0,58	1,21
135	305878,68	-0,82	0,99
150	307262,70	-1,00	0,70
165	303067,98	-1,12	0,36

Fonte: O autor (2021)

Tabela 8.6 Carga de ruptura perfil com furos, L=1400, t=3

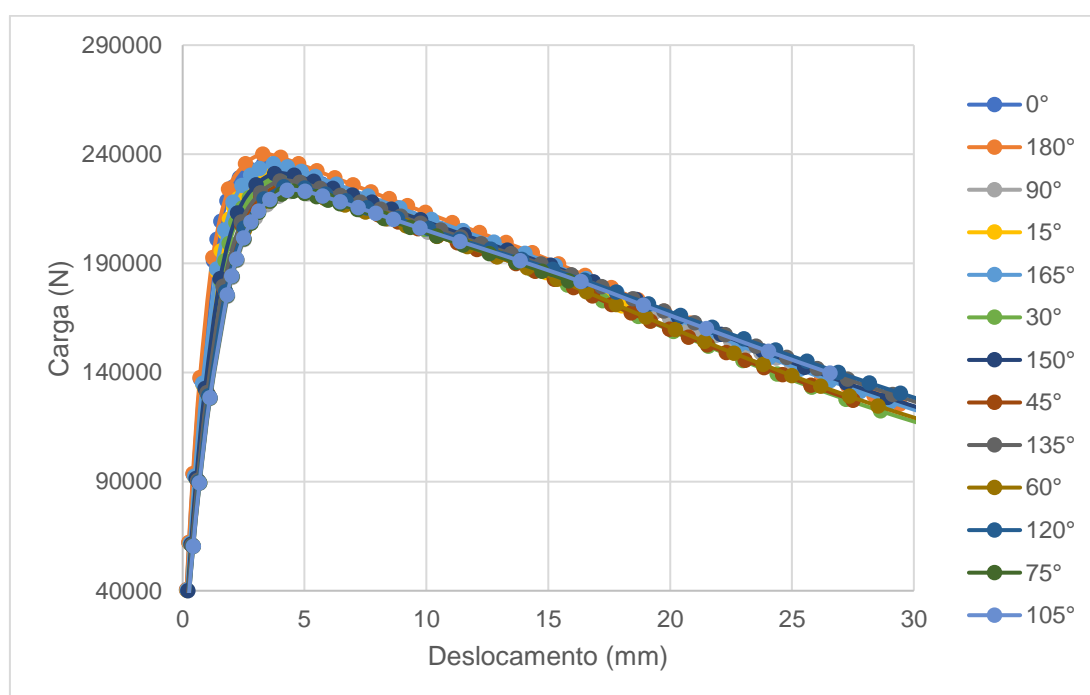
θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	235426,95	1,50	0,00
90	221890,50	0,00	1,87
180	240036,75	-1,50	0,00
15	231601,95	1,45	0,48
30	228109,50	1,30	0,93
45	225486,90	1,06	1,32
60	223605,00	0,75	1,62
75	222979,05	0,39	1,80
105	223470,45	-0,39	1,80
120	225112,95	-0,75	1,62
135	227714,85	-1,06	1,32
150	231150,15	-1,30	0,93
165	235603,80	-1,45	0,48

Fonte: O autor (2021)

Na condição apoiada com torção restringida também podemos observar que a presença de furos reduz a capacidade resistente da seção. Nesta condição, diferente dos outros tipos de condição de apoio houve divergências nos resultados obtidos nos perfis com e sem furos. No caso de perfis sem furos, a menor carga de ruptura ocorreu considerando como imperfeição apenas o modo distorcional, enquanto que nos perfis com furos, a menor carga de ruptura ocorreu na utilização do modo global como imperfeição.

As curvas de equilíbrio para o ponto V1 da seção com 1400 de comprimento, condição apoiada com torção restringida, espessura de 3mm e com furos, está mostrada na Figura 8.9.

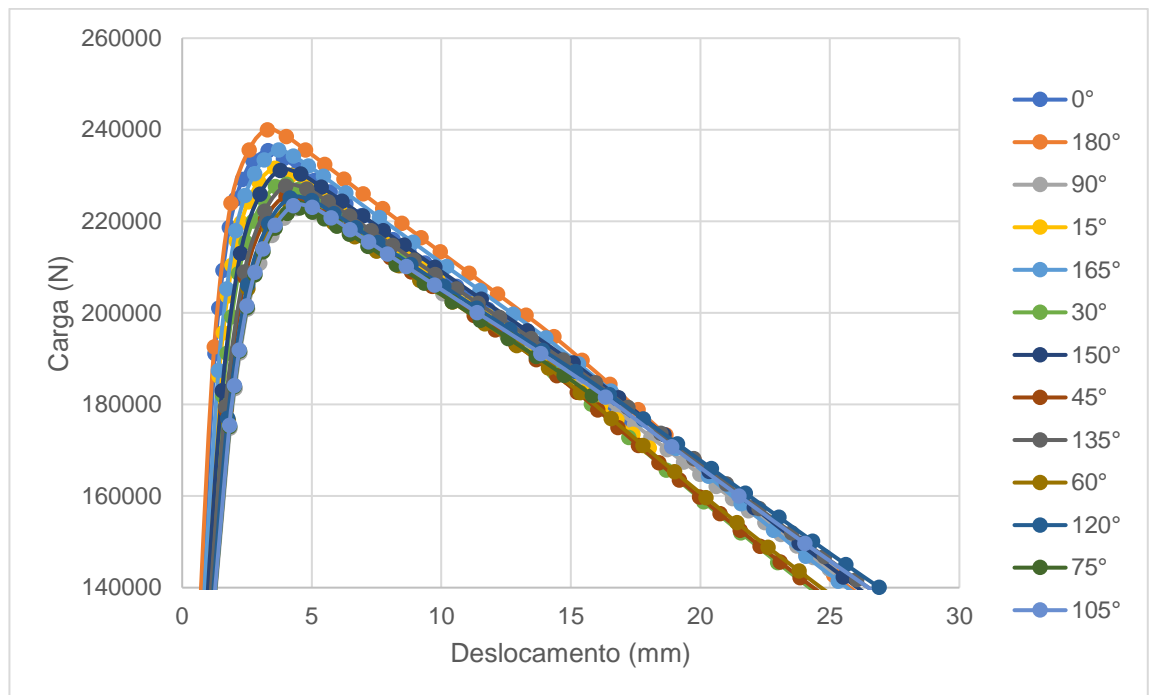
Figura 8.9 Curvas de equilíbrio, Seção S1, condição apoiada com torção restringida, L=1400mm, t=3, ponto V1



Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V2 da seção com 1400mm de comprimento, condição apoiada com torção restringida, espessura de 3mm e com furos, está mostrada na Figura 8.10.

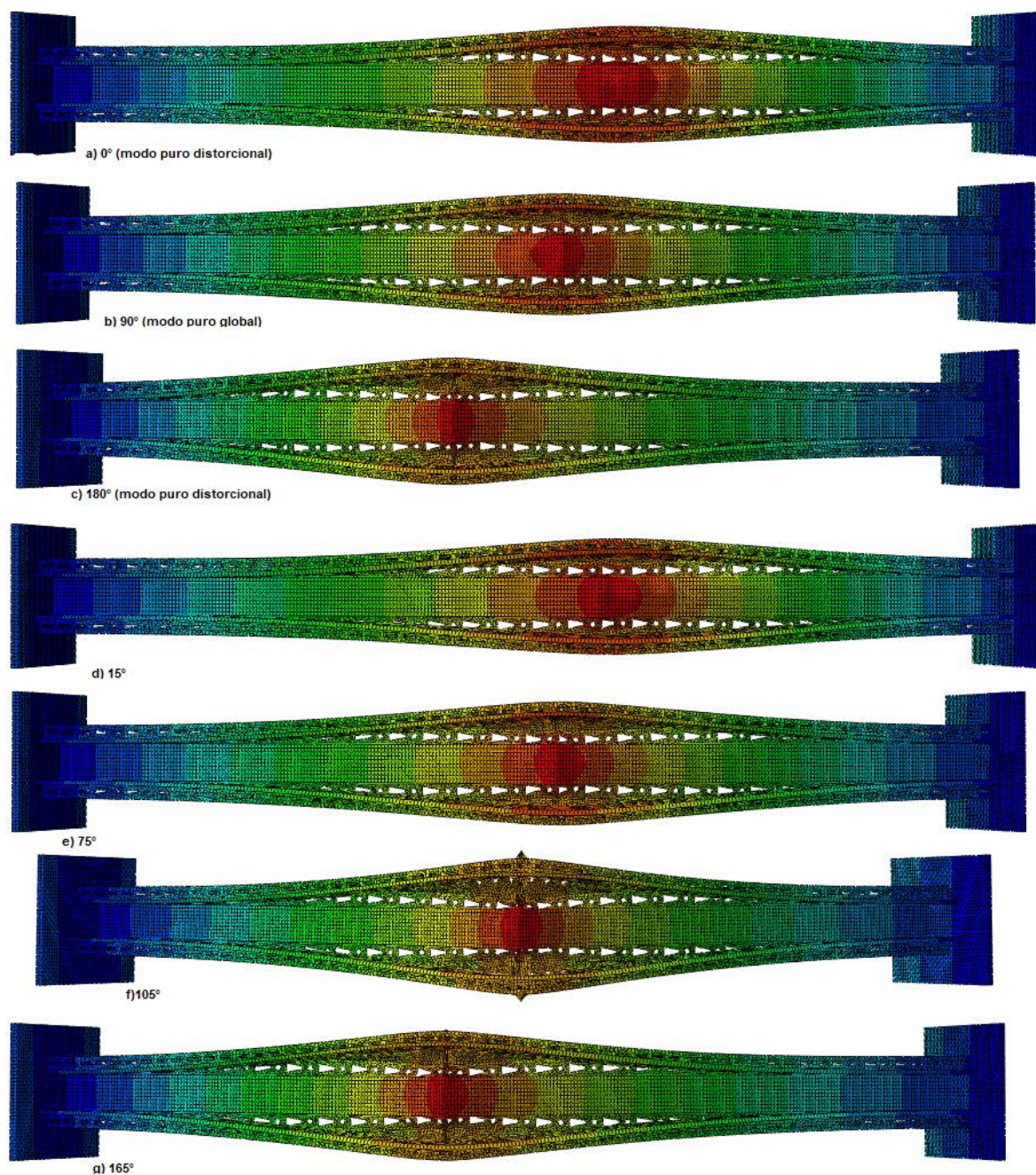
Figura 8.10 Curvas de equilíbrio, Seção S1, condição apoiada com torção restringida, L=1400mm, t=3mm, ponto V2



Fonte: O autor (2021)

Podemos observar pelas Figura 8.9 e 8.10 que as curvas tiveram um comportamento parecido. A Figura 8.11 mostra as configurações deformadas das análises não lineares conduzidas para os ângulos de 0°, 90°, 180°, 15°, 75°, 105° e 165° da seção com 1400mm e espessura de 3mm.

Figura 8.11 Configurações deformadas, Seção S1, condição apoiada com torção restringida, $L=1400\text{mm}$, $t=3\text{mm}$.



Fonte: O autor (2021)

Pela Figura 8.11 também é possível observar configurações deformadas parecidas em todas as análises, confirmando o que foi visto nas curvas de equilíbrio nas Figuras 8.9 e 8.10.

8.2 ANÁLISES NÃO LINEARES SEÇÃO S2

Neste tópico serão mostrados os resultados obtidos das análises não lineares da seção S2 com as condições apoiada, engastada e apoiada com torção restringida.

8.2.1 Análise não linear seção S2 com condição apoiada

As Tabelas 8.7 e 8.8 mostram as cargas de rupturas obtidas nos perfis S2 com e sem furos e com comprimento de 1300mm, espessura de 2mm e condição apoiada.

Tabela 8.7 Carga de ruptura perfil sem furos, L=1300, t=2

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	188631,11	1,16	0,00
90	203121,04	0,00	1,30
180	188630,90	1,16	0,00
15	189078,96	1,12	0,34
30	190657,49	1,00	0,65
45	193203,73	0,82	0,92
60	196905,39	0,58	1,13
75	201220,44	0,30	1,26
105	201221,30	-0,30	1,26
120	196905,60	-0,58	1,13
135	193230,61	-0,82	0,92
150	190657,70	-1,00	0,65
165	189078,96	-1,12	0,34

Fonte: O autor (2021)

Tabela 8.8 Carga de ruptura perfil com furos, L=1300, t=2

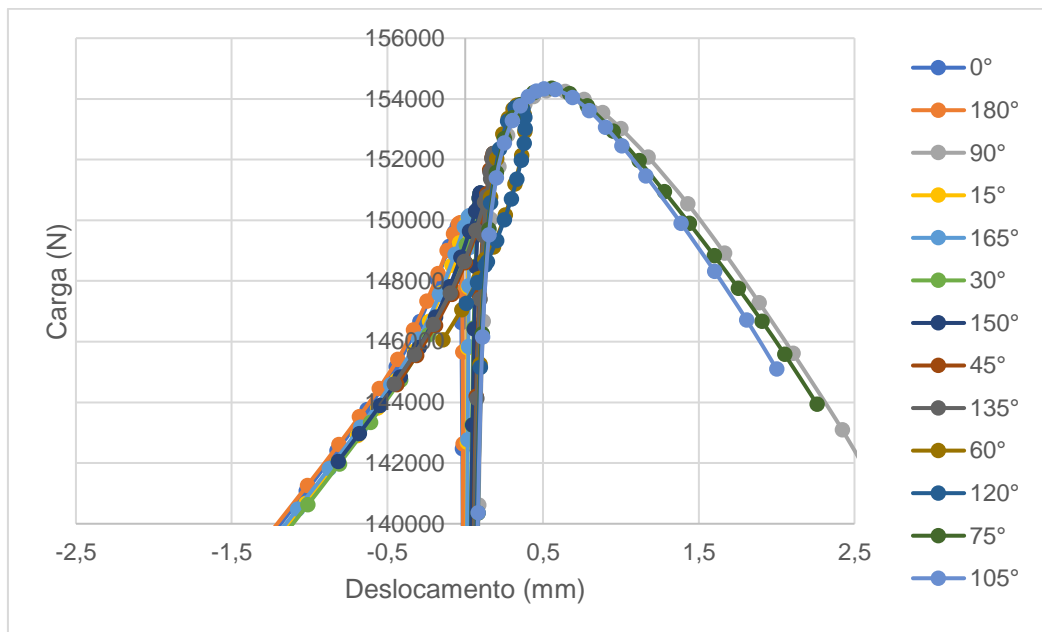
θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	149833,98	1,00	0,00
90	154267,92	0,00	2,13
180	149924,88	-1,00	0,00
15	150112,08	0,97	0,55
30	150894,90	0,87	1,07
45	152202,78	0,71	1,51
60	153793,80	0,50	1,85
75	154355,94	0,26	2,06
105	154332,00	-0,26	2,06
120	153800,64	-0,50	1,85
135	152201,52	-0,71	1,51
150	150907,32	-0,87	1,07
165	150153,30	-0,97	0,55

Fonte: O autor (2021)

Ao se analisar as Tabelas 8.7 e 8.8, novamente na condição apoiada, os menores valores de carga de ruptura ocorrem para os modos distorcionais e para a combinação distorcional e global de 165°.

As curvas de equilíbrio para o ponto V1 da seção com 1300mm de comprimento, espessura de 2mm e com furos, está mostrada na Figura 8.12.

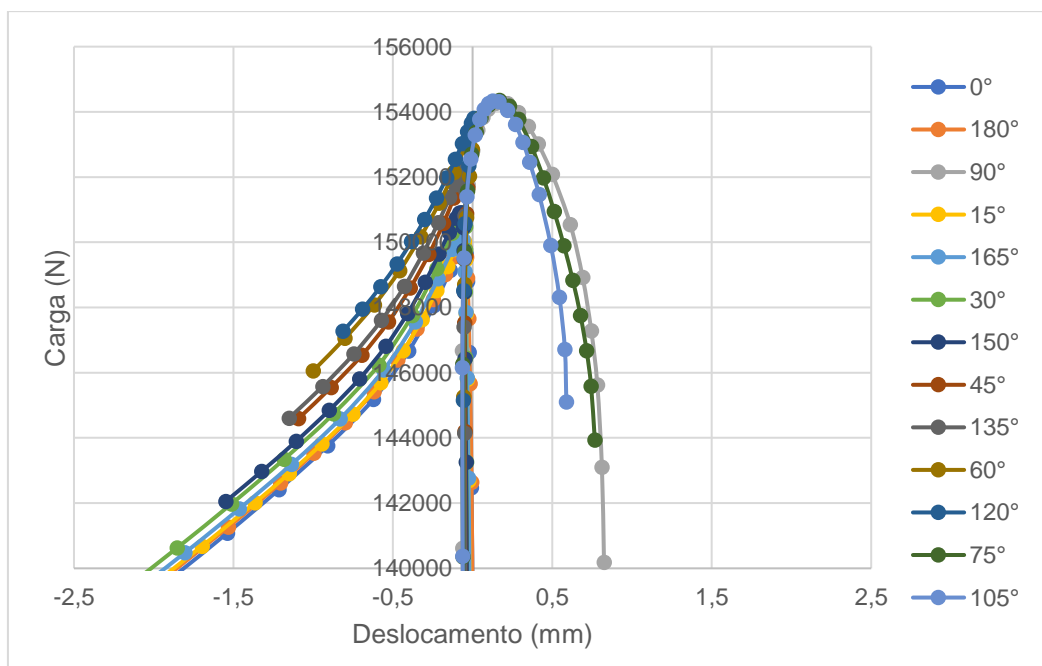
Figura 8.12 Curvas de equilíbrio, Seção S2, condição apoiada, $L=1300\text{mm}$, $t=2\text{mm}$, ponto V1



Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V2 da seção com 1300mm de comprimento, $t=2\text{mm}$ e com furos, está mostrada na Figura 8.13.

Figura 8.13 Curvas de equilíbrio, Seção S2, $L=1300\text{mm}$, $t=2\text{mm}$, ponto V2

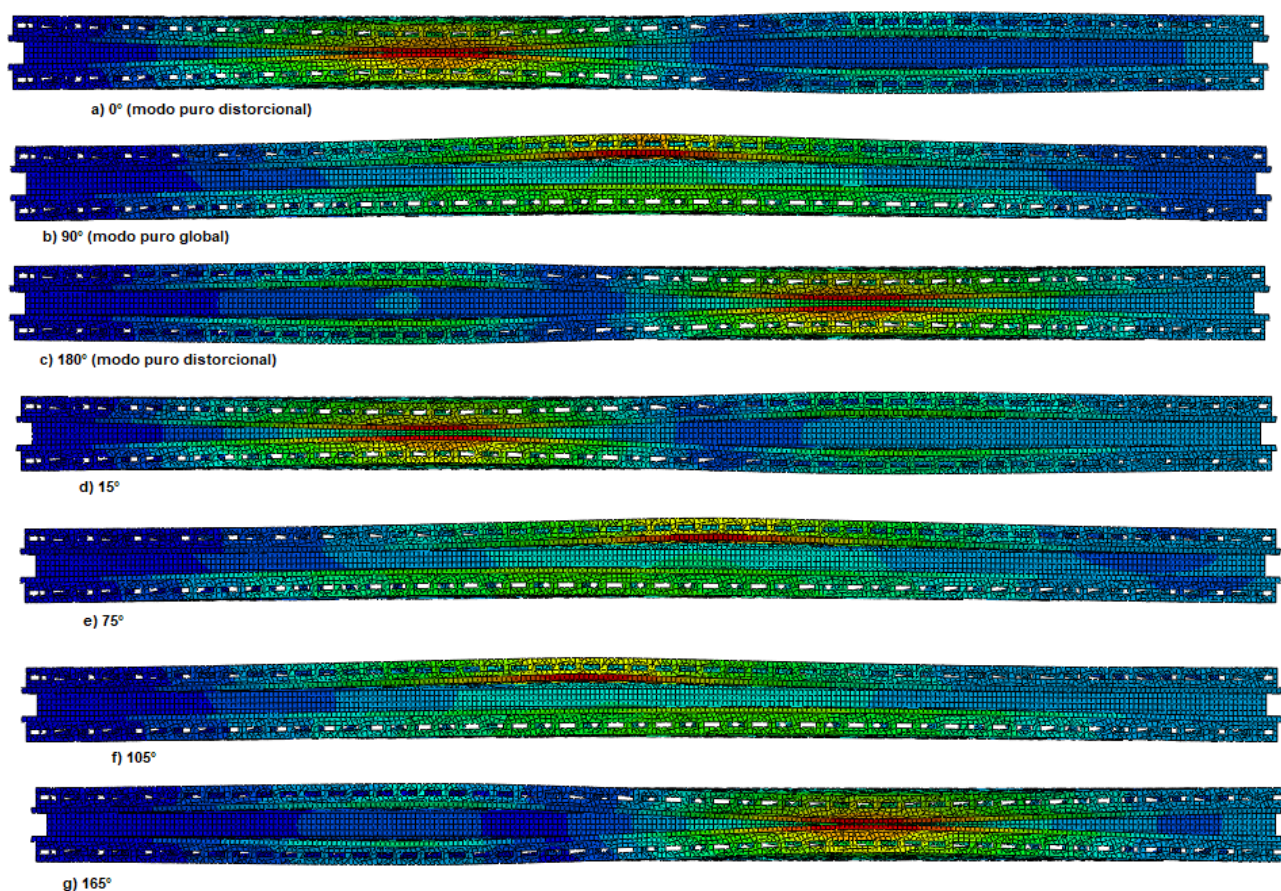


Fonte: O autor (2021)

Ao se analisar as Figuras 8.12 e 8.13 podemos observar o diferente comportamento das seções com os modos globais mais dominantes, que são as curvas de 90° , 75° e 105° . Além do comportamento diferente, essas curvas apresentaram uma maior carga de ruptura.

A Figura 8.14 mostra as configurações deformadas das análises não lineares conduzidas para os ângulos de 0° , 90° , 180° , 15° , 75° , 105° e 165° para a seção com 1300mm de comprimento e espessura de 2mm.

Figura 8.14 Configurações deformadas, Seção S2, condição apoiada, $L=1300\text{mm}$,
 $t=2\text{mm}$



Fonte: O autor (2021)

Ao se observar a Figura 8.14, podemos verificar que as análises com os ângulos de 90° , 75° e 105° possuem a flambagem global como modo de ruptura dominante, confirmando os diferentes comportamentos das curvas de equilíbrio observado nas Figuras 8.12 e 8.13. As demais configurações deformadas mostram a flambagem distorcional como de ruptura dominante.

8.2.2 Análise não linear seção S2 com condição engastada

As Tabelas 8.9 e 8.10 mostram as cargas de rupturas obtidas nos perfis S2 com e sem furos e com comprimento de 2100mm, espessura de 2,5mm e condição engastada.

Tabela 8.9 Carga de ruptura perfil sem furos, L=2100, t=2,5

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	239894,69	1,16	0,00
90	234243,66	0,00	2,10
180	234229,31	1,16	0,00
15	237165,32	1,12	0,54
30	233847,19	1,00	1,05
45	231422,45	0,82	1,48
60	231178,50	0,58	1,82
75	230571,70	0,30	2,03
105	236524,49	-0,30	2,03
120	237672,08	-0,58	1,82
135	238418,69	-0,82	1,48
150	236670,86	-1,00	1,05
165	234884,49	-1,12	0,54

Fonte: O autor (2021)

Tabela 8.10 Carga de ruptura perfil com furos, L=2100, t=2,5

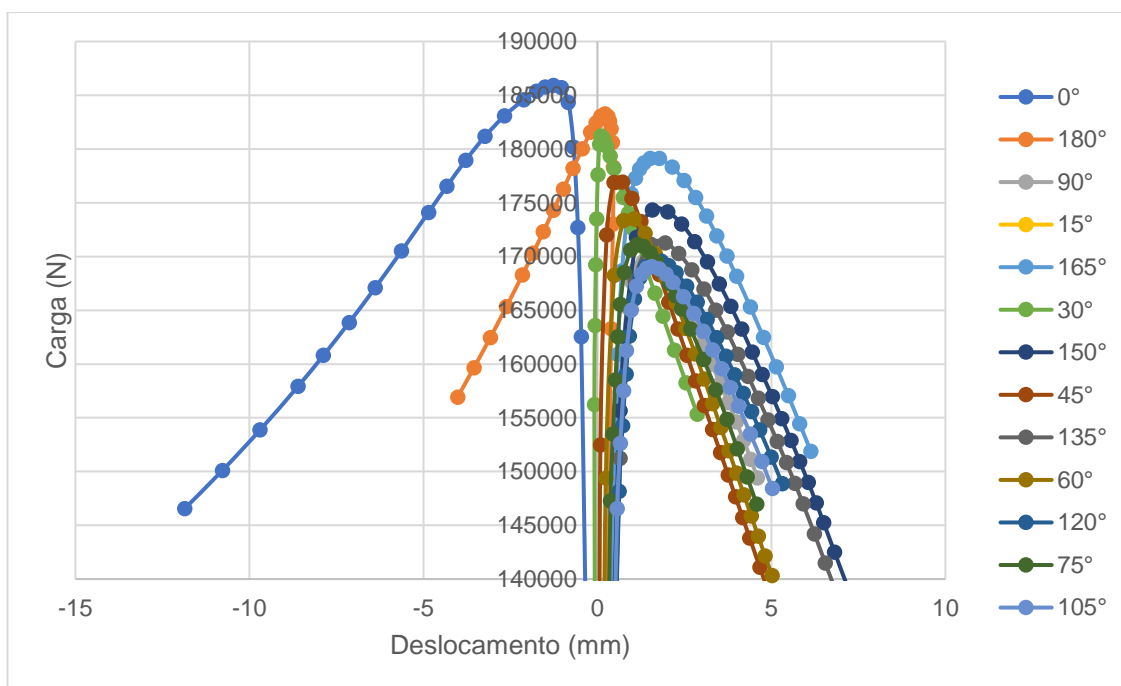
θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	185927,010	1,25	0,00
90	169532,445	0,00	2,80
180	183268,450	-1,25	0,00
15	185044,955	1,21	0,72
30	181204,180	1,08	1,40
45	176928,240	0,88	1,98
60	173511,240	0,63	2,42
75	171120,680	0,32	2,70
105	169074,500	-0,32	2,70
120	169643,330	-0,63	2,42
135	171275,450	-0,88	1,98
150	174342,710	-1,08	1,40
165	179121,150	-1,21	0,72

Fonte: O autor (2021)

Ao se analisar as Tabelas 8.9 e 8.10, novamente na condição engastada, os menores valores de carga de ruptura ocorrem para o modo global e para a combinação distorcional e global de 75° .

As curvas de equilíbrio para o ponto V1 da seção com 2100 de comprimento, condição engastada e com furos, está mostrada na Figura 8.15.

Figura 8.15 Curvas de equilíbrio, Seção S2, condição engastada, $L=2100\text{mm}$, $t=2,5\text{mm}$, ponto V1

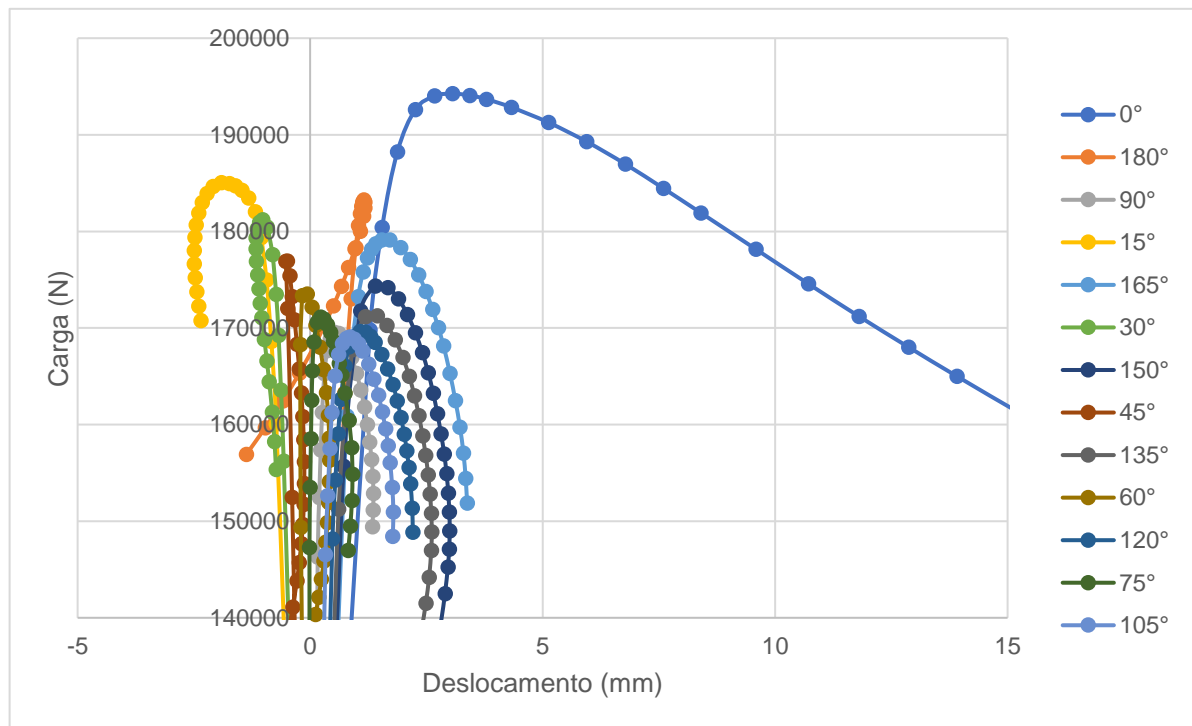


Fonte: O autor (2021)

Podemos observar pela Figura 8.15 que as curvas com modo puramente distorcional (0° e 180°) possuem uma carga de ruptura maior e um comportamento diferente que as demais curvas

As curvas de equilíbrio para o ponto V2 da seção com 2100mm de comprimento, condição engastada e com furos, está mostrada na Figura 8.16.

Figura 8.16 Curvas de equilíbrio, Seção S2, condição engastada ponto, $L=2100\text{mm}$, $t=2,5\text{mm}$, Ponto V2

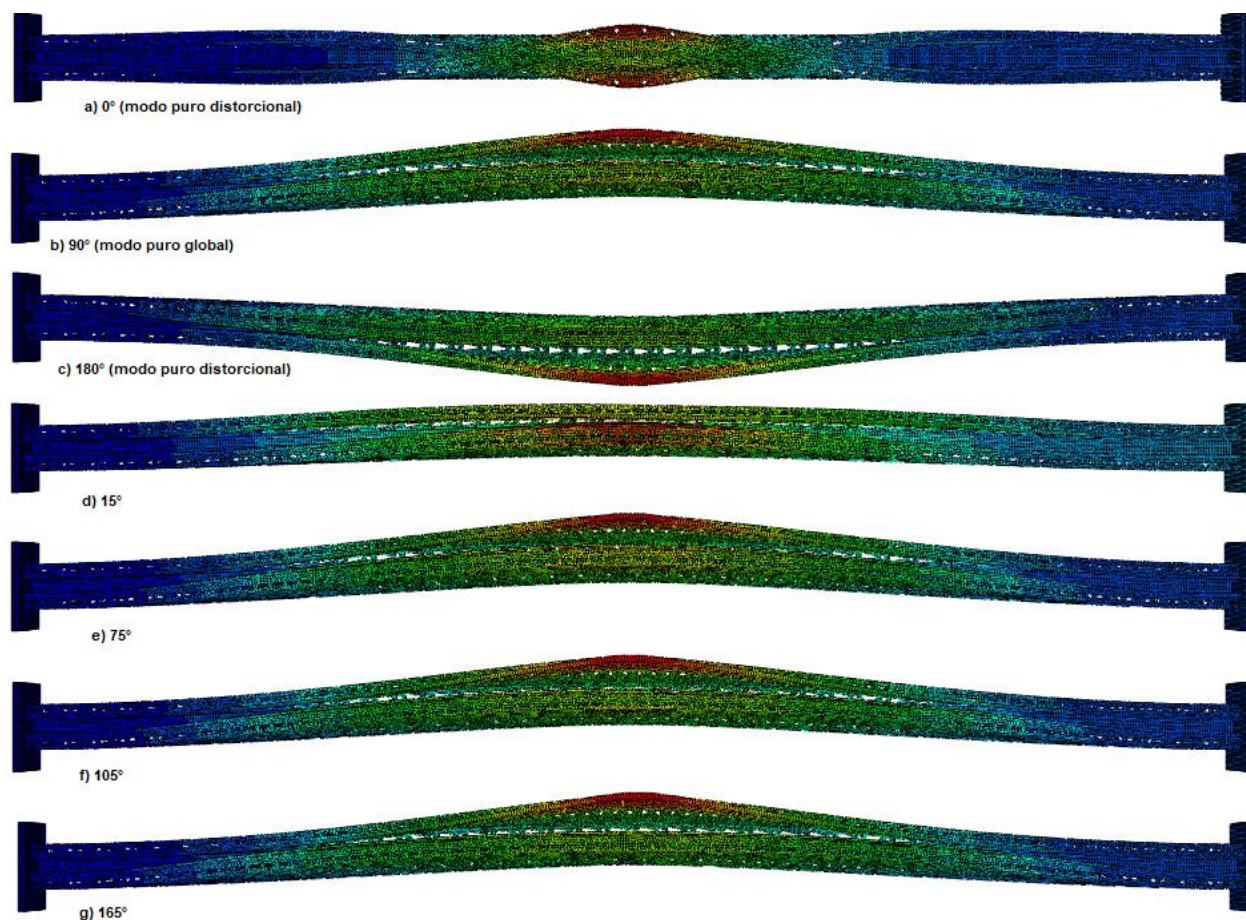


Fonte: O autor (2021)

A Figura 8.17 mostra as configurações deformadas das análises não lineares conduzidas para os ângulos de 0° , 90° , 180° , 15° , 75° , 105° e 165° para a seção com 2100mm de comprimento e espessura de 2.5mm.

Figura 8.17 Configurações deformadas, Seção S2, condição engastada, $L=2100\text{mm}$,

$$t=2,5$$



Fonte: O autor (2021)

Na Figura 8.17, podemos observar para a análise conduzida para o ângulo de 0° , o modo de ruptura é claramente conduzido pela flambagem distorcional. No entanto, para a outra análise com um modo puro de flambagem distorcional, que é a análise de 180° , podemos observar a influência do modo distorcional e global na ruptura. Nas demais análises, o modo global é predominante.

8.2.3 Análise não linear seção S2 com condição apoiada com torção restringida

As Tabelas 8.11 e 8.12 mostram as cargas de rupturas obtidas nos perfis S2 com e sem furos e com comprimento de 1200mm , espessura de 3mm e condição apoiada com torção restringida.

Tabela 8.11 Carga de ruptura perfil sem furos, L=1200, t=3

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	282209,92	1,16	0,00
90	295653,12	0,00	1,20
180	282730,24	1,16	0,00
15	287056,00	1,12	0,31
30	293559,04	1,00	0,60
45	296225,28	0,82	0,85
60	295084,80	0,58	1,04
75	295134,08	0,30	1,16
105	295360,64	-0,30	1,16
120	295120,64	-0,58	1,04
135	296289,92	-0,82	0,85
150	293650,56	-1,00	0,60
165	287376,64	-1,12	0,31

Fonte: O autor (2021)

Tabela 8.12 Carga de ruptura perfil com furos, L=1200, t=3

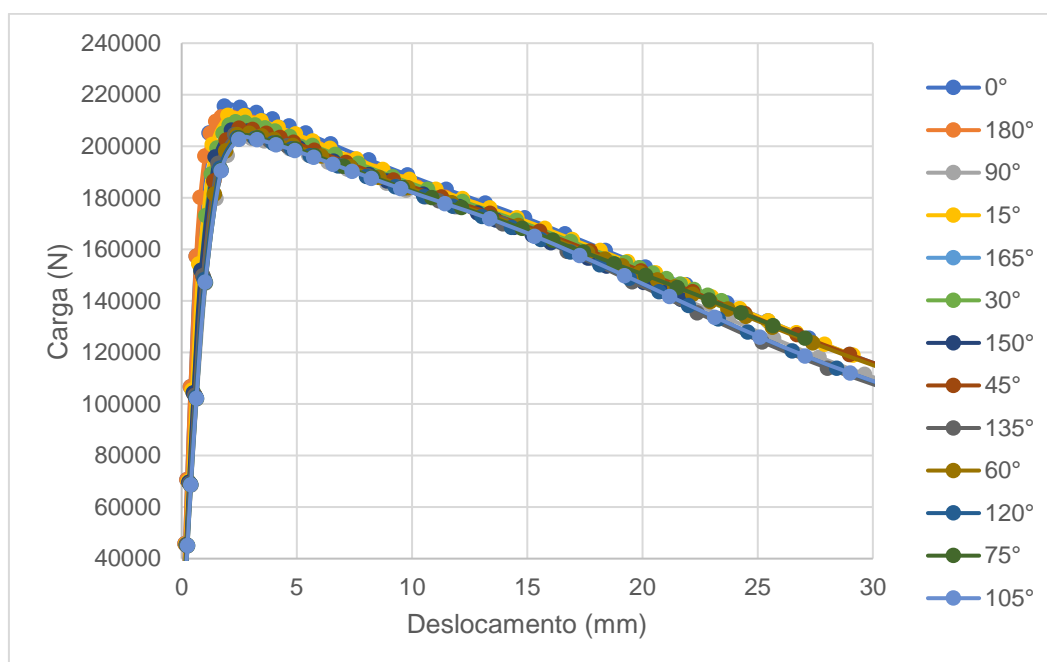
θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	215649,93	1,50	0,00
90	203102,40	0,00	1,60
180	211546,47	-1,50	0,00
15	212099,31	1,45	0,41
30	209537,07	1,30	0,80
45	207058,98	1,06	1,13
60	205101,60	0,75	1,39
75	203411,97	0,38	1,55
105	202767,84	-0,38	1,55
120	203357,40	-0,75	1,39
135	204548,25	-1,06	1,13
150	206375,07	-1,30	0,80
165	208723,11	-1,45	0,41

Fonte: O autor (2021)

Ao se analisar as Tabelas 8.11 e 8.12, novamente para o caso da condição apoiada com torção restringida, para os perfis sem furos, a menor carga de ruptura ocorreu para os modos distorcionais, enquanto que para os perfis com furos, a menor carga de ruptura ocorreu para o modo puramente global.

As curvas de equilíbrio para o ponto V1 da seção com 1200 de comprimento, espessura de 2mm, condição apoiada com torção restringida e com furos, está mostrada na Figura 8.18

Figura 8.18 Curvas de equilíbrio, Seção S2, condição apoiada com torção restringida, L=1200mm, t=2mm, ponto V1

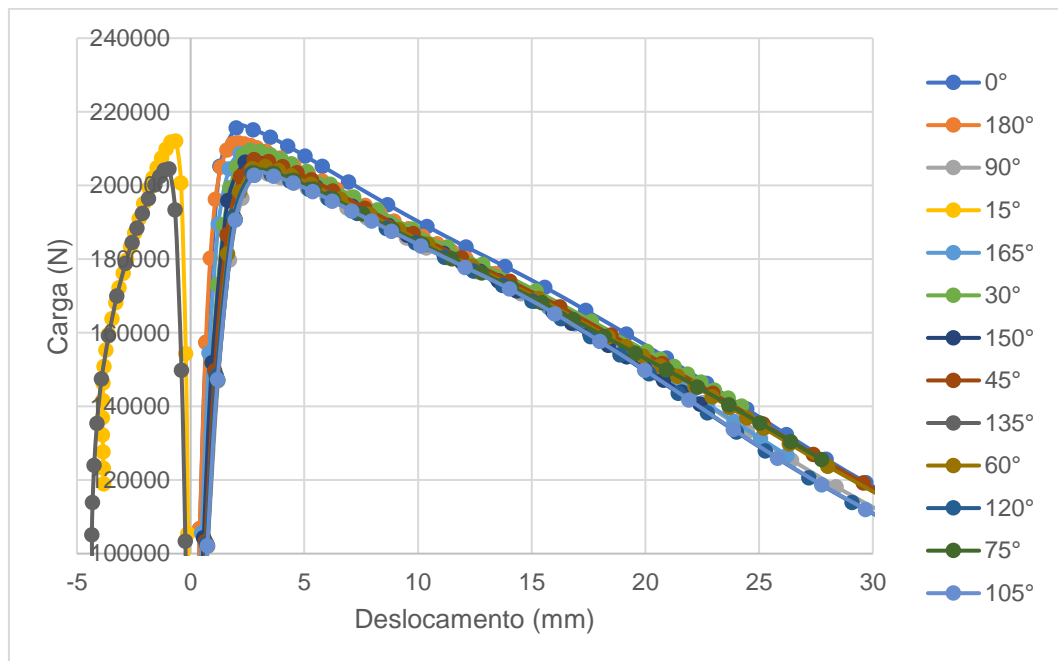


Fonte: O autor (2021)

Novamente na condição apoiada com torção restringida, podemos observar uma alta semelhança no comportamento das curvas de equilíbrio.

As curvas de equilíbrio para o ponto V2 da seção com 1200mm de comprimento, condição apoiada com torção restringida e com furos, está mostrada na Figura 8.19.

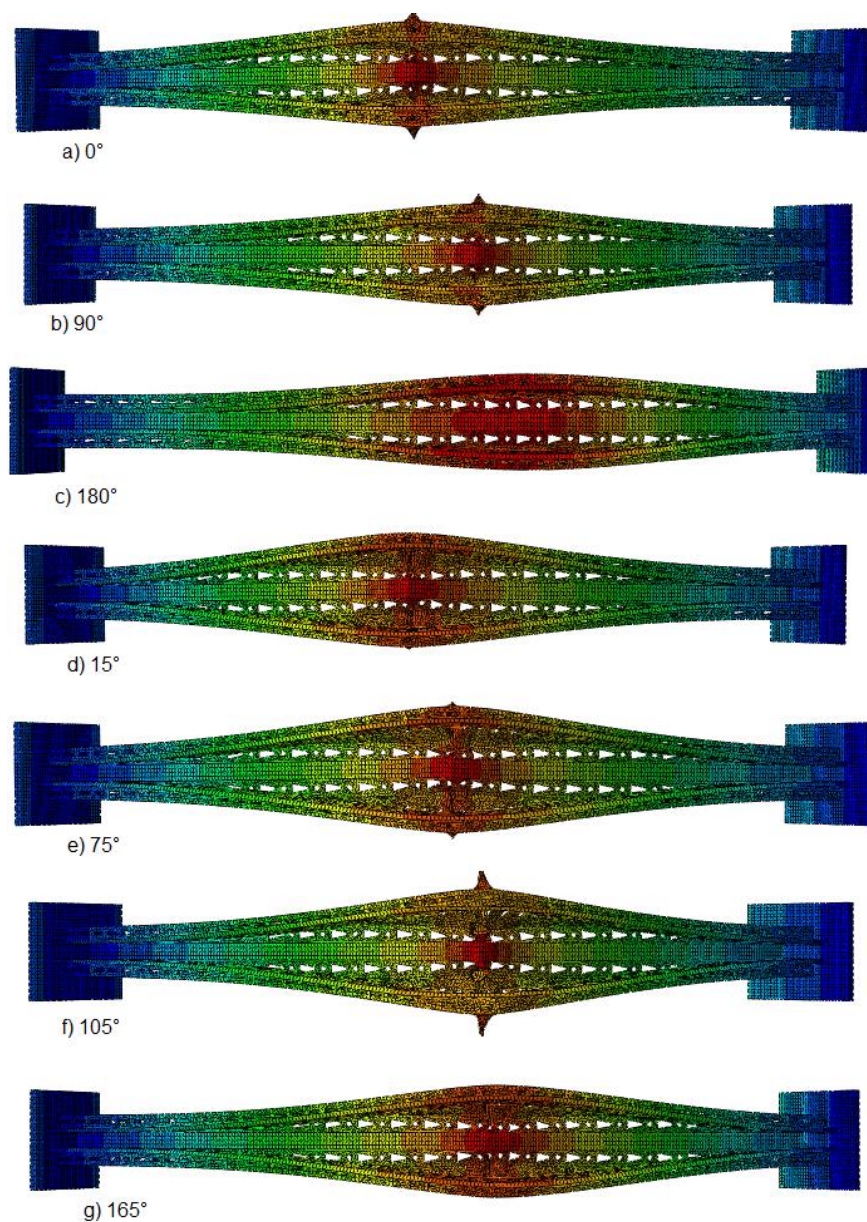
Figura 8.19 Curvas de equilíbrio, Seção S2, condição apoiada com torção restringida, $L=1200$, $t=2\text{mm}$, ponto V2



Fonte: O autor (2021)

A Figura 8.20 mostra as configurações deformadas das análises não lineares conduzidas para os ângulos de 0° , 90° , 180° , 15° , 75° , 105° e 165° para a seção com 1200mm de comprimento e espessura de 2mm.

Figura 8.20 Configurações deformadas, Seção S2, condição apoiada com torção restringida, $L=1200\text{mm}$, $t=2\text{mm}$



Fonte: O autor (2021)

Na Figura 8.20 também é possível observar a semelhanças das configurações deformadas obtidas nas análises não lineares.

8.3 ANÁLISES NÃO LINEARES SEÇÃO S3

Neste tópico serão mostrados os resultados obtidos das análises não lineares da seção S3 com as condições apoiada, engastada e apoiada com torção restringida.

8.3.1 Análise não linear seção S3 com condição apoiada

A Tabela 8.13 mostra as cargas de rupturas obtidas nos perfis S2 com furos de 20%, com comprimento de 1202.4 mm, espessura de 2 mm e condição apoiada.

Tabela 8.13 Carga de ruptura perfil com furos, L=1202.4, t=2

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	146899,67	1,00	0,00
90	160041,42	0,00	1,60
180	146868,81	-1,00	0,00
15	147075,06	0,97	0,41
30	148412,55	0,87	0,80
45	150328,53	0,71	1,13
60	153784,29	0,50	1,39
75	157612,95	0,26	1,55
105	157596,12	-0,26	1,55
120	153753,77	-0,50	1,39
135	150341,57	-0,71	1,13
150	148379,72	-0,87	0,41
165	147156,74	-0,97	0,41

Fonte: O autor (2021)

Novamente na condição apoiada, os menores valores de carga de ruptura ocorrem para os modos distorcionais e para a combinação distorcional e global de 165°. A Tabela 8.14 mostra os valores de carga de ruptura para o modo puro distorcional (0°) no comprimento de aproximadamente 1200 mm e espessura de 2mm para os perfis sem furos e com furos de 20%, 30%, 40% e 50%.

Tabela 8.14 Carga de ruptura para perfis com e sem furos utilizando o modo distorcional puro como imperfeição, Seção S3, condição apoiada, t=2mm

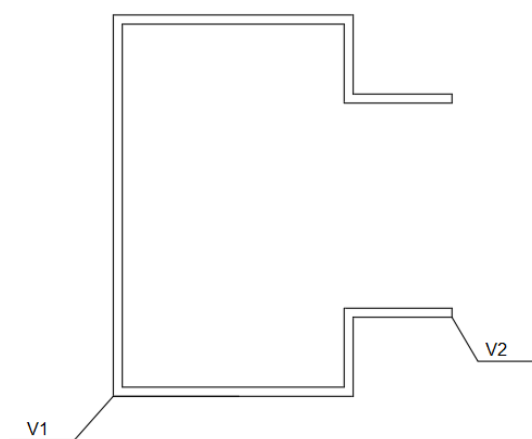
L (mm)	Tipo	Carga (N)
1200	Sem furos	160707,75
1202,4	20%	146899,67
1202,4	30%	145314,84
1202,4	40%	144425,49
1252,5	50%	140302,75

Fonte: O autor (2021)

Pela Tabela 8.14, podemos observar que ao aumentar o tamanho do furo, a carga de ruptura da seção diminui.

Para se analisar o comportamento da seção foram determinadas as curvas de equilíbrio do elemento. Para as seções analisadas, foram determinadas curvas em 2 pontos, o ponto V1 localizada na junção entre mesa e alma, o ponto V2 localizado na extremidade da mesa, esses pontos são mostrados na Figura 8.21. Esses pontos foram utilizados para determinação das curvas de equilíbrio das seções S3 e S4.

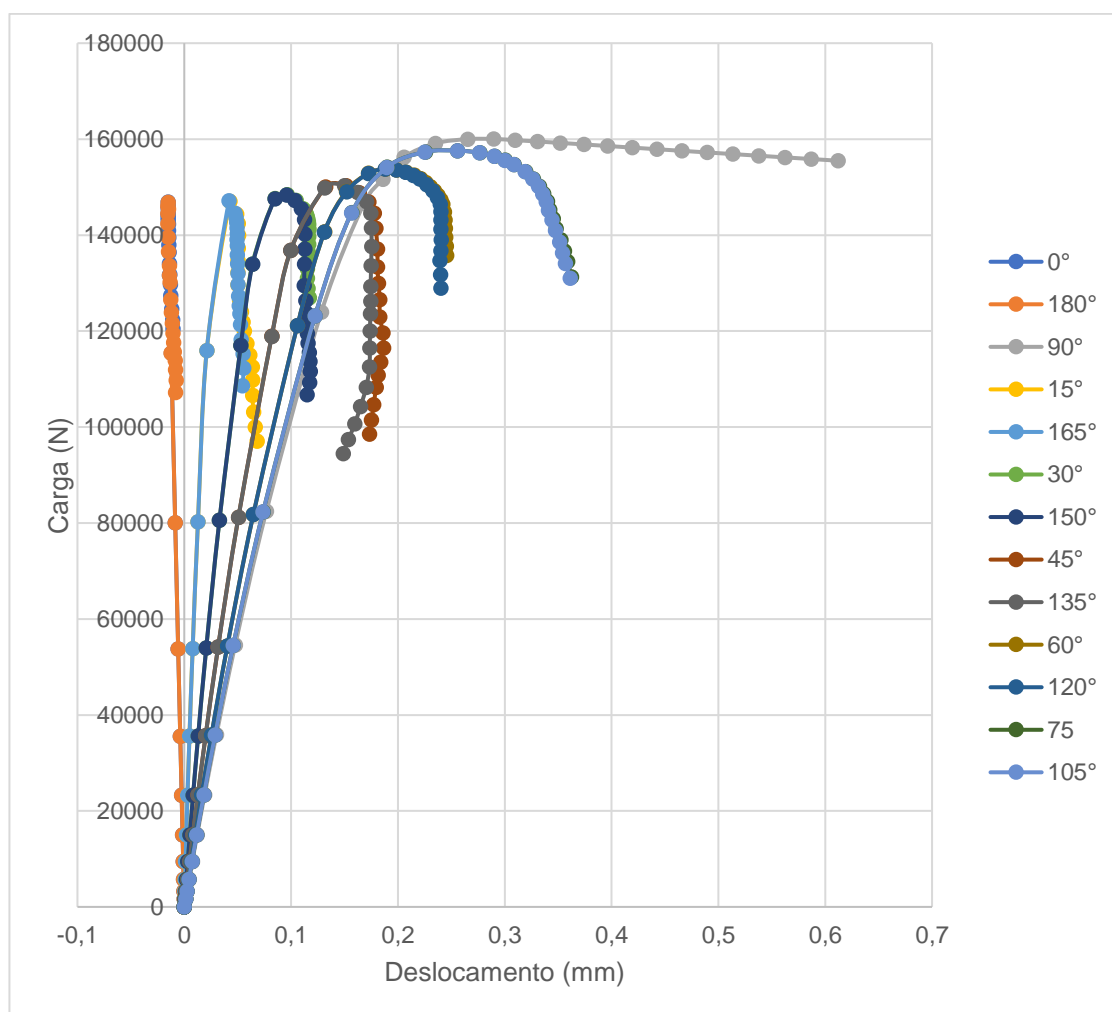
Figura 8.21 Pontos para determinação dos deslocamentos nas seções S3 e S4



Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V1 da seção com 1202.4 mm de comprimento, espessura de 2mm e com furos de 20% está mostrada na Figura 8.22.

Figura 8.22 Curvas de equilíbrio, Seção S3, condição apoiada, $L=1202.4\text{mm}$, $t=2\text{mm}$, ponto V1

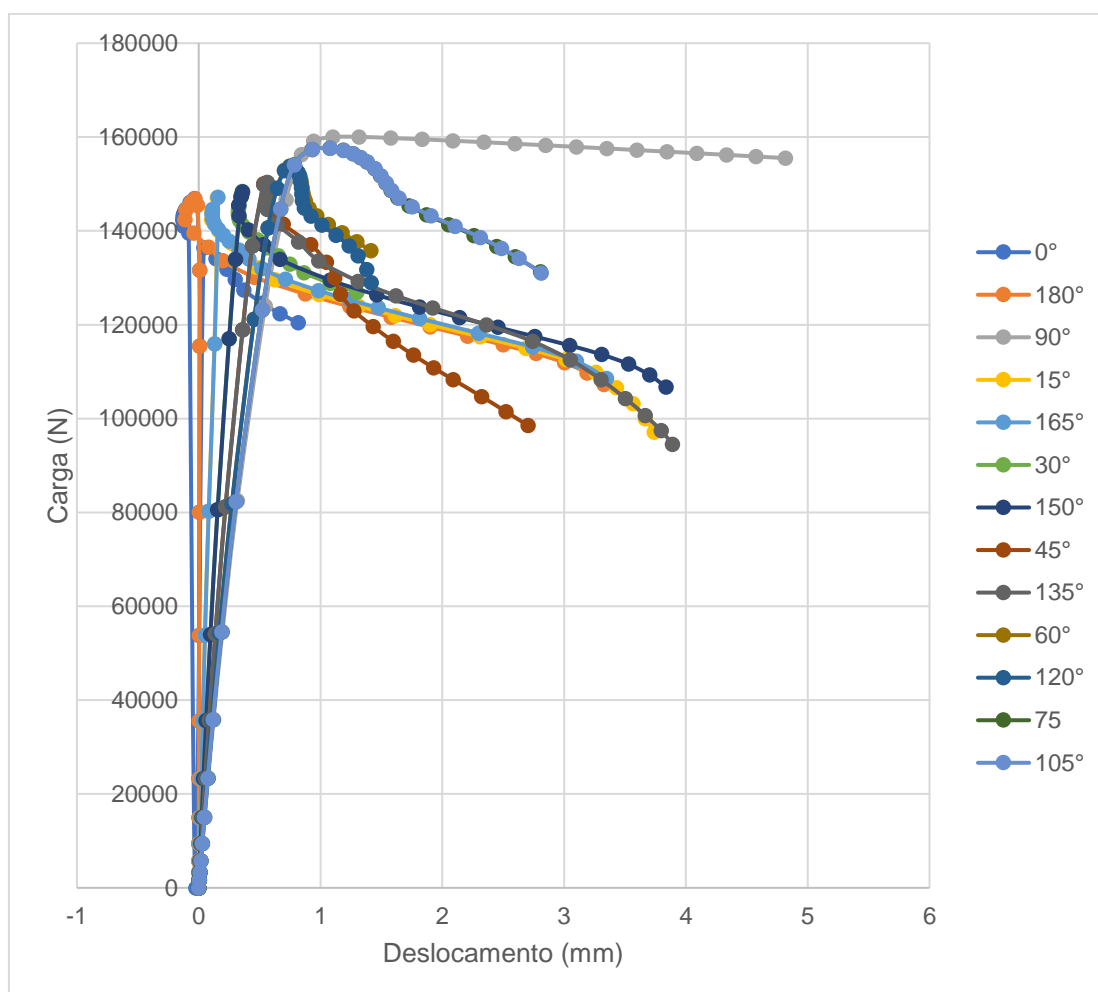


Fonte: O autor (2021)

Podemos observar pela Figura 8.22 que as curvas com modo puramente global (90°) ficou com um comportamento diferente das demais curvas, além de uma carga de ruptura maior.

As curvas de equilíbrio para o ponto V2 da seção com 1202.4mm de comprimento e com furos de 20%, está mostrada na Figura 8.23.

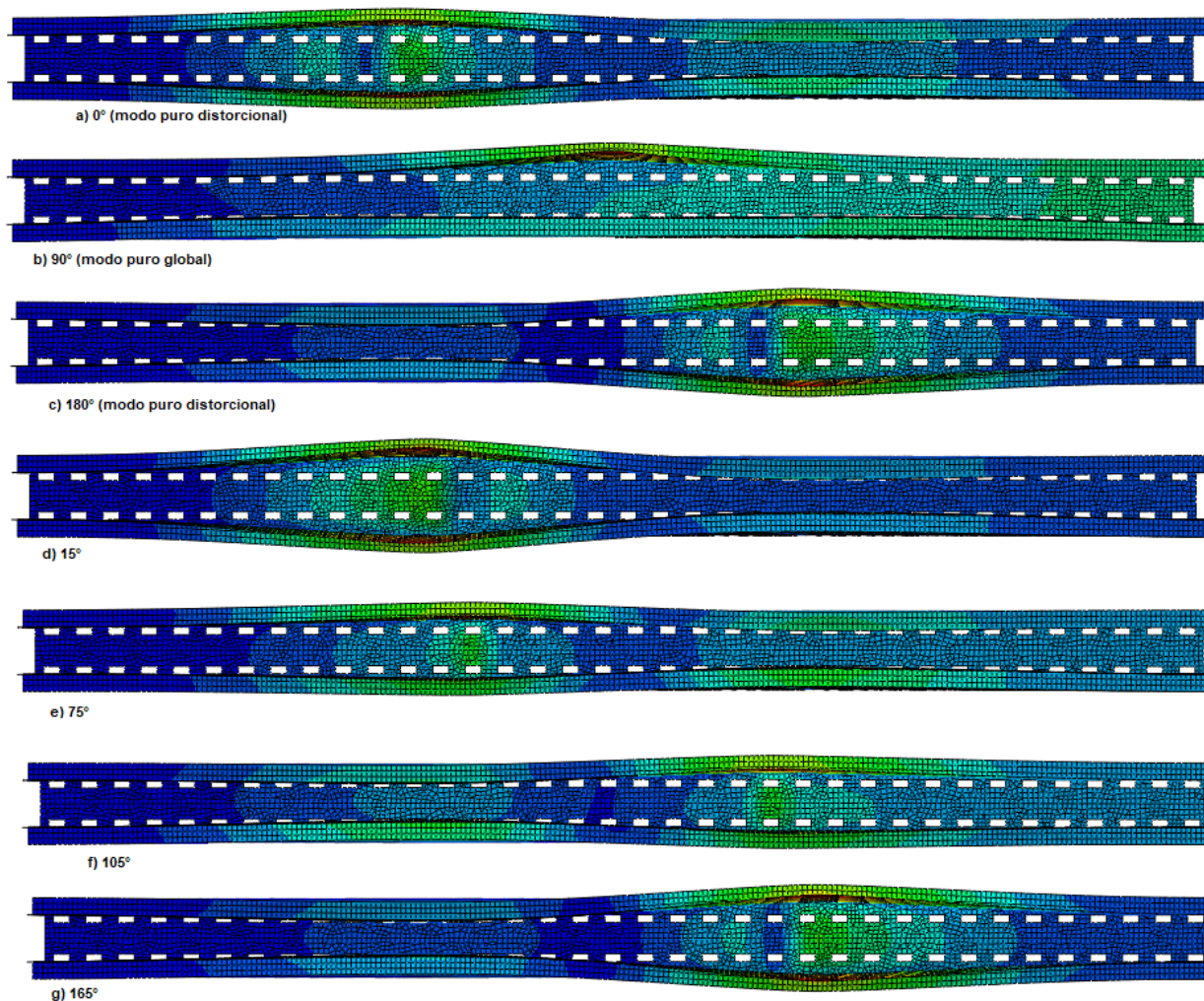
Figura 8.23 Curvas de equilíbrio, Seção S3, condição apoiada, L=1202.4mm, t=2mm ponto V2



Fonte: O autor (2021)

A Figura 8.24 mostra as configurações deformadas das análises não lineares conduzidas para os ângulos de 0°, 90°, 180°, 15°, 75°, 105° e 165° para a seção com 1202.4mm, espessura de 2mm, furos de 20°.

Figura 8.24 Configurações deformadas, Seção S3, condição apoiada, $L=1202.4\text{mm}$,
 $t=2\text{mm}$



Fonte: O autor (2021)

Podemos observar que pela Figura 8.24, a configuração deformada da seção de 90° teve sua ruptura devido a flambagem global. Nos demais casos, pode-se observar que a ruptura ocorreu com predominância da flambagem distorcional.

8.3.2 Análise não linear seção S3 com condição engastada

Tabelas 8.15 mostra as cargas de rupturas obtidas nos perfis S2 com furos de 20%, com comprimento de 2705.4 mm, espessura de 1.5 mm e condição engastada.

Tabela 8.15 Carga de ruptura perfil com furos, L=2705.4, t=1.5

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	87815,82	0,75	0,00
90	75745,31	0,00	3,61
180	87825,32	-0,75	0,00
15	83110,85	0,72	0,93
30	79209,48	0,65	1,85
45	77880,72	0,53	2,55
60	76773,30	0,38	3,12
75	76022,90	0,19	3,48
105	76017,29	-0,19	3,48
120	76766,37	-0,38	3,12
135	78190,04	-0,53	2,55
150	80153,12	-0,65	1,85
165	83107,24	-0,72	0,93

Fonte: O autor (2021)

Novamente na condição engastada, os menores valores de carga de ruptura ocorrem para o modo global e para a combinação distorcional e global de 75°. A Tabela 8.16 mostra os valores de carga de ruptura para o modo puro global (90°) no comprimento de aproximadamente 2700 mm e espessura de 1.5mm para os perfis sem furos e com furos de 20%, 30%, 40% e 50%.

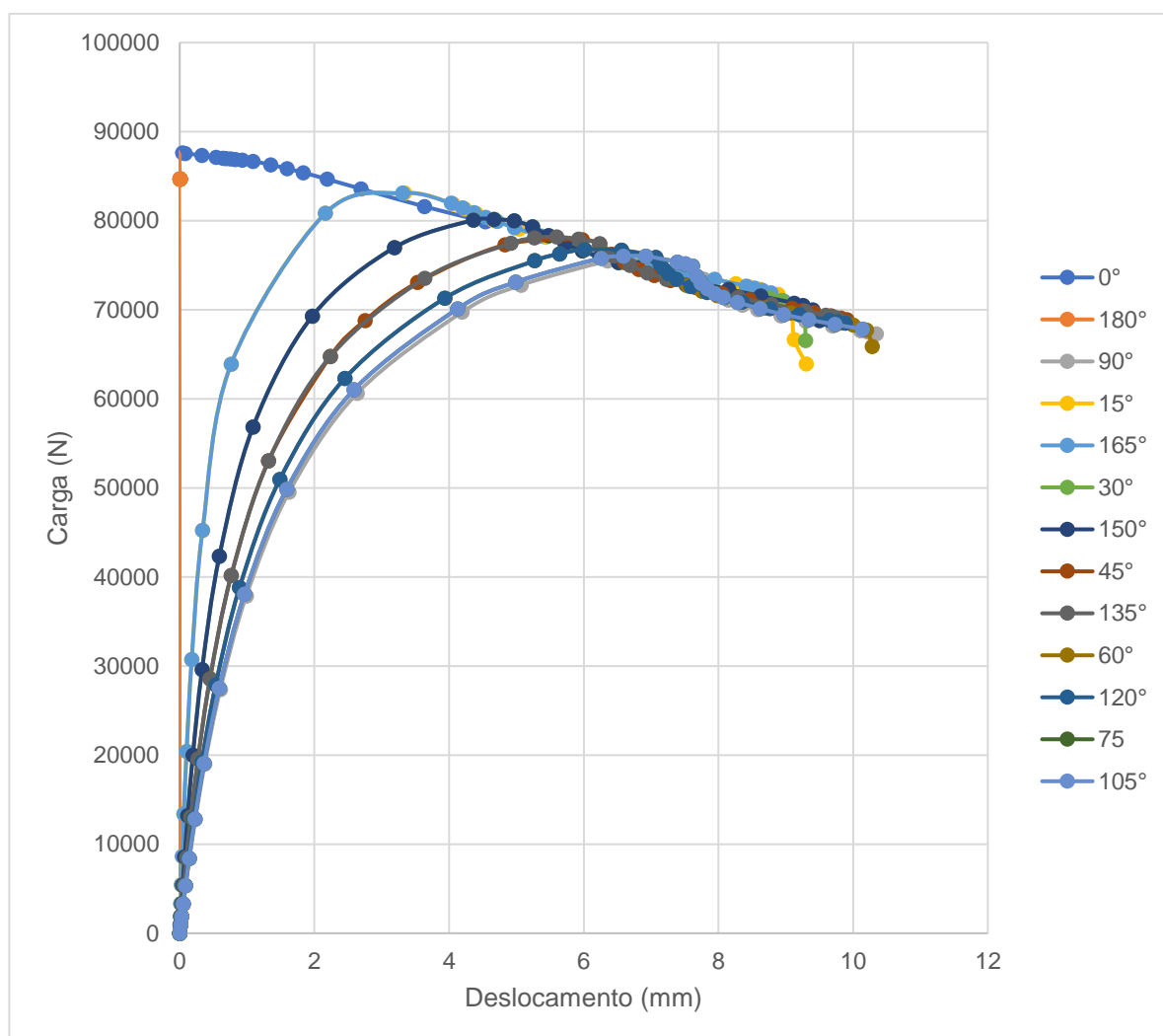
Tabela 8.16 Carga de ruptura perfil para perfis S3 com condição engastada com e sem furos utilizando o modo global puro como imperfeição

L (mm)	Tipo	Carga (N)
2700	Sem furos	85458,50
2705,4	20%	75745,31
2705,4	30%	75712,44
2705,4	40%	74489,69
2755,5	50%	73657,26

Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V1 da seção com 2705.4 de comprimento, espessura de 1.5mm, condição engastada e com furos de 20%, está mostrada na Figura 8.25.

Figura 8.25 Curvas de equilíbrio, Seção S3, condição engastada, $L=2705.4\text{mm}$,
 $t=1.5\text{mm}$, ponto V1

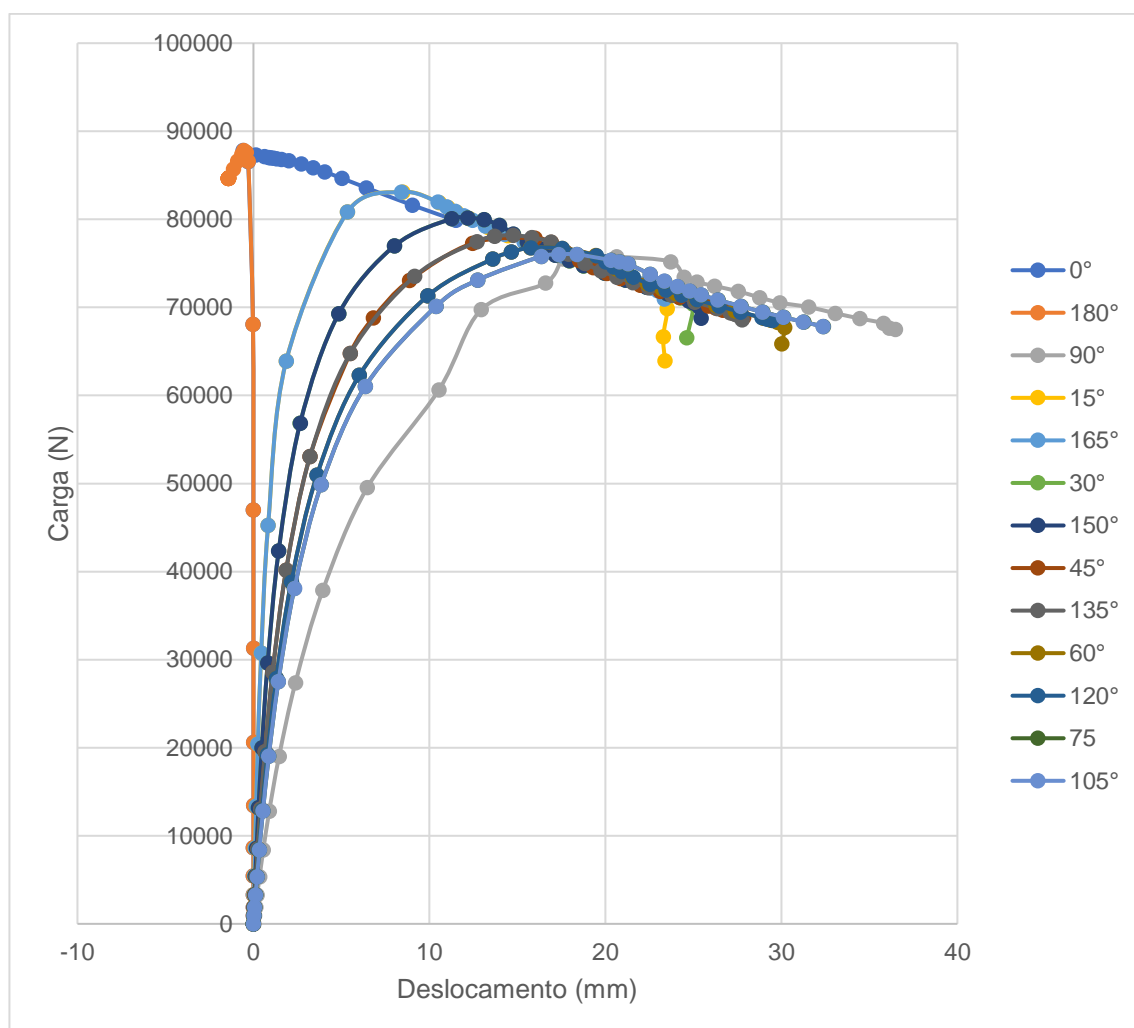


Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V2 da seção com de 2705.4 mm de comprimento, espessura de 1.5mm, condição engastada e com furos de 20%, está mostrada na Figura 8.26.

Figura 8.26 Curvas de equilíbrio, Condição engastada, $L=2705.4\text{mm}$, $t=1.5\text{mm}$, ponto

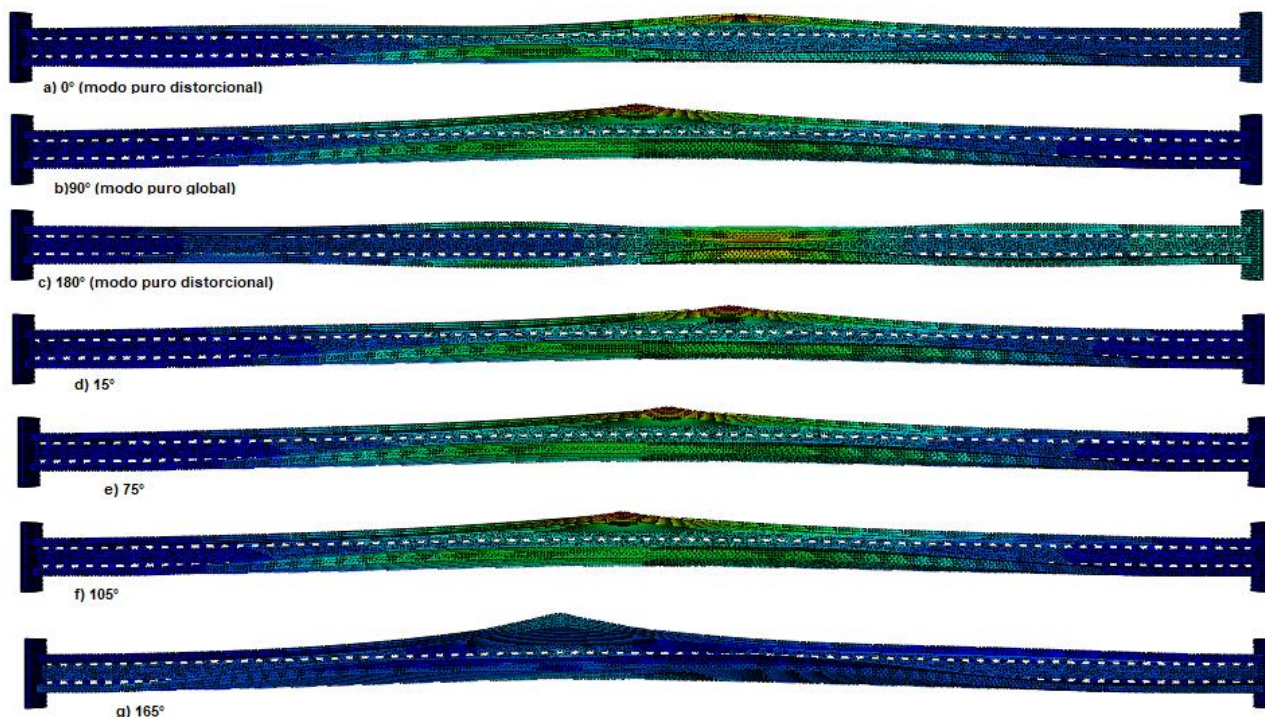
V2

**Fonte:** O autor (2021)

Pelas Figuras 8.25 e 8.26 podemos observar o diferente comportamento da curva de 180°, além de ter baixos valores de deslocamentos e possuir a maior carga de ruptura.

A Figura 8.27 mostra as configurações deformadas das análises não lineares conduzidas para os ângulos de 0°, 90°, 180°, 15°, 75°, 105° e 165° para a seção com comprimento de 2705.4, espessura de 1.5mm e furos de 20%.

Figura 8.27 Configurações deformadas, Seção S3, condição engastada, $L=2705.4\text{mm}$,
 $t=1.5\text{mm}$



Fonte: O autor (2021)

Pelas configurações deformadas observadas na Figura 8.27, podemos observar que para o caso de 180°, a ruptura ocorre devido a flambagem, diferente dos outros casos, onde a ruptura é dominada pela flambagem global, confirmando o comportamento diferente da curva de equilíbrio com ângulo de 180°.

8.3.3 Análise não linear seção S3 com condição apoiada com torção restringida

A Tabela 8.17 mostra as cargas de rupturas obtidas nos perfis S3 com furos de 20%, com comprimento de 1703.4 mm, espessura de 2 mm e condição apoiada com torção restringida.

Tabela 8.17 Carga de ruptura perfil com furos, L=1703.4, t=2

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	123830,41	1,00	0,00
90	112904,08	0,00	2,27
180	124378,18	-1,00	0,00
15	120452,21	0,97	0,59
30	117694,55	0,87	1,14
45	115556,10	0,71	1,61
60	114039,33	0,50	1,97
75	113161,72	0,26	2,19
105	113259,38	-0,26	2,19
120	114223,82	-0,50	1,97
135	116083,73	-0,71	1,61
150	118267,02	-0,87	1,14
165	120902,32	-0,97	0,59

Fonte: O autor (2021)

Diferentemente das seções S1 e S2, na condição apoiada com torção restringida, tanto para os perfis com e sem furos, a menor carga de ruptura ocorreu considerando apenas o modo global como imperfeição e nas combinações entre 75° e 105°. A Tabela 8.18 mostra as cargas de ruptura para os perfis sem e com furos considerando o comprimento em torno de 1700 mm, espessura de 2mm e imperfeição puramente global.

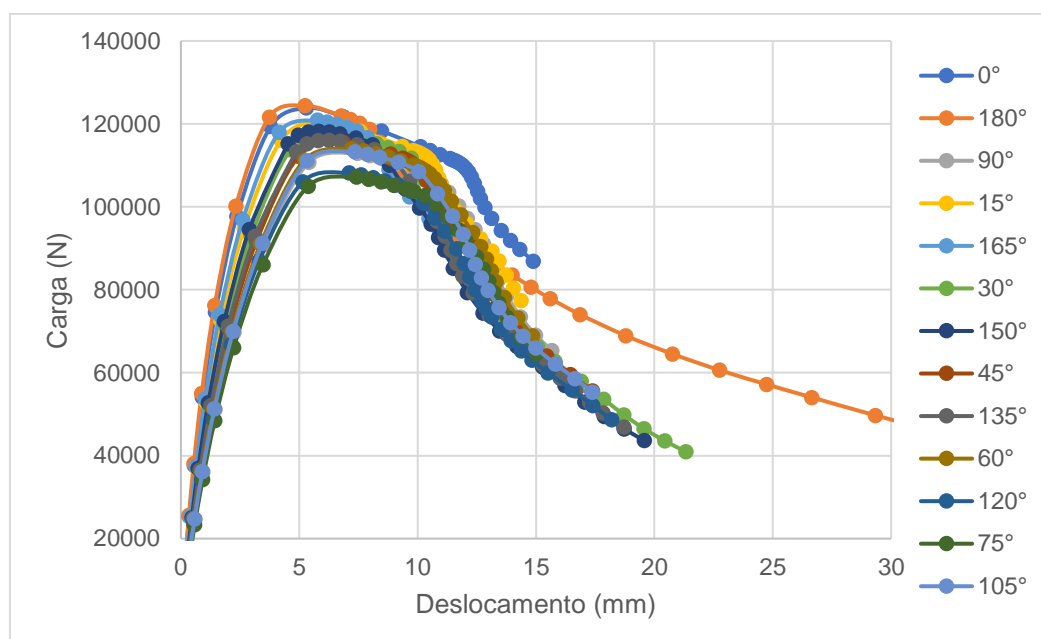
Tabela 8.18 Carga de ruptura perfil para perfis S3 com condição apoiada com torção restringida, com e sem furos utilizando o modo global puro como imperfeição

L (mm)	Tipo	Carga (N)
1700	Sem furos	138729,15
1703,4	20%	112904,08
1703,4	30%	98209,86
1736,8	40%	95554,17
1753,5	50%	88295,40

Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V1 da seção com 1703.4 de comprimento, espessura de 2mm, condição apoiada com torção restringida e com furos de 20%, está mostrada na Figura 8.28.

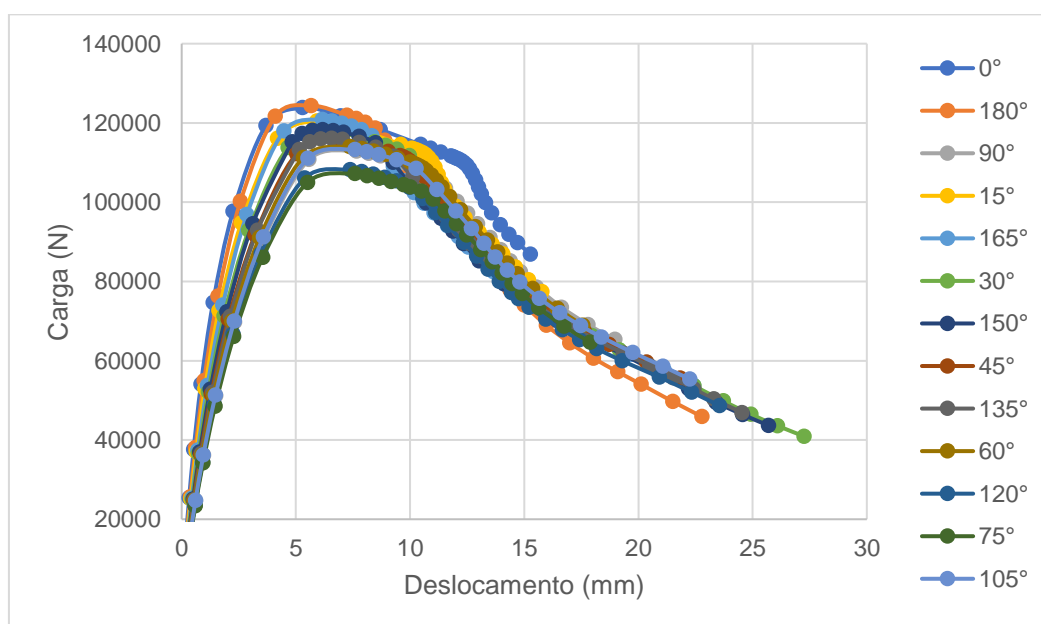
Figura 8.28 Curvas de equilíbrio, Seção S3, condição apoiada com torção restringida, $L=1703.4\text{mm}$, $t=2\text{mm}$, ponto V1



Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V2 da seção com de 1703.4 mm de comprimento, espessura de 2mm, condição engastada e com furos de 20%, está mostrada na Figura 8.29.

Figura 8.29 Curvas de equilíbrio, Seção S3, condição apoiada com torção restringida, $L=1703.4\text{mm}$, $t=2\text{mm}$, ponto V2

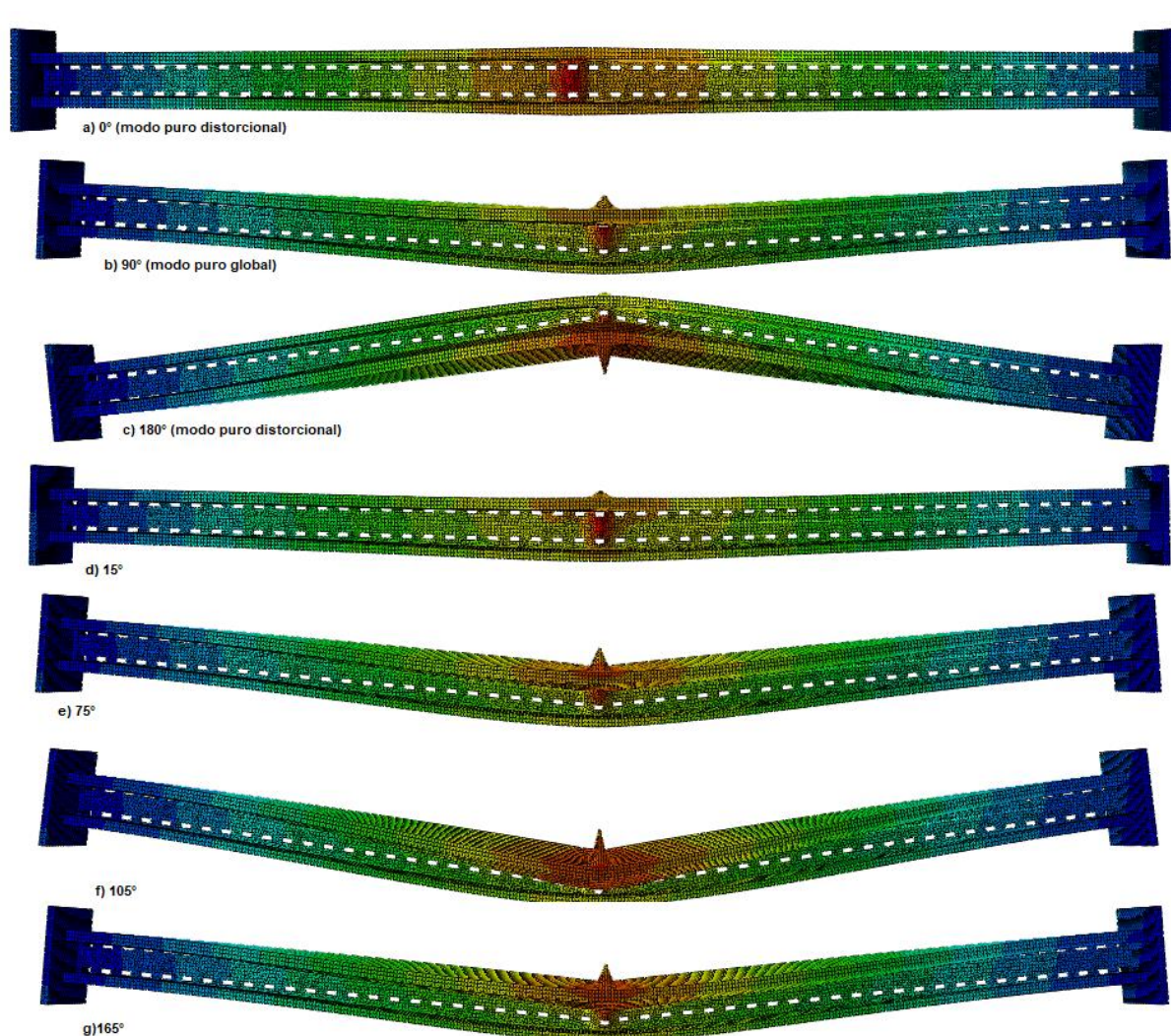


Fonte: O autor (2021)

Observando as Figuras 8.28 e 8.29, podemos observar que todas as curvas de equilíbrio possuem um comportamento semelhante, como também foram observados nas seções S1 e S2 com condição apoiada com torção restringida.

A Figura 8.30 mostra as configurações deformadas das análises não lineares conduzidas para os ângulos de 0° , 90° , 180° , 15° , 75° , 105° e 165° para a seção com 1703.4mm, espessura de 2mm e furos de 20%.

Figura 8.30 Configurações deformadas, Seção S3, condição apoiada com torção restringida, $L=1703.4\text{mm}$, $t=2\text{mm}$



Fonte: O autor (2021)

8.4 ANÁLISES NÃO LINEARES SEÇÃO S4

Neste tópico serão mostrados os resultados obtidos das análises não lineares da seção S4 com as condições apoiada, engastada e apoiada com torção restringida.

8.4.1 Análise não linear seção S4 com condição apoiada

A Tabela 8.19 mostra as cargas de rupturas obtidas nos perfis S4 com furos de 20%, com comprimento de 1185.6 mm, espessura de 3 mm e condição apoiada.

Tabela 8.19 Carga de ruptura perfil com furos, L=1185.6, t=3

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	275992,00	1,50	0,00
90	294170,00	0,00	1,58
180	275971,60	-1,50	0,00
15	276594,00	1,45	0,41
30	278755,60	1,30	0,79
45	282264,00	1,06	1,12
60	287164,40	0,75	1,37
75	292803,20	0,38	1,53
105	292866,40	-0,38	1,53
120	287174,80	-0,75	1,37
135	282256,80	-1,06	1,12
150	278742,00	-1,30	0,79
165	276720,40	-1,45	0,41

Fonte: O autor (2021)

Repetindo o comportamento dos outros perfis na condição apoiada, os menores valores de carga de ruptura ocorrem quando é utilizada como imperfeição um modo puramente distorcional e na combinação de 165°. A Tabela 8.20 mostra os valores de carga de ruptura para o modo puro distorcional (0°) no comprimento de aproximadamente 1185 mm e espessura de 3 mm para os perfis sem furos e com furos de 20%, 30%, 40% e 50%.

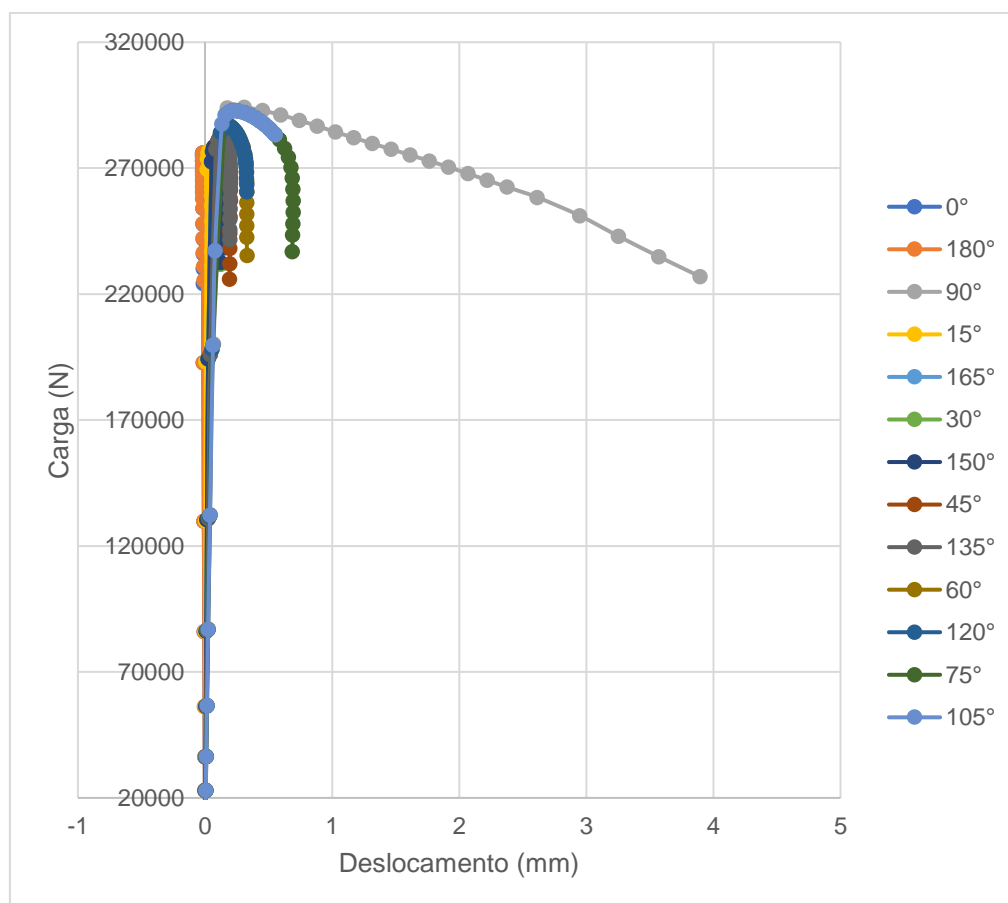
Tabela 8.20 Carga de ruptura perfil para perfis S4, condição apoiada, com e sem furos utilizando o modo distorcional puro como imperfeição

L (mm)	Tipo	Carga (N)
1185	Sem furos	297947,59
1185,6	20%	275992,00
1185,6	30%	275069,31
1185,6	40%	273717,21
1252,5	50%	270963,94

Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V1 da seção com 1185.6 mm de comprimento, espessura de 3mm, condição apoiada e com furos de 20%, está mostrada na Figura 8.31.

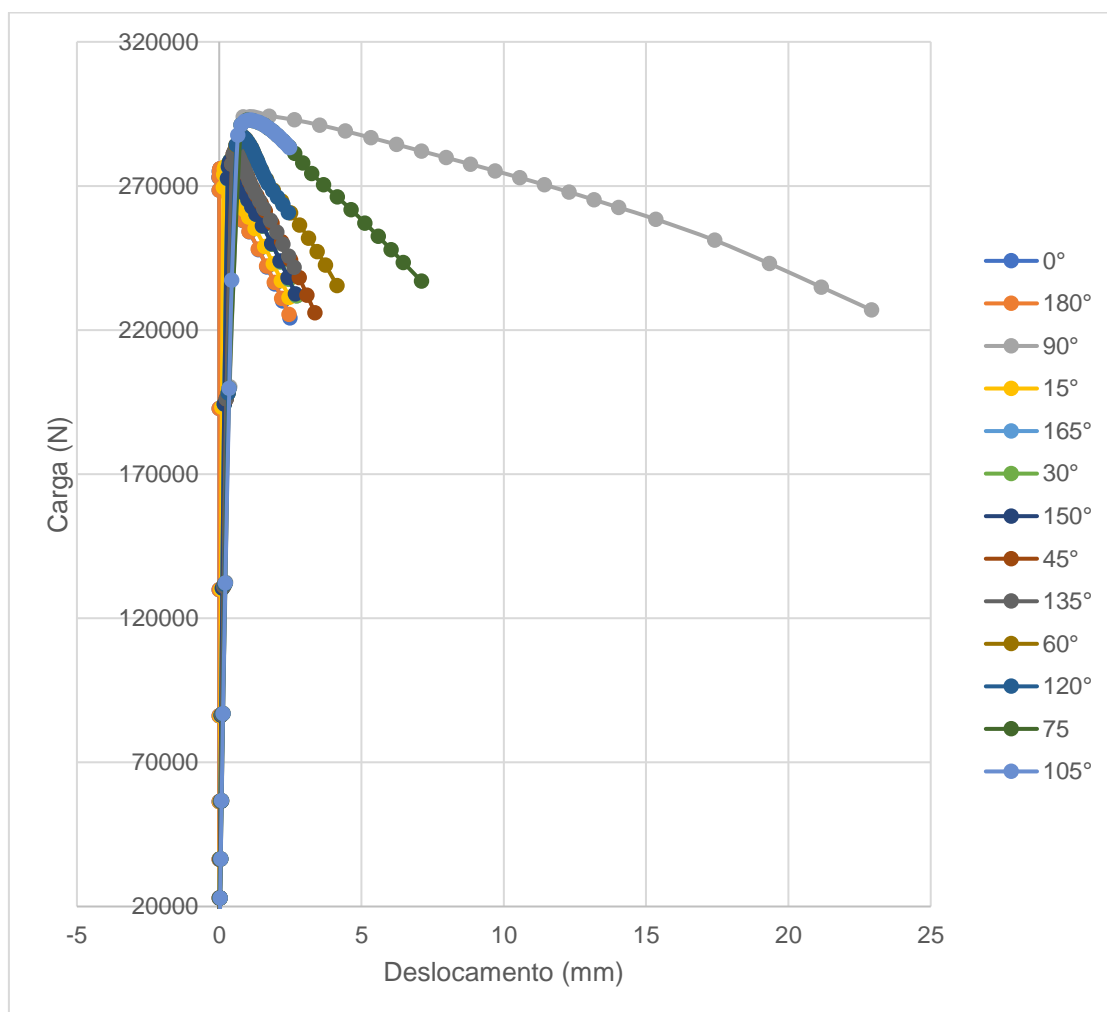
Figura 8.31 Curvas de equilíbrio, Seção S4, condição apoiada, L=1185.6mm, t=3mm ponto V1



Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V2 da seção com 1185.6mm de comprimento, condição apoiada, $t=3\text{mm}$ e com furos de 20%, está mostrada na Figura 8.32.

Figura 8.32 Curvas de equilíbrio, Seção S4, condição apoiada, $L=1185.6$, $t=3\text{mm}$, ponto V2

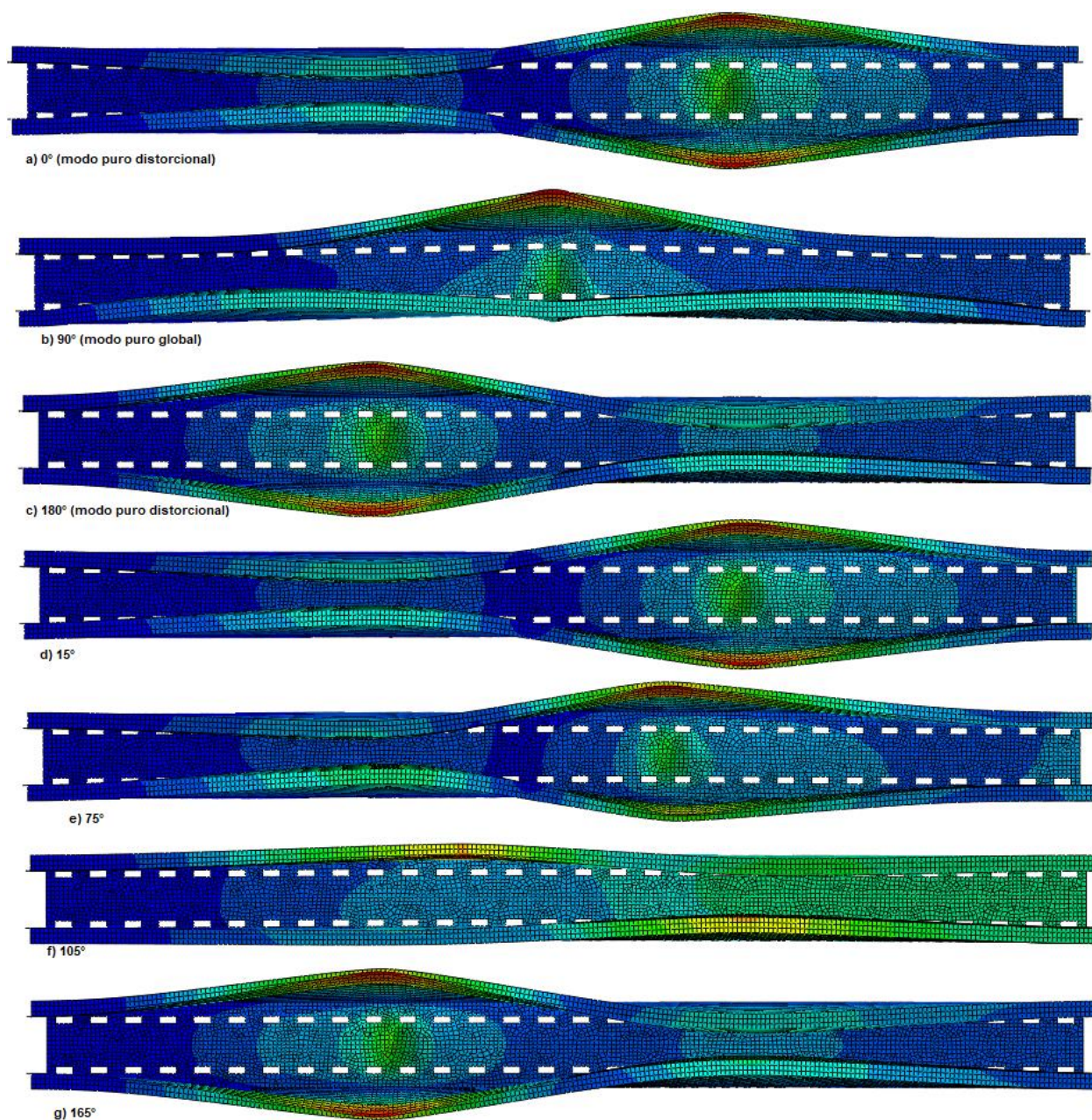


Fonte: O autor (2021)

Novamente, como observado nas Figuras 8.31 e 8.32, a curva de 90° possui comportamento diferente das demais e um maior valor de carga de ruptura.

A Figura 8.33 mostra as configurações deformadas das análises não lineares conduzidas para os ângulos de 0°, 90°, 180°, 15°, 75°, 105° e 165° para a seção com comprimento de 1185.6mm, $t=3\text{mm}$, furos de 20% e condição apoiada.

Figura 8.33 Configurações deformadas, Seção S4, condição apoiada, $L=1185.6\text{mm}$,
 $t=3\text{mm}$



Fonte: O autor (2021)

8.4.2 Análise não linear seção S4 com condição engastada

A Tabela 8.21 mostra as cargas de rupturas obtidas nos perfis S4 com furos de 20%, com comprimento de 3319.68 mm, espessura de 1.5 mm e condição engastada.

Tabela 8.21 Carga de ruptura perfil com furos, L=3319.68, t=1.5

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	92894,04	0,75	0,00
90	77832,84	0,00	4,43
180	92855,09	-0,75	0,00
15	85864,52	0,72	1,15
30	82537,05	0,65	2,21
45	80007,77	0,53	3,13
60	78915,27	0,38	3,83
75	78091,71	0,19	4,28
105	78100,64	-0,19	4,28
120	78929,80	-0,38	3,83
135	78396,76	-0,53	3,13
150	82566,50	-0,65	2,21
165	86023,93	-0,72	1,15

Fonte: O autor (2021)

Novamente na condição engastada, os menores valores de carga de ruptura ocorrem para o modo global e para a combinação distorcional e global de 75°. A Tabela 8.22 mostra os valores de carga de ruptura para o modo puro global (90°) no comprimento de aproximadamente 3300 mm e espessura de 1.5mm para os perfis sem furos e com furos de 20%, 30%, 40% e 50%.

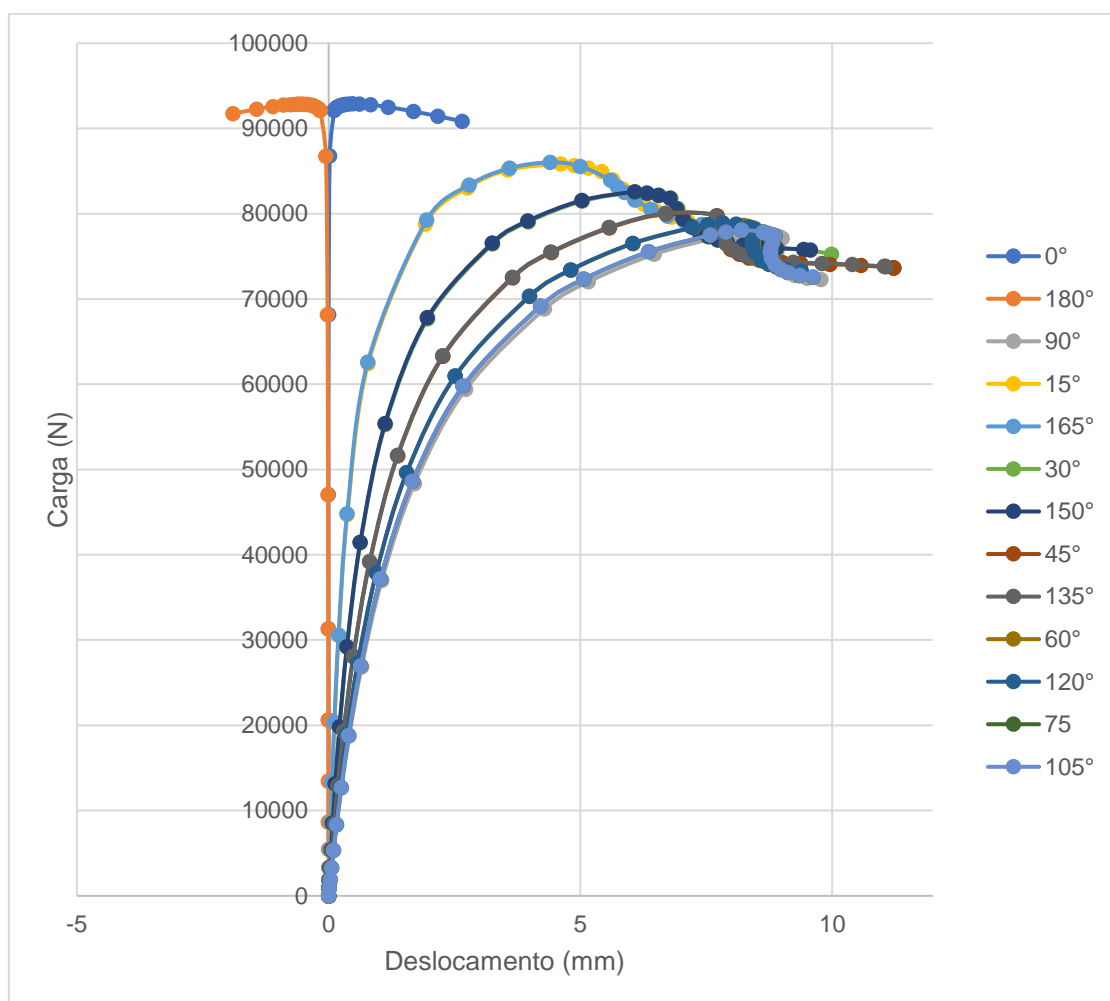
Tabela 8.22 Carga de ruptura perfil para perfis S4, condição engastadas com e sem furos utilizando o modo global puro como imperfeição

L (mm)	Tipo	Carga (N)
3450	Sem furos	83228,23
3319,68	20%	77832,84
3319,68	30%	77630,11
3477	40%	73176,03

Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V1 da seção com 3319.68 de comprimento, condição engastada, espessura de 1.5mm e com furos de 20%, está mostrada na Figura 8.34.

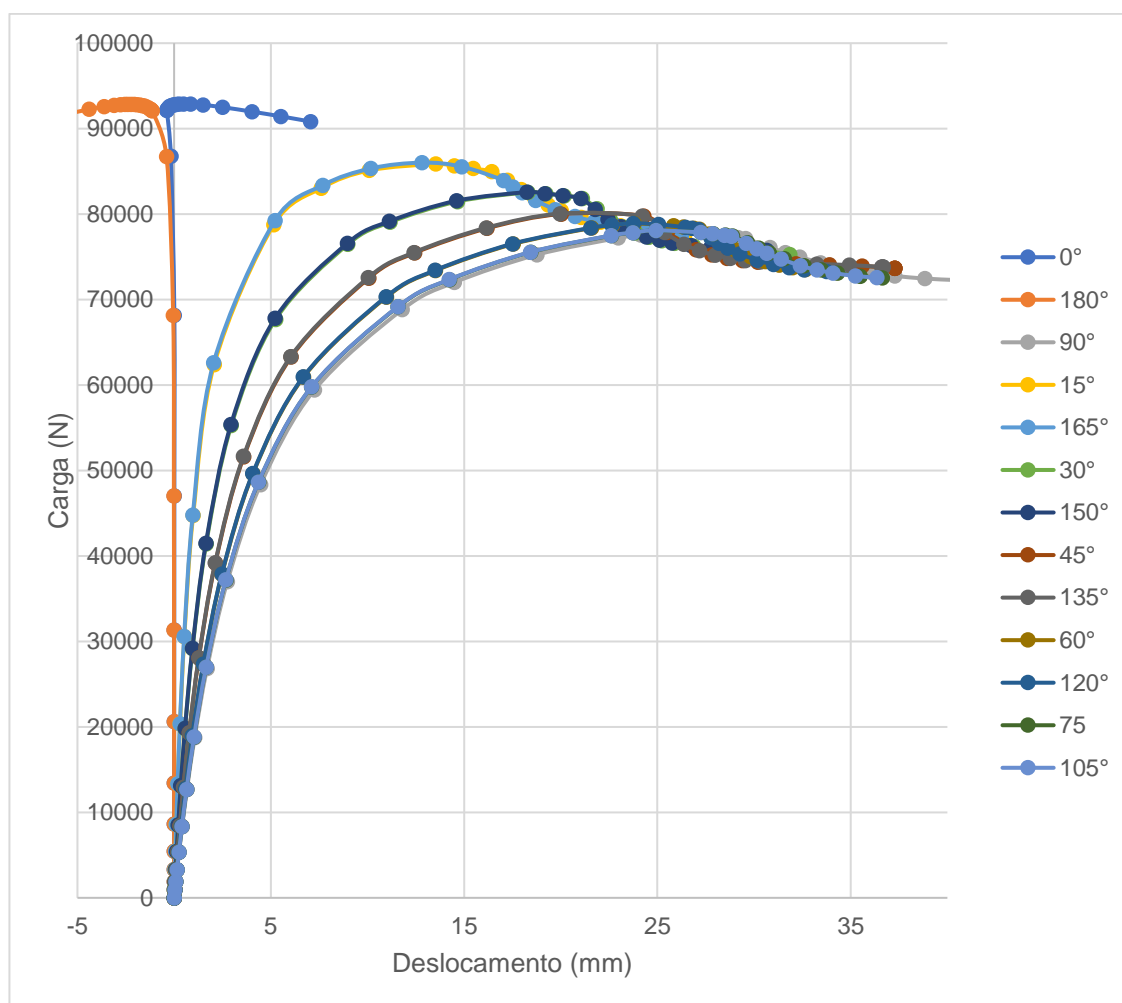
Figura 8.34 Curvas de equilíbrio, Seção S4, condição engastada, $L=3319.68$,
 $t=1,5\text{mm}$, ponto V1



Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V2 da seção com de 3319.68 mm de comprimento, $t=1.5\text{mm}$, condição engastada e com furos de 20%, está mostrada na Figura 8.35.

Figura 8.35 Curvas de equilíbrio, Seção S4, condição engastada, $L=3319.68\text{mm}$, $t=1.5\text{mm}$, ponto V2

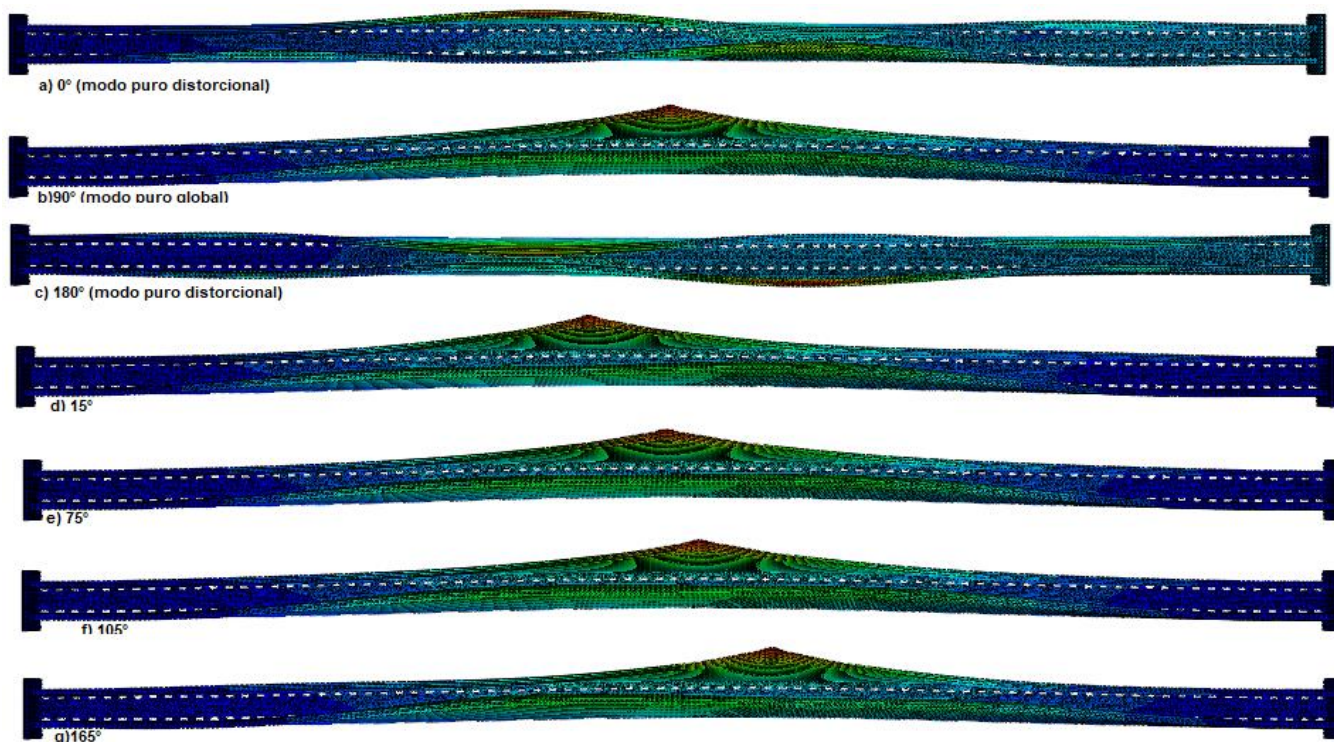


Fonte: O autor (2021)

Pelas Figuras 8.34 e 8.35 podemos observar os diferentes comportamentos das seções de 0° e 180° , onde foram utilizados modos distorcionais como imperfeições geométricas.

A Figura 8.36 mostra as configurações deformadas das análises não lineares conduzidas para os ângulos de 0° , 90° , 180° , 15° , 75° , 105° e 165° para a seção com comprimento de 3319.68mm , espessura de 1.5mm e condição engastada.

Figura 8.36 Configurações deformadas, Seção S4, condição engastada, $L=3319.68$,
 $t=1.5\text{mm}$



Fonte: O autor (2021)

Pelas Figuras 8.36 podemos que as seções de 0° e 180° tiveram o modo de flambagem distorcional como dominantes na ruptura, enquanto que as demais seções tiveram dominância no modo global.

8.4.3 Análise não linear seção S4 com condição apoiada com torção restringida

A Tabela 8.23 mostra as cargas de rupturas obtidas nos perfis S4 com furos de 20%, com comprimento de 1817.92 mm, espessura de 3 mm e condição apoiada com torção restringida.

Tabela 8.23 Carga de ruptura perfil sem furos, L=1817.92, t=3

θ (°)	Carga (N)	Vd (mm)	VG (mm)
0	243202,46	1,50	0,00
90	230727,72	0,00	2,42
180	234375,98	-1,50	0,00
15	240460,86	1,45	0,60
30	240581,38	1,30	1,21
45	237618,52	1,06	1,71
60	234716,38	0,75	2,10
75	232315,64	0,38	2,34
105	229983,44	-0,38	2,34
120	230002,76	-0,75	2,10
135	230816,04	-1,06	1,71
150	232164,76	-1,30	1,21
165	233638,60	-1,45	0,60

Fonte: O autor (2021)

Como na seção S3, a menor carga de ruptura ocorreu considerando apenas o modo global como imperfeição e nas combinações entre 75° e 105°. A Tabela 8.24 mostra as cargas de ruptura para os perfis sem e com furos considerando o comprimento em torno de 1800 mm, espessura de 3mm e imperfeição puramente global.

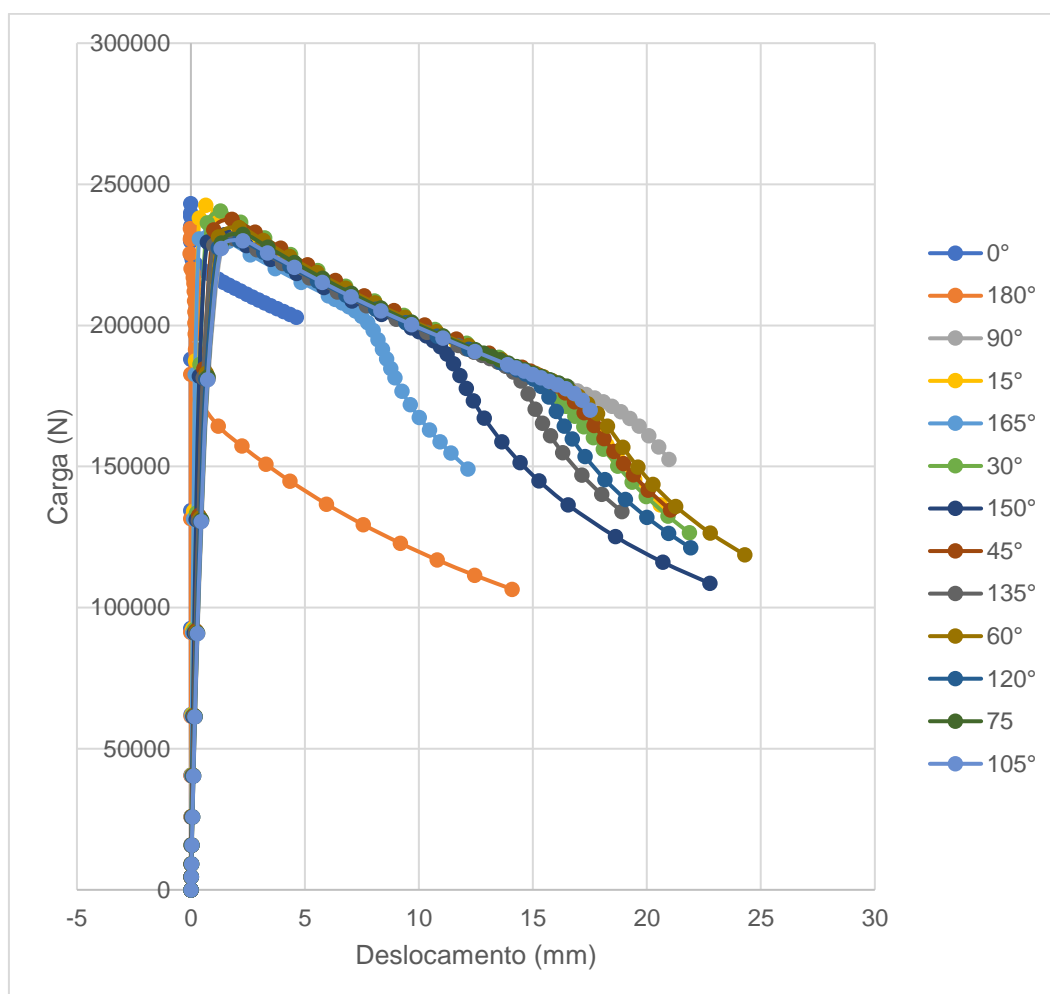
Tabela 8.24 Carga de ruptura perfil para perfis S4 com condição apoiada com torção restringida, com e sem furos utilizando o modo global puro como imperfeição

L (mm)	Tipo	Carga (N)
1800	Sem furos	281911,50
1817,92	20%	230727,72
1837,68	30%	210214,02
1817,92	40%	174891,54
1877,2	50%	173094,33

Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V1 da seção com 1817.92mm de comprimento, espessura de 3mm, condição apoiada com torção restringida e com furos de 20%, está mostrada na Figura 8.37.

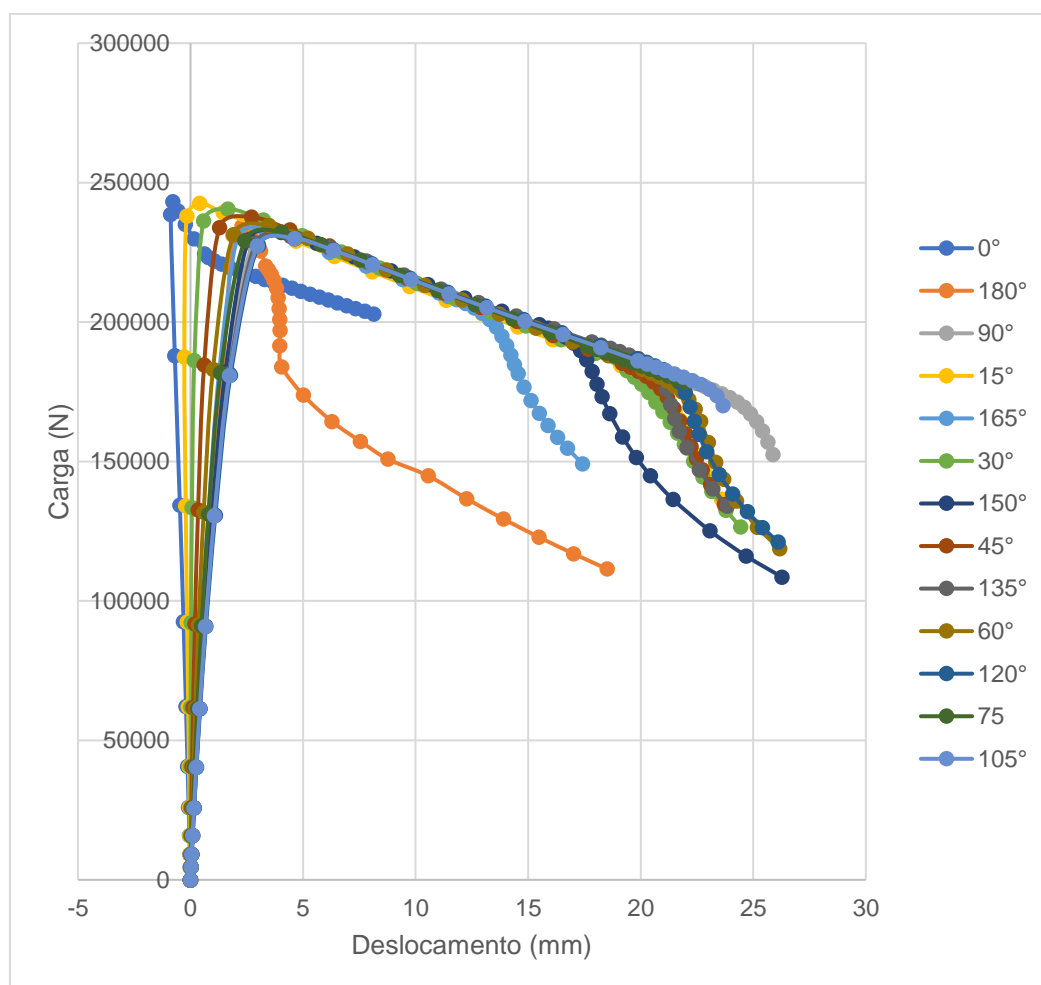
Figura 8.37 Curvas de equilíbrio, Seção S4, condição apoiada com torção restringida, $L=1817.92$, $t=3\text{mm}$, ponto V1



Fonte: O autor (2021)

As curvas de equilíbrio para o ponto V2 da seção com de 1817.92 mm de comprimento, espessura de 3mm condição apoiada com torção restringida e com furos de 20%, está mostrada na Figura 8.38.

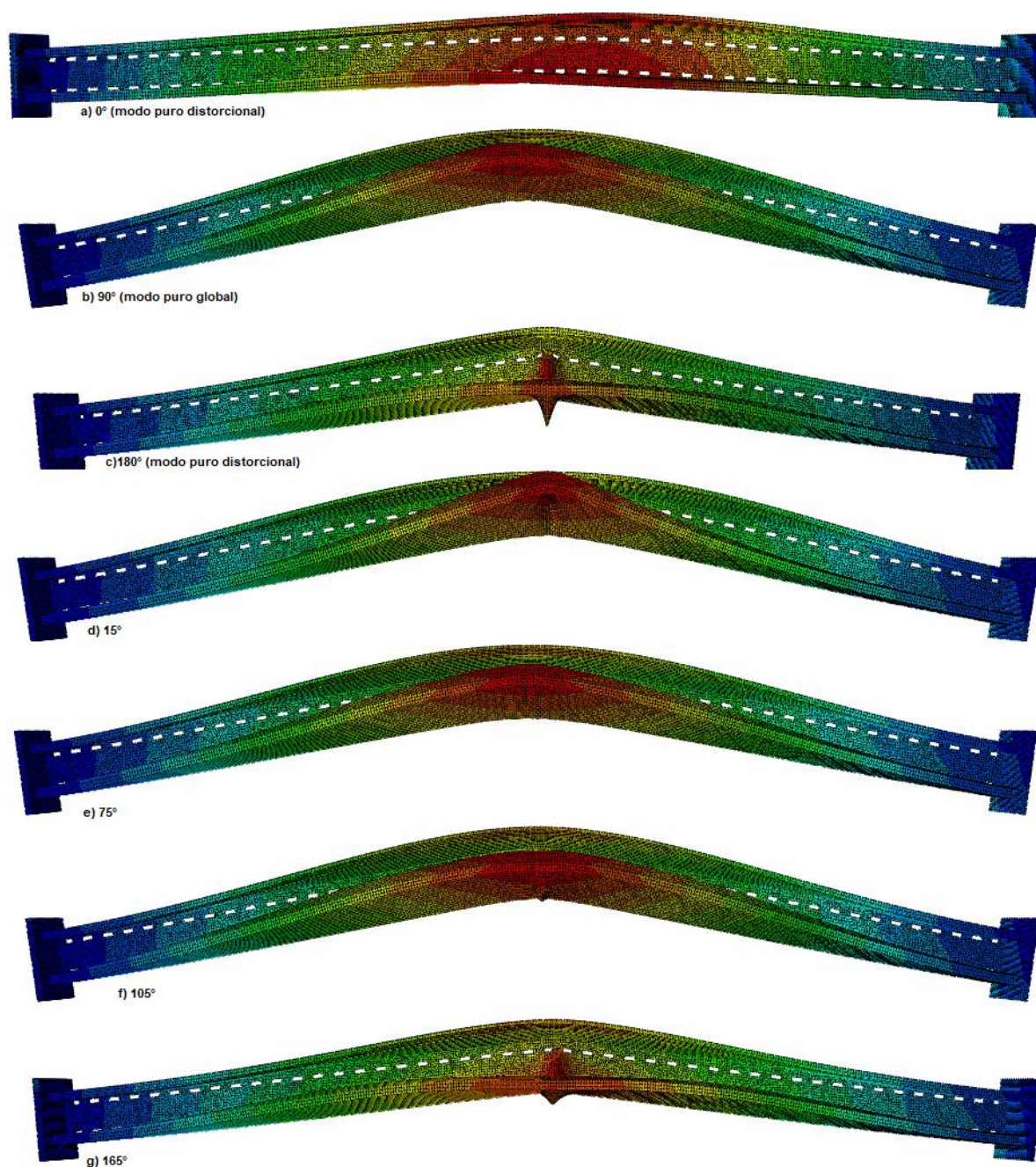
Figura 8.38 Curvas de equilíbrio, Seção S4, condição apoiada com torção restringida, $L=1817.9\text{mm}^2$, $t=3\text{mm}$, ponto V2



Fonte: O autor (2021)

A Figura 8.39 mostra as configurações deformadas das análises não lineares conduzidas para os ângulos de 0° , 90° , 180° , 15° , 75° , 105° e 165° para a seção com 1817.92mm^2 , espessura de 3mm .

Figura 8.39 Configurações deformadas, Seção S4, condição apoiada com torção restringida, $L=1817.92$, $t=3\text{mm}$



Fonte: O autor (2021)

Neste capítulo foram realizadas as análises não lineares das colunas selecionadas com interação D-G. Em cada análise não linear foi determinada a carga de ruptura, as curvas de equilíbrio e a configuração deformada da seção.

Para avaliar a interação D-G, em cada coluna foram realizadas 13 análises não lineares, combinando os modos de flambagem global e distorcional como imperfeição, e variando os

valores de magnitude de imperfeição desses modos. A partir dos resultados observados, para as condições engastada e apoiada com torção restringida, as menores cargas de ruptura ocorreram utilizando como imperfeição apenas o modo global. Por fim, para a condição apoiada, as menores cargas de ruptura ocorreram utilizando o modo distorcional puro como imperfeição.

CAPÍTULO 9

APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Neste capítulo, o Método da Resistência Direta (MRD) será aplicado em todas as seções que foram analisadas no Capítulo 8, onde foram realizadas as análises não lineares e a determinação da carga de ruptura das colunas. O MRD tradicional será aplicado inicialmente nos perfis perfurados considerando a área bruta da seção, posteriormente o MRD será aplicado considerando a área líquida da seção, o MRD também será aplicado considerando a interação D-G nas seções seguindo a proposta de Schafer (2002), por fim o MRD será aplicado pela formulação com furos pontuais proposto por Moen e Schafer (2008 e 2011) e presente na norma Americana AISI S100 (2016). As formulações do MRD utilizadas foram exibidas no Capítulo 4.

Os valores de carga de ruptura determinados no MRD serão comparados com os obtidos na análise não linear. Como na análise não linear foram obtidos vários resultados para cada seção devido a variação dos valores de imperfeição geométricas, será utilizado nessa análise, o menor valor de carga de ruptura obtido para cada seção. No caso das seções com condição apoiada, serão utilizados os valores de carga de ruptura obtidos utilizando o modo puro de flambagem distorcional como imperfeição geométrica. Nas seções com condição engastada e apoiada com torção restringida, serão utilizados os valores de carga de ruptura obtidos utilizando o modo puro de flambagem global como imperfeição geométrica.

Como já mencionado anteriormente, o principal parâmetro para a aplicação do MRD é a determinação das cargas críticas de flambagem elástica dos modos global e distorcional, sendo

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

que neste caso devido a presença dos furos, essas cargas foram determinadas via ABAQUS, pois os softwares GBTUL e CUFSM não aceitam perfis perfurados. Porém, existem metodologias de espessura equivalente onde os furos são substituídos por paredes com uma espessura equivalente. No final deste capítulo, a metodologia de espessura equivalente proposta por Casafont et al. (2012, 2013) será utilizada para determinação das carga crítica de flambagem elástica e esses valores serão comparados com os obtidos via ABAQUS.

9.1 APLICAÇÃO DO MRD NA CONDIÇÃO ENGASTADA

A Tabela 9.1 mostra os resultados do MRD obtidos na seção S1 com furos considerando a área bruta na determinação do MRD na condição engastada. Onde P_{CRD} e P_{CRG} são as cargas críticas de flambagem elástica distorcional e global, P_{ult} é a carga de ruptura obtida pela análise não linear via ABAQUS, P_{nG} e P_{nD} são as cargas de ruptura obtidas pelo MRD para os modos global e distorcional, e P_{ultMRD} é o menor valor entre P_{nG} e P_{nD} , sendo que este será o valor considerado como carga de ruptura para o MRD.

Tabela 9.1 MRD considerando a área bruta na seção S1 com furos e condição engastada

L(mm)	t(mm)	P_{CRD} (N)	P_{CRG} (N)	P_{ult} (N)	P_{nD} (N)	P_{nG} (N)	P_{ultMRD}(N)	Erro(%)
2800	3	437760	416360	224008,3	290521,3	250260,3	250260,3	11,7
2700	3	444080	444000	229798,4	292038,7	255946,9	255946,9	11,4
3000	2,5	303532	299008	176577,0	225689,2	196819,9	196819,9	11,5
3100	2,5	299976	281776	172257,7	224631,5	191842,8	191842,8	11,4
3300	2	192332	195628	128625,1	163893,2	143430,1	143430,1	11,5
3500	2	175956	189336	121810,3	157640,4	141009,8	141009,8	15,8
3600	1,5	107140	121056	84738,8	107550,4	96504,7	96504,7	13,9
3700	1,5	106772	115252	82514,6	107378,3	93534,9	93534,9	13,4

Fonte: O autor (2021)

A partir da Tabela 9.1 podemos observar um erro relativo à carga de ruptura obtida nos ABAQUS variando entre 11% e 16%. A Tabela 9.2 mostra os resultados obtidos na seção S1 com furos considerando agora a área líquida.

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Tabela 9.2 MRD considerando a área líquida na seção S1 com furos e condição engastada

L(mm)	t(mm)	P _{cRD} (N)	P _{cRG} (N)	P _{ult} (N)	P _{nD} (N)	P _{nG} (N)	P _{ultMRD} (N)	Erro(%)
2800	3	437760	416360	224008,3	262703,8	225796,2	225796,2	0,8
2700	3	444080	444000	229798,4	263949,7	230185,1	230185,1	0,2
3000	2,5	303532	299008	176577,0	205786,2	179571,8	179571,8	1,7
3100	2,5	299976	281776	172257,7	204884,9	175656,7	175656,7	2,0
3300	2	192332	195628	128625,1	150705,0	132945,6	132945,6	3,4
3500	2	175956	189336	121810,3	145204,8	131002,9	131002,9	7,5
3600	1,5	107140	121056	84738,8	100110,4	91302,6	91302,6	7,7
3700	1,5	106772	115252	82514,6	99955,0	88836,5	88836,5	7,7

Fonte: O autor (2021)

A partir da Tabela 9.2 podemos observar uma melhora significativa nos resultados se comparado ao MRD utilizando a área bruta, com erro variando entre 0,2% e 7,7%. A Tabela 9.3 agora mostra os resultados do MRD considerando a interação D-G e utilizando a área líquida.

Tabela 9.3 MRD considerando a área líquida e interação D-G na seção S1 com furos e condição engastada

L(mm)	t(mm)	P _{cRD} (N)	P _{cRG} (N)	P _{ult} (N)	P _{nDG} (N)	P _{nGD} (N)	P _{ultMRD} (N)	Erro(%)
2800	3	437760	416360	224008,3	210980,4	201732,2	201732,2	9,9
2700	3	444080	444000	229798,4	214821,8	205806,9	205806,9	10,4
3000	2,5	303532	299008	176577,0	161764,3	154281,5	154281,5	12,6
3100	2,5	299976	281776	172257,7	158702,3	151125,7	151125,7	12,3
3300	2	192332	195628	128625,1	114152,0	109168,0	109168,0	15,1
3500	2	175956	189336	121810,3	109707,9	105335,7	105335,7	13,5
3600	1,5	107140	121056	84738,8	72843,8	70820,1	70820,1	16,4
3700	1,5	106772	115252	82514,6	71506,8	69527,5	69527,5	15,7

Fonte: O autor (2021)

A partir da Tabela 9.3 podemos observar uma piora nos resultados ao se considerar a interação D-G no MRD comparando com os resultados obtidos utilizando apenas a área líquida, com o erro variando entre 10% e 16%.

A Tabela 9.4 mostra os resultados obtidos da formulação do MRD com furos para a seção S1. Nessa formulação, o MRD apresentou resultados razoáveis com erro variando entre 11% e 15%.

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

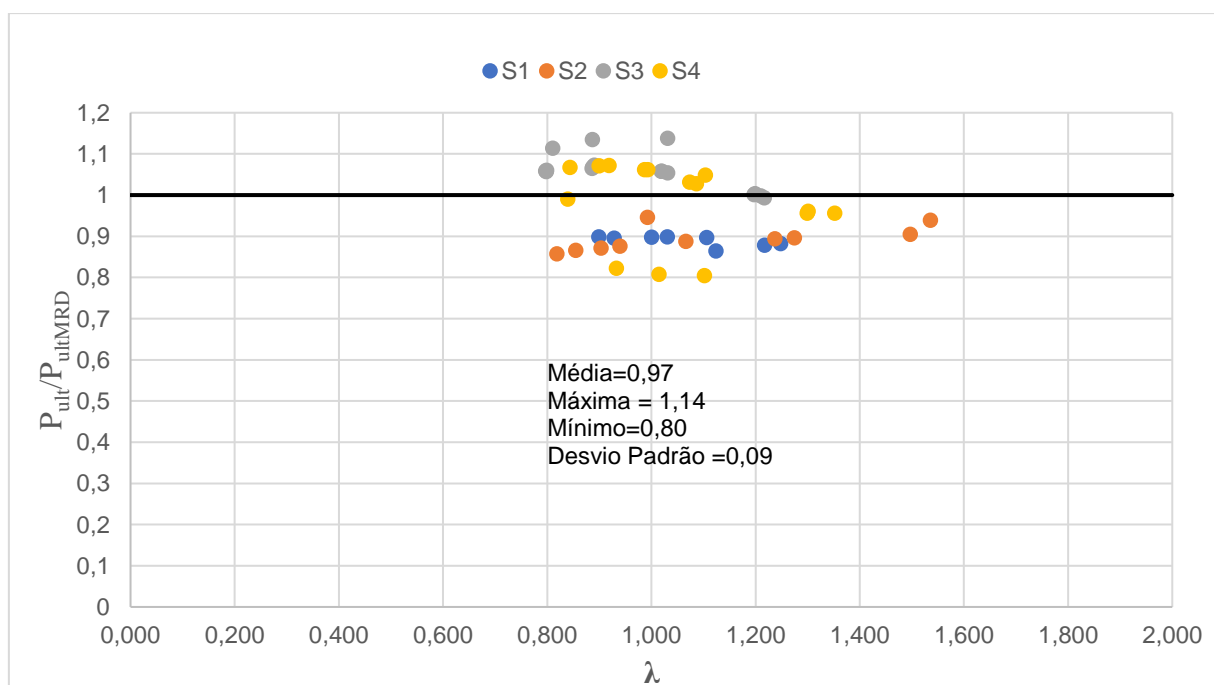
Tabela 9.4 MRD com furos na seção S1 e condição engastada

L(mm)	t(mm)	P _{CRD} (N)	P _{CRG} (N)	P _{ult} (N)	P _{nD} (N)	P _{nG} (N)	P _{ultMRD} (N)	ERRO(%)
2800	3	437760	416360	224008,3	270145,7	250260,3	250260,3	11,7
2700	3	444080	444000	229798,4	270716,0	255946,9	255946,9	11,4
3000	2,5	303532	299008	176577,0	220136,0	196819,9	196819,9	11,5
3100	2,5	299976	281776	172257,7	219706,1	191842,8	191842,8	11,4
3300	2	192332	195628	128625,1	163893,2	143430,1	143430,1	11,5
3500	2	175956	189336	121810,3	157640,4	141009,8	141009,8	15,8
3600	1,5	107140	121056	84738,8	107550,4	96504,7	96504,7	13,9
3700	1,5	106772	115252	82514,6	107378,3	93534,9	93534,9	13,4

Fonte: O autor (2021)

A Figura 9.1 mostra por meio de um gráfico os resultados do MRD obtidos para todas as seções perfuradas considerando a área bruta para cálculo. Nesse gráfico, o eixo y é representado pela relação de carga última obtida via ABAQUS e carga última obtida pelo MRD, e no eixo x a esbelteza de cada seção. No gráfico também estão dispostos os valores de média, valor máximo e mínimo e o desvio padrão de cada análise

Figura 9.1 Resultados MRD condição engastada, considerando área bruta

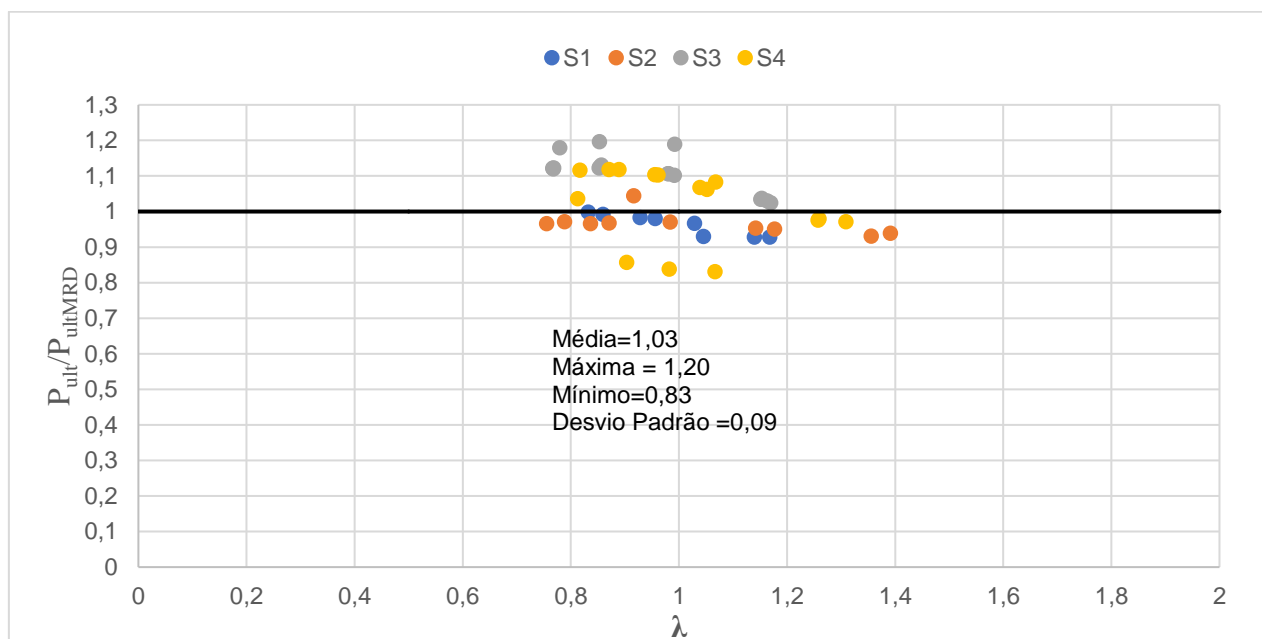


Fonte: O autor (2021)

Pela Figura 9.1 podemos observar que a linha horizontal com valor de 1 corresponde as seções onde os valores obtidos de carga de ruptura pela análise não linear e pelo MRD possuem

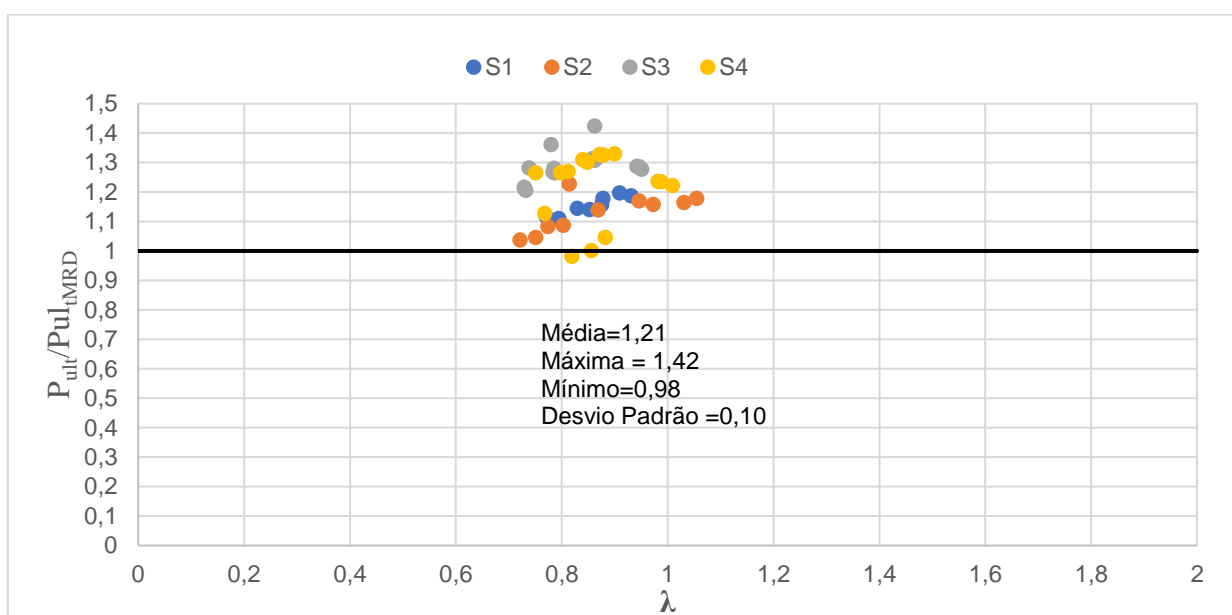
valores iguais, ou seja, uma razão igual a 1. Logo, quanto mais perto dessa linha, melhores são os resultados do MRD. Pela Figura 9.1 podemos observar que os resultados variaram entre 0,8 e 1,15. A Figura 9.2 mostra os resultados do MRD obtidos para todas as seções considerando a área líquida.

Figura 9.2 Resultados MRD condição engastada, considerando área líquida



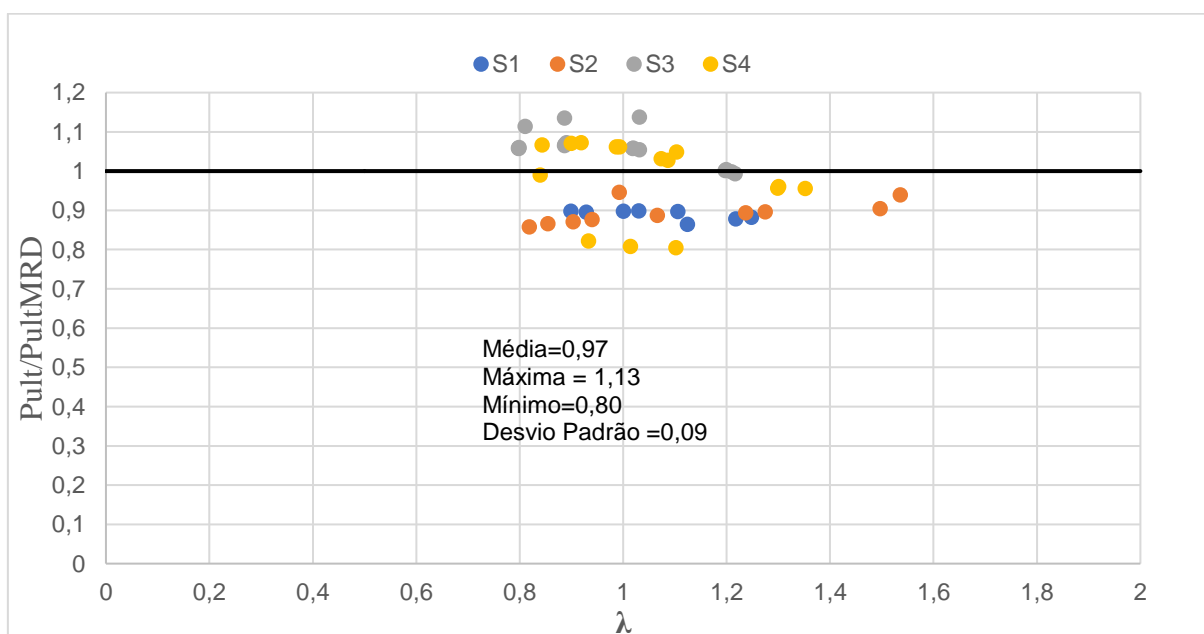
Fonte: O autor (2021)

Pela Figura 9.2 podemos observar uma melhora nos resultados, onde mais análises se aproximaram da linha horizontal, principalmente os resultados obtidos pelas seções S1 e S2, sendo que para essas seções variaram entre 0,9 e 1,1. A Figura 9.3 mostra os resultados do MRD obtidos considerando a área líquida e a interação D-G, onde podemos observar uma piora nos resultados.

Figura 9.3 Resultados MRD condição engastada, considerando área líquida e interação D-G

Fonte: O autor (2021)

Por fim, a Figura 9.4 mostra os resultados obtidos pelo pela formulação do MRD com furos pontuais.

Figura 9.4 Resultados MRD com furos pontuais condição engastada

Fonte: O autor (2021)

Podemos observar pela Figura 9.4 que a metodologia do MRD com furos apresentou bons resultados, com média de 0,97, e variando entre 0,8 e 1,13. Também que grande parte dos

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

resultados ficou abaixo de 1, ou seja, os resultados obtidos pelo ABAQUS foram menores que os obtidos pelo MRD.

O MRD também foi calculado considerando as seções sem furos, os resultados do MRD para a seção S1 sem furos considerando a área bruta e a interação D-G estão contidas nas Tabelas 9.5 e 9.6

Tabela 9.5 MRD na seção S1 sem furos e condição engastada

L(mm)	t(mm)	P_{cRD} (N)	P_{cRG} (N)	P_{ult} (N)	P_{nD} (N)	P_{nG} (N)	P_{ultMRD}(N)	Erro(%)
2800	3	499760	540040	303612,4	304354,7	271825,7	271825,7	10,5
2700	3	549920	533600	308343,0	313981,6	270914,3	270914,3	12,1
3000	2,5	375316	358972	240790,0	244604,4	211082,6	211082,6	12,3
3100	2,5	369652	338168	236443,6	243266,5	206600,7	206600,7	12,6
3300	2	237504	235152	175944,4	178959,9	156322,7	156322,7	11,2
3500	2	233148	211048	165136,8	177630,9	148898,5	148898,5	9,8
3600	1,5	131764	145844	113658,8	118149,5	107241,6	107241,6	5,6
3700	1,5	131452	138720	110073,8	118025,5	104441,4	104441,4	5,1

Fonte: O autor (2021)

Tabela 9.6 MRD na seção S1 sem furos e condição engastada considerando a interação D-G

L(mm)	t(mm)	P_{cRD} (N)	P_{cRG} (N)	P_{ult} (N)	P_{nDG} (N)	P_{nGD} (N)	P_{ultMRD}(N)	Erro(%)
2800	3	499760	540040	303612,4	250595,3	240400,9	240400,9	20,8
2700	3	549920	533600	308343,0	255905,8	245439,5	245439,5	20,4
3000	2,5	375316	358972	240790,0	192864,1	183909,0	183909,0	23,6
3100	2,5	369652	338168	236443,6	189089,9	180019,8	180019,8	23,9
3300	2	237504	235152	175944,4	136357,9	130142,3	130142,3	26,0
3500	2	233148	211048	165136,8	131109,7	124889,6	124889,6	24,4
3600	1,5	131764	145844	113658,8	87019,4	84173,4	84173,4	25,9
3700	1,5	131452	138720	110073,8	85487,2	82664,5	82664,5	24,9

Fonte: O autor (2021)

Podemos observar pelas Tabelas 9.5 e 9.6 que os melhores resultados foram obtidos sem considerar a interação D-G, com erro variando 5% e 12,6%, enquanto que nos resultados obtidos considerando a interação, o erro variou entre 20,4% e 26%.

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

9.2 APLICAÇÃO DO MRD NA CONDIÇÃO APOIADA COM TORÇÃO RESTRINGIDA

A Tabela 9.7 mostra os resultados do MRD obtidos na seção S3 considerando a área bruta na determinação do MRD para a condição apoiada com torção restringida.

Tabela 9.7 MRD considerando a área bruta na seção S3 com condição apoiada com torção restringida

L(mm)	t(mm)	Tipo	P_{CRD} (N)	P_{CRG} (N)	P_{ult} (N)	P_{nD} (N)	P_{nG} (N)	P_{MRD}(N)	Erro(%)
1402,8	3	20%	501489	423059	186316,9	253397,0	209839,3	209839,3	12,6
1503	2,5	20%	341139	306067	153057,5	198906,8	167772,4	167772,4	9,6
1703,4	2	20%	210327	192101	112904,1	145240,4	123126,4	123126,4	9,1
2004	1,5	20%	113568	105087	70940,4	95391,8	79598,4	79598,4	12,2
1402,8	3	30%	492196	423562	155428,5	252128,6	209907,2	209907,2	35,1
1503	2,5	30%	335127	306025	126298,2	197765,2	167765,1	167765,1	32,8
1703,4	2	30%	206388	192062	98209,9	144204,6	123116,4	123116,4	25,4
2004	1,5	30%	111248	105051	62838,8	94549,8	79583,4	79583,4	26,6
1402,8	3	40%	492196	423562	165317,4	252128,6	209907,2	209907,2	27,0
1536,4	2,5	40%	325820	294870	131398,3	195940,0	165783,2	165783,2	26,2
1736,8	2	40%	200525	185762	95554,2	142622,4	121455,7	121455,7	27,1
2004	1,5	40%	111265	104529	58119,7	94556,0	79365,5	79365,5	36,6
1419,5	3	50%	473781	414472	185902,6	249480,4	208657,1	208657,1	12,2
1503	2,5	50%	324329	303929	147159,0	195640,9	167402,1	167402,1	13,8
1753,5	2	50%	194760	182204	88295,4	141017,6	120477,7	120477,7	36,4
2004	1,5	50%	108905	104529	60033,4	93683,7	79365,5	79365,5	32,2
1400	3	s/ furos	544922	458361	230609,3	258755,3	214292,8	214292,8	7,1
1500	2,5	s/ furos	369426	332202	186720,9	203904,4	171969,7	171969,7	7,9
1700	2	s/ furos	228339	208479	138729,2	149712,2	127060,4	127060,4	8,4
2000	1,5	s/ furos	123761	113967	89245,9	98918,1	83076,5	83076,5	6,9

Fonte: O autor (2021)

Pela Tabela 9.7 podemos observar a grande variabilidade nos erros relativos à carga última obtidas no ABAQUS para os perfis com furos, com o erro variando entre 9% e 36%. Para os perfis sem furos, os resultados obtidos foram melhores, com erro variando entre 7% e 8,4%. A Tabela 9.8 agora mostra o MRD obtido para a seção S3 considerando a área líquida da seção transversal.

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Tabela 9.8 MRD considerando a área líquida na seção S3 com condição apoiada com torção restringida

L(mm)	t(mm)	Tipo	P_{cRD} (N)	P_{cRG} (N)	P_{ult} (N)	P_{nD} (N)	P_{nG} (N)	P_{ultMRD}(N)	Erro(%)
1402,8	3	20%	501489	423059	186316,9	239037,0	198095,3	198095,3	6,3
1503	2,5	20%	341139	306067	153057,5	188500,3	158876,1	158876,1	3,8
1703,4	2	20%	210327	192101	112904,1	138263,6	117355,2	117355,2	3,9
2004	1,5	20%	113568	105087	70940,4	91189,1	76718,6	76718,6	8,1
1402,8	3	30%	492196	423562	155428,5	237953,3	198154,6	198154,6	27,5
1503	2,5	30%	335127	306025	126298,2	187484,4	158869,7	158869,7	25,8
1703,4	2	30%	206388	192062	98209,9	137316,0	117346,4	117346,4	19,5
2004	1,5	30%	111248	105051	62838,8	90404,1	76705,2	76705,2	22,1
1402,8	3	40%	492196	423562	165317,4	237953,3	198154,6	198154,6	19,9
1536,4	2,5	40%	325820	294870	131398,3	185854,9	157133,1	157133,1	19,6
1736,8	2	40%	200525	185762	95554,2	135865,8	115881,7	115881,7	21,3
2004	1,5	40%	111265	104529	58119,7	90409,9	76511,0	76511,0	31,6
1419,5	3	50%	473781	414472	185902,6	235673,9	197062,9	197062,9	6,0
1503	2,5	50%	324329	303929	147159,0	185587,3	158551,7	158551,7	7,7
1753,5	2	50%	194760	182204	88295,4	134392,0	115018,4	115018,4	30,3
2004	1,5	50%	108905	104529	60033,4	89595,9	76511,0	76511,0	27,4

Fonte: O autor (2021)

Considerando a área líquida na aplicação do MRD, observou-se uma melhora nos resultados se comparados a aplicação do MRD com área bruta. No entanto, ainda se observa uma grande variabilidade com o erro variando entre 3% e 30%. Por fim, o MRD foi aplicado considerando a interação D-G e a área líquida nos cálculos, que está mostrado na Tabela 9.9

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Tabela 9.9 MRD considerando a área líquida e interação D-G na seção S3 com condição apoiada com torção restringida

L(mm)	t(mm)	Tipo	P_{CRD} (N)	P_{CRG} (N)	P_{ult} (N)	P_{nDG} (N)	P_{nGD}(N)	P_{ultMRD}(N)	Erro(%)
1402,8	3	20%	501489	423059	186316,9	194899,0	188694,4	188694,4	1,3
1503	2,5	20%	341139	306067	153057,5	151926,2	145667,0	145667,0	4,8
1703,4	2	20%	210327	192101	112904,1	107457,5	102300,3	102300,3	9,4
2004	1,5	20%	113568	105087	70940,4	66367,3	63417,4	63417,4	10,6
1402,8	3	30%	492196	423562	155428,5	194439,7	188093,0	188093,0	21,0
1503	2,5	30%	335127	306025	126298,2	151352,5	145078,2	145078,2	14,9
1703,4	2	30%	206388	192062	98209,9	106898,6	101803,0	101803,0	3,7
2004	1,5	30%	111248	105051	62838,8	65916,1	63060,6	63060,6	0,4
1402,8	3	40%	492196	423562	165317,4	194439,7	188093,0	188093,0	13,8
1536,4	2,5	40%	325820	294870	131398,3	149139,6	142758,8	142758,8	8,6
1736,8	2	40%	200525	185762	95554,2	105087,9	100037,1	100037,1	4,7
2004	1,5	40%	111265	104529	58119,7	65807,0	62949,8	62949,8	8,3
1419,5	3	50%	473781	414472	185902,6	192411,0	185760,1	185760,1	0,1
1503	2,5	50%	324329	303929	147159,0	150030,5	143731,5	143731,5	2,3
1753,5	2	50%	194760	182204	88295,4	103665,0	98695,7	98695,7	11,8
2004	1,5	50%	108905	104529	60033,4	65344,2	62586,8	62586,8	4,3

Fonte: O autor (2021)

Considerando a área líquida e a interação D-G na aplicação do MRD foram observados os melhores resultados para a condição apoiada com torção restringida como pode ser observado na Tabela 9.9, sendo que o erro variou entre 1% e 21%.

Por fim, a Tabela 9.10 mostra os resultados da formulação do MRD com furos para a seção S3.

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

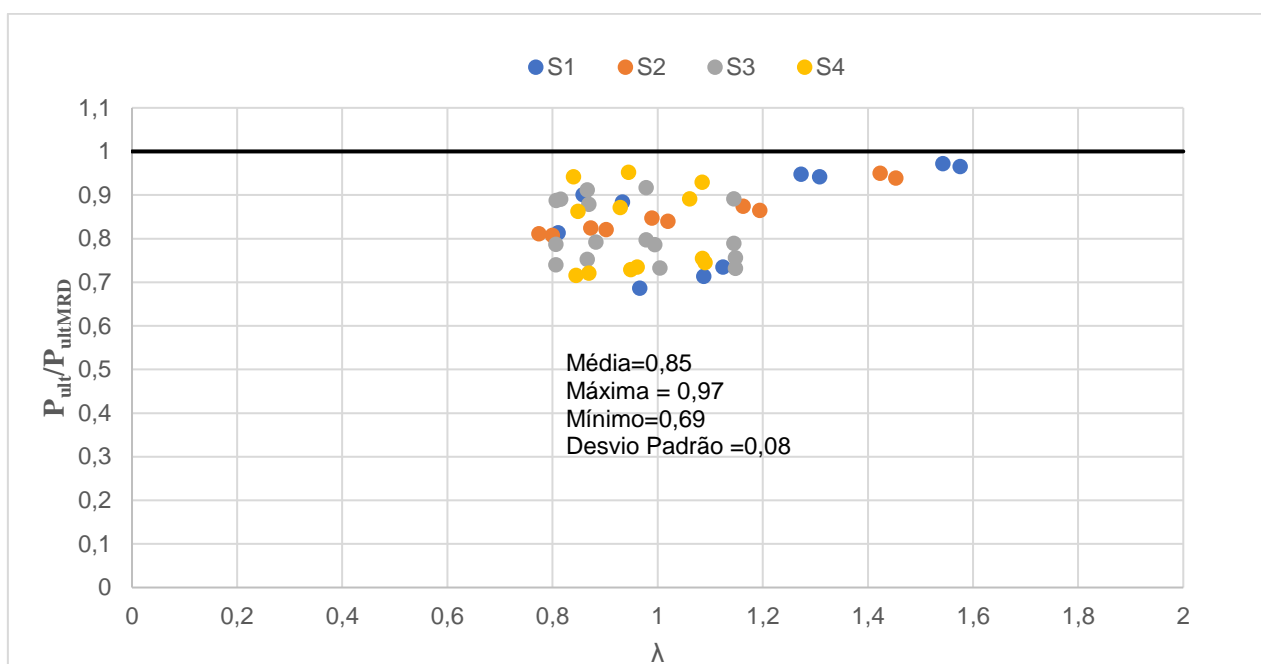
Tabela 9.10 MRD com furos na seção S3 com condição apoiada com torção restringida

L(mm)	t(mm)	P_{CRD} (N)	P_{CRG} (N)	P_{ult}(N)	P_{nD} (N)	P_{nG} (N)	P_{ultMRD} (N)	ERRO(%)
1402,8	3	501489	423059	186316,9	244008,0	209839,3	209839,3	12,6
1503	2,5	341139	306067	153057,5	200103,4	167772,4	167772,4	9,6
1703,4	2	210327	192101	112904,1	156350,4	123126,4	123126,4	9,1
2004	1,5	113568	105087	70940,4	113170,0	79598,4	79598,4	12,2
1402,8	3	492196	423562	155428,5	243666,3	209907,2	209907,2	35,1
1503	2,5	335127	306025	126298,2	199803,9	167765,1	167765,1	32,8
1703,4	2	206388	192062	98209,9	156060,2	123116,4	123116,4	25,4
2004	1,5	111248	105051	62838,8	112889,7	79583,4	79583,4	26,6
1402,8	3	492196	423562	165317,4	243666,3	209907,2	209907,2	27,0
1536,4	2,5	325820	294870	131398,3	199324,0	165783,2	165783,2	26,2
1736,8	2	200525	185762	95554,2	155612,4	121455,7	121455,7	27,1
2004	1,5	111265	104529	58119,7	112891,8	79365,5	79365,5	36,6
1419,5	3	473781	414472	185902,6	242959,8	208657,1	208657,1	12,2
1503	2,5	324329	303929	147159,0	199245,2	167402,1	167402,1	13,8
1753,5	2	194760	182204	88295,4	155152,5	120477,7	120477,7	36,4
2004	1,5	108905	104529	60033,4	112597,7	79365,5	79365,5	32,2

Fonte: O autor (2021)

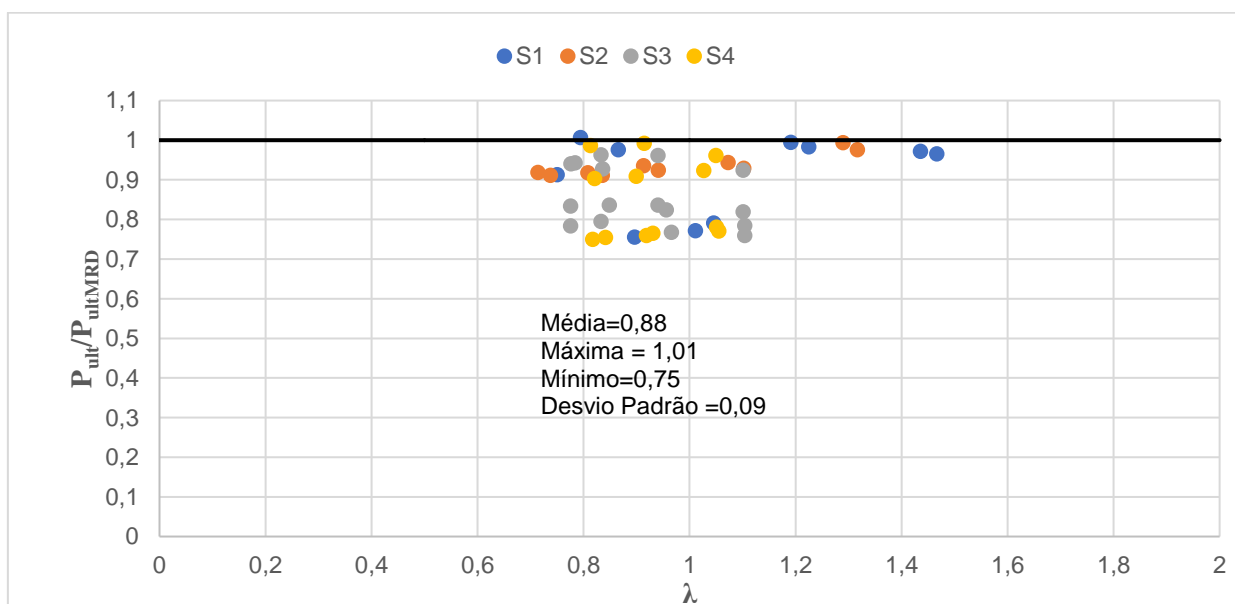
As Figuras 9.5, 9.6, 9.7 e 9.8 mostram os resultados obtidos do MRD comparando com valores de carga obtidos pelo ABAQUS considerando o MRD utilizando a área bruta, área líquida e a interação D-G, e o MRD com furos, respectivamente.

Figura 9.5. Resultados MRD para condição apoiada com torção restringida, considerando área bruta



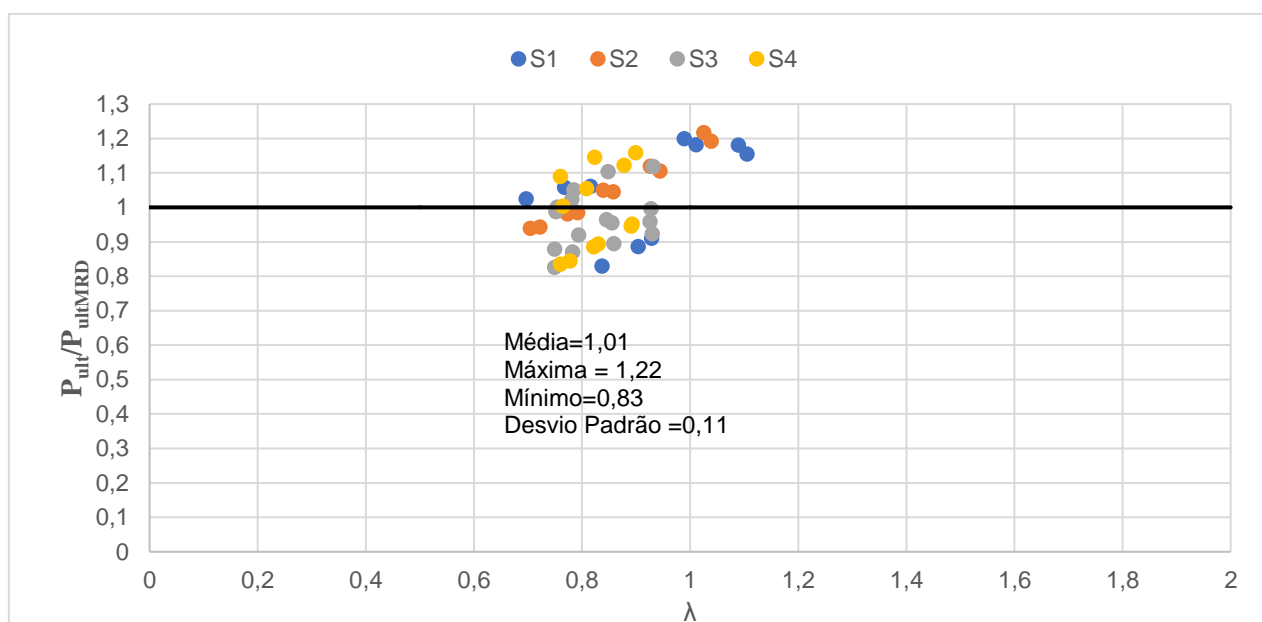
Fonte: O autor (2021)

Figura 9.6. Resultados MRD para condição apoiada com torção restringida, considerando área líquida



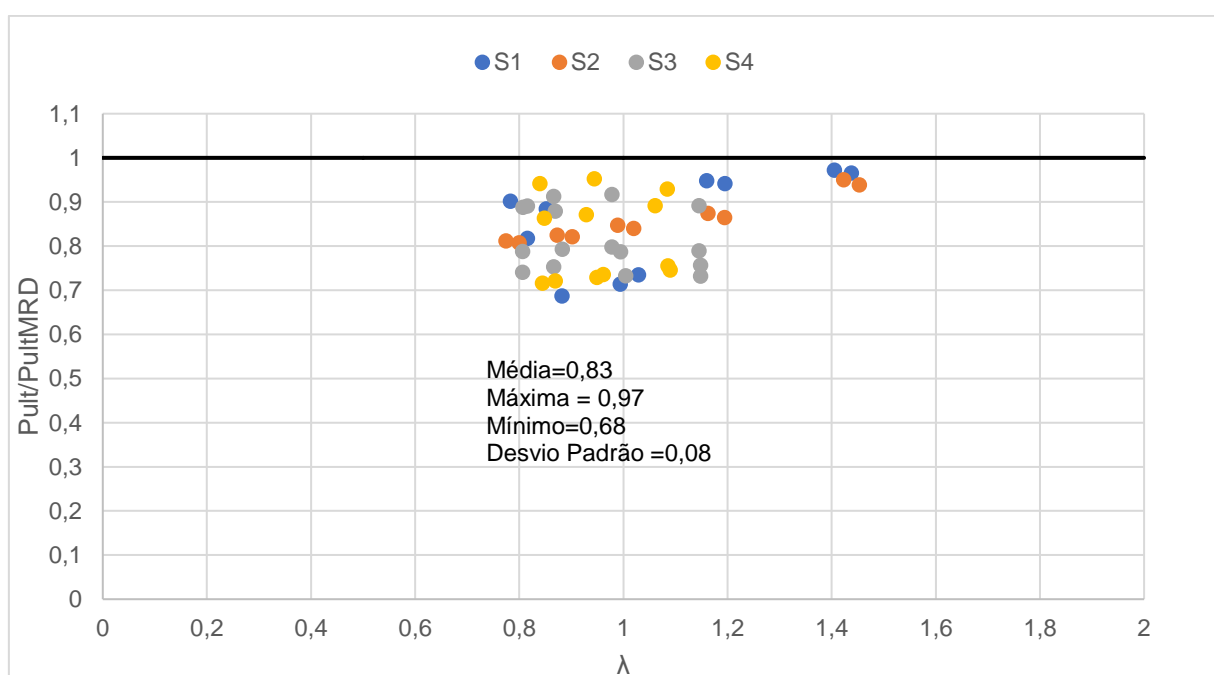
Fonte: O autor (2021)

Figura 9.7 Resultados MRD para condição apoiada com torção restringida, considerando área líquida e interação D-G



Fonte: O autor (2021)

Figura 9.8 Resultados MRD com furos para condição apoiada com torção restringida,



Fonte: O autor (2021)

Podemos observar que pela Figuras 9.5, 9.6, 9.7 e 9.8 que os melhores resultados obtidos considerando apenas a área líquida e também quando considerado a interação D-G. No caso dos resultados obtidos com interação, foi obtido uma média de 1,01 e resultados

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

variando entre 0,8 e 1,2. No caso do MRD considerando apenas a área líquida, os resultados variaram entre 0,75 e 1,01.

9.3 APLICAÇÃO DO MRD NA CONDIÇÃO APOIADA

A Tabela 9.11 mostra os resultados do MRD obtidos na seção S2 com furos considerando a área bruta na determinação do MRD para condição apoiada.

Tabela 9.11 MRD considerando a área bruta na seção S2 com furos e condição apoiada

L(mm)	t(mm)	P _{CRD} (N)	P _{CRG} (N)	P _{ult} (N)	P _{nD} (N)	P _{nG} (N)	P _{ultMRD} (N)	Erro(%)
1000	3	414962,6	436822,1	244077,7	269329,1	239884,1	239884,1	1,7
1100	3	460320,9	382940,8	234257,5	279198,8	229487,9	229487,9	2,0
1100	2,5	330686,7	310024,6	192673,1	220850,0	189246,8	189246,8	1,8
1200	2,5	313800,8	267103,7	191808,3	216588,2	178328,2	178328,2	7,0
1200	2	211150,1	206326,9	150954,8	161906,3	140488,5	140488,5	6,9
1300	2	199962,5	180390,2	149924,9	158333,0	131790,5	131790,5	12,1
1400	1,5	113995,0	115321,3	108175,9	105469,1	90512,5	90512,5	16,3
1500	1,5	109948,5	101419,6	106381,0	103762,6	83406,6	83406,6	21,6
1800	1	48269,0	46525,2	62084,3	56755,8	40802,6	40802,6	34,3
1900	1	46767,7	42365,1	60334,0	55878,7	37154,2	37154,2	38,4

Fonte: O autor (2021)

Os resultados obtidos no MRD com a condição apoiada foram os piores considerando todas as condições de apoio, com grande variabilidade e altos valores de erro relativo comparado aos valores de carga última obtidos pela análise não linear. Na Tabela 9.11, considerando a área bruta da seção temos que o erro variou entre 2% e 38%. Os resultados obtidos com a área brutas foram melhores que os obtidos com a área líquida e a interação D-G. A Tabela 9.12 mostra os resultados obtidos com o MRD utilizando a área líquida.

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Tabela 9.12 MRD considerando a área líquida na seção S2 com furos e condição apoiada

L(mm)	t(mm)	P_{CRD} (N)	P_{CRG} (N)	P_{ult} (N)	P_{nD} (N)	P_{nG} (N)	P_{ultMRD}(N)	Erro(%)
1000	3	414962,6	436822,1	244077,7	242165,5	213974,6	213974,6	12,3
1100	3	460320,9	382940,8	234257,5	250045,5	206054,6	206054,6	12,0
1100	2,5	330686,7	310024,6	192673,1	200015,7	171181,4	171181,4	11,2
1200	2,5	313800,8	267103,7	191808,3	196478,7	162668,3	162668,3	15,2
1200	2	211150,1	206326,9	150954,8	146920,0	127851,7	127851,7	15,3
1300	2	199962,5	180390,2	149924,9	143881,3	121074,6	121074,6	19,2
1400	1,5	113995,0	115321,3	108175,9	96428,8	84242,2	84242,2	22,1
1500	1,5	109948,5	101419,6	106381,0	94934,3	78572,6	78572,6	26,1
1800	1	48269,0	46525,2	62084,3	51251,0	40043,8	40043,8	35,5
1900	1	46767,7	42365,1	60334,0	50484,9	36986,1	36986,1	38,7

Fonte: O autor (2021)

Na Tabela 9.12 podemos observar que o erro aumentou para praticamente todas as seções, variando entre 12% e 40%. O MRD considerando a interação D-G e a área bruta da seção é mostrado na Tabela 9.13, onde podemos observar que o erro novamente aumentou, variando entre 12,2% e 49,6%.

Tabela 9.13 MRD considerando a área bruta e interação D-G na seção S2 com furos e condição apoiada

L(mm)	t(mm)	P_{CRD} (N)	P_{CRG} (N)	P_{ult} (N)	P_{nDG} (N)	P_{nGD} (N)	P_{ultMRD}(N)	Erro(%)
1000	3	414962,6	436822,1	244077,7	217519,6	208069,2	208069,2	14,8
1100	3	460320,9	382940,8	234257,5	216180,1	205770,7	205770,7	12,2
1100	2,5	330686,7	310024,6	192673,1	172087,2	163911,1	163911,1	14,9
1200	2,5	313800,8	267103,7	191808,3	162473,6	154254,7	154254,7	19,6
1200	2	211150,1	206326,9	150954,8	122126,1	116580,0	116580,0	22,8
1300	2	199962,5	180390,2	149924,9	114910,0	109653,8	109653,8	26,9
1400	1,5	113995,0	115321,3	108175,9	74103,4	71925,1	71925,1	33,5
1500	1,5	109948,5	101419,6	106381,0	69396,3	67618,8	67618,8	36,4
1800	1	48269,0	46525,2	62084,3	32651,4	34061,6	32651,4	47,4
1900	1	46767,7	42365,1	60334,0	30412,5	32172,9	30412,5	49,6

Fonte: O autor (2021)

A Tabela 9.14 mostra os resultados obtidos na seção S2 considerando a formulação do MRD com furos, onde na tabela também podemos observar a alta variabilidade dos resultados, com erro variando entre 11% e 39%.

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

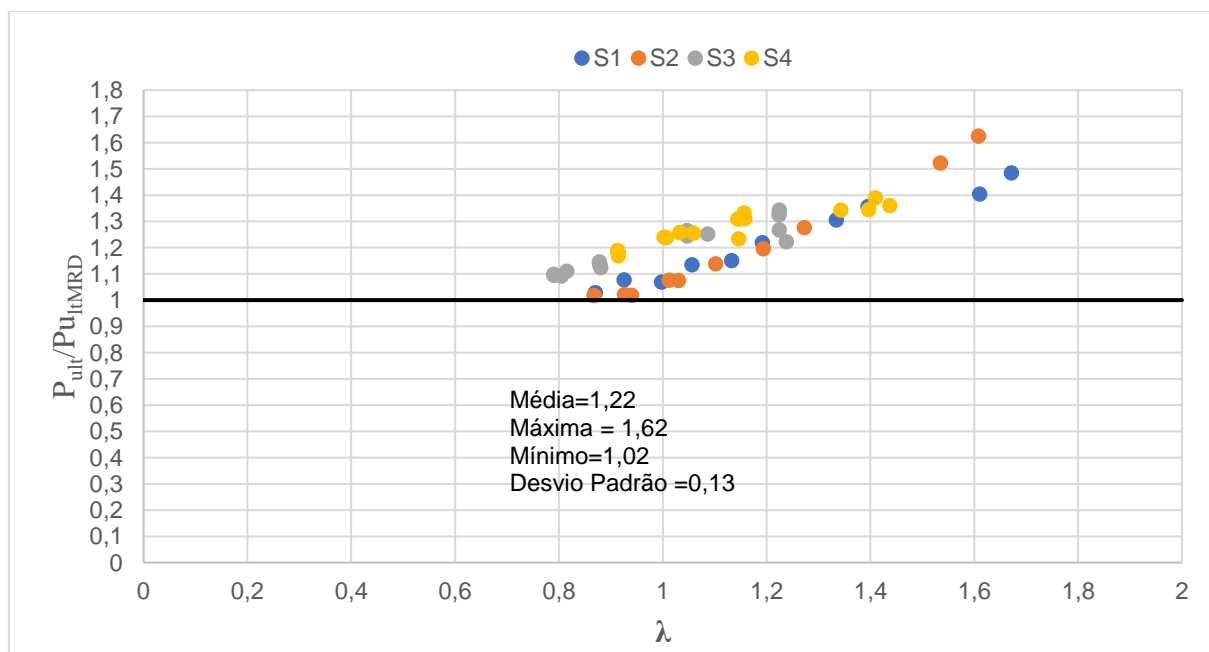
Tabela 9.14 MRD considerando a área bruta e interação D-G na seção S2 com furos e condição apoiada

L(mm)	t(mm)	P _{CRD} (N)	P _{CRG} (N)	P _{ult} (N)	P _{nD} (N)	P _{nG} (N)	P _{ultMRD} (N)	ERRO (%)
1000	3	414962,6	436822,1	244077,7	246355,2	213974,6	213974,6	12,3
1100	3	460320,9	382940,8	234257,5	249996,3	206054,6	206054,6	12,0
1100	2,5	330686,7	310024,6	192673,1	206334,8	171181,4	171181,4	11,2
1200	2,5	313800,8	267103,7	191808,3	204710,7	162668,3	162668,3	15,2
1200	2	211150,1	206326,9	150954,8	157560,2	127851,7	127851,7	15,3
1300	2	199962,5	180390,2	149924,9	156043,5	121074,6	121074,6	19,2
1400	1,5	113995,0	115321,3	108175,9	105469,1	84242,2	84242,2	22,1
1500	1,5	109948,5	101419,6	106381,0	103762,6	78572,6	78572,6	26,1
1800	1	48269,0	46525,2	62084,3	56755,8	40043,8	40043,8	35,5
1900	1	46767,7	42365,1	60334,0	55878,7	36986,1	36986,1	38,7

Fonte: O autor (2021)

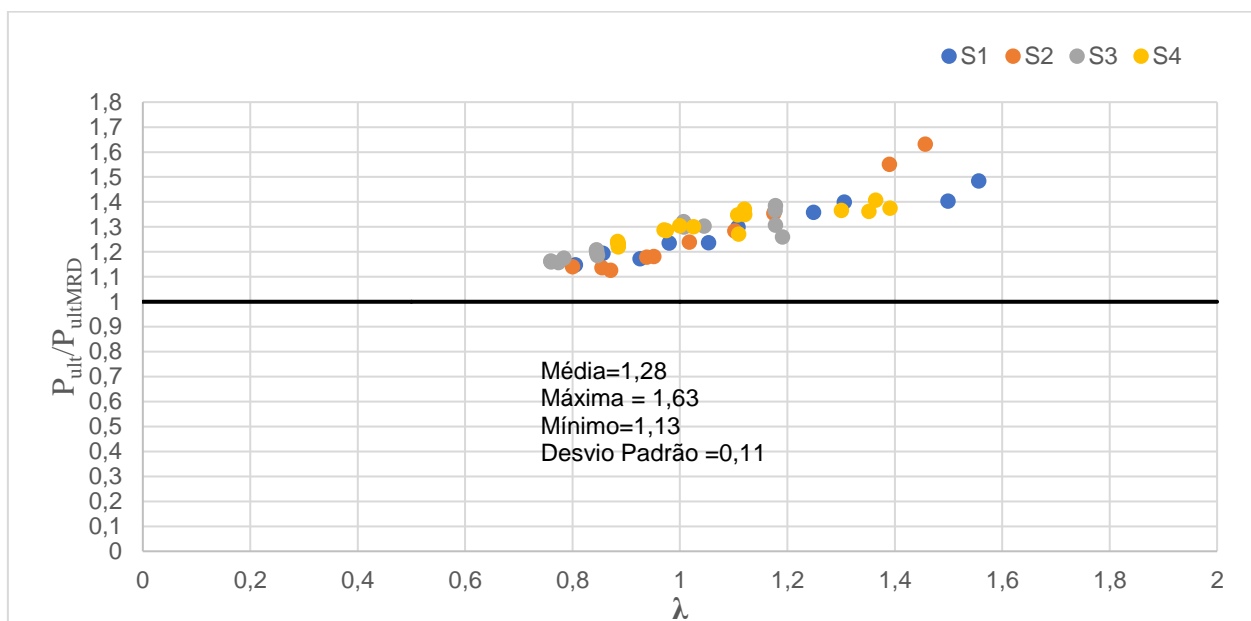
As Figuras 9.9, 9.10 e 9.12 e 9.12 mostram os resultados obtidos do MRD comparando com valores de carga obtidos pelo ABAQUS considerando o MRD utilizando a área bruta, área líquida e a interação D-G, respectivamente.

Figura 9.9 Resultados MRD para seção apoiada, considerando área bruta



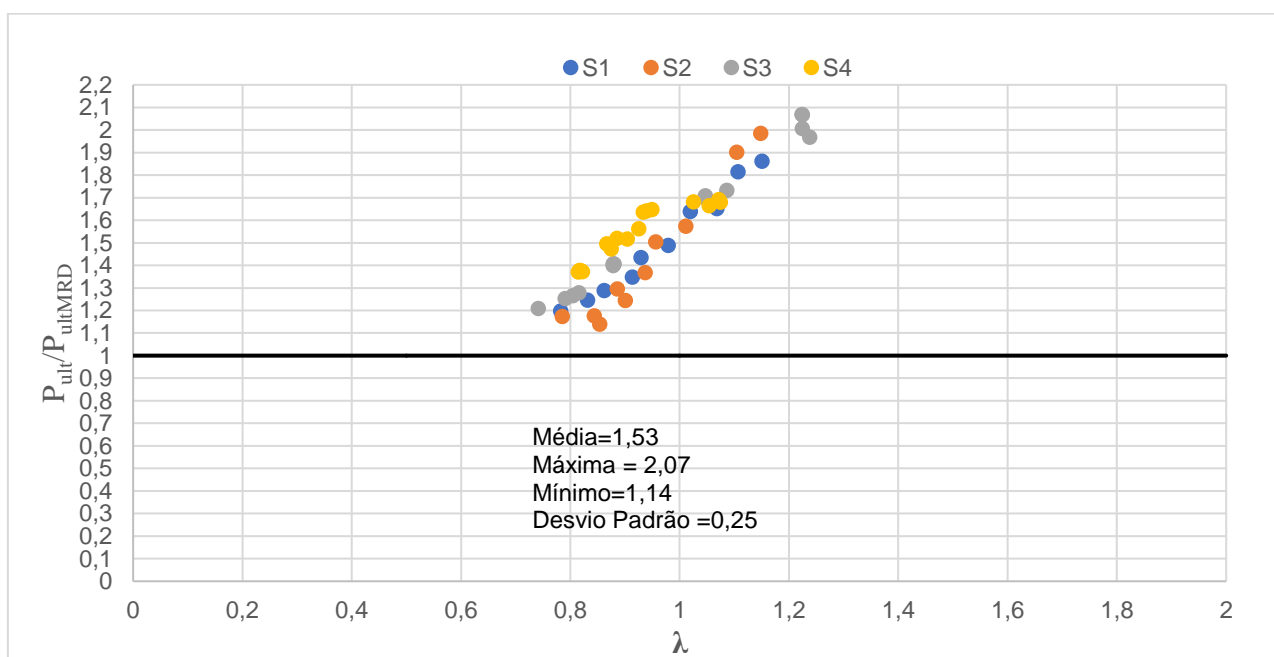
Fonte: O autor (2021)

Figura 9.10 Resultados MRD para seção apoiada, considerando área líquida

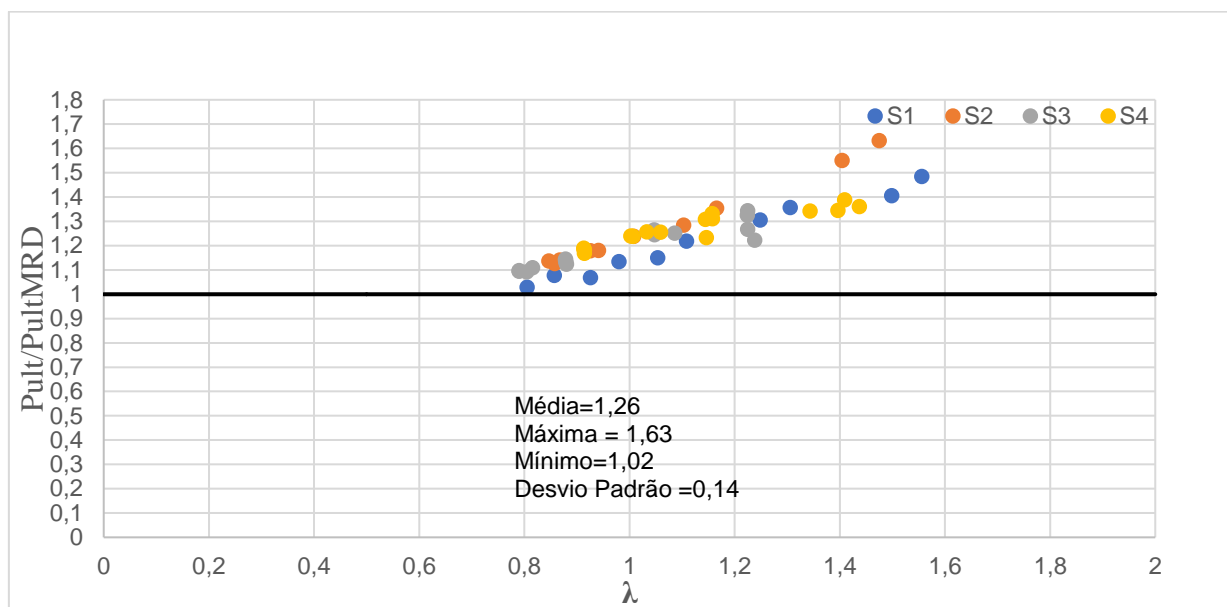


Fonte: O autor (2021)

Figura 9.11 Resultados MRD para seção apoiada, considerando área bruta e interação D-G



Fonte: O autor (2021)

Figura 9.12 Resultados MRD com furos para seção apoiada

Fonte: O autor (2021)

Observando as Figuras 9.9, 9.10, 9.11 e 9.12 podemos observar que na condição apoiada, o MRD teve seus piores resultados comparados aos obtidos pela análise não linear. Para todas as seções, o MRD considerando a área bruta e líquida tiveram resultados parecidos, com médias de 1,22 e 1,28, respectivamente. Além disso, variações entre 1,02 e 1,62 para a seção com área bruta, e entre 1,13 e 1,63 para a seção com área líquida.

Por fim, as Tabelas 9.15 e 9.16 mostram os resultados obtidos para a seção S2 sem furos, considerando a área bruta e posteriormente a interação D-G.

Tabela 9.15 MRD para seção S2 sem furos e condição apoiada

L(mm)	t(mm)	P _{CRD} (N)	P _{CRG} (N)	P _{ult} (N)	P _{nD} (N)	P _{nG} (N)	P _{ultMRD} (N)	Erro(%)
1000	3	414962,6	436822,1	244077,7	269329,1	239884,1	239884,1	1,7
1100	3	552874,1	458251,8	298299,9	295674,5	243445,0	243445,0	18,4
1100	2,5	390769,7	372450,1	243010,5	234120,9	201348,4	201348,4	17,1
1200	2,5	377936,4	319449,9	243769,3	231516,1	191323,1	191323,1	21,5
1200	2	247522,2	247522,2	189492,1	172338,5	151276,0	151276,0	20,2
1300	2	238514,4	215469,8	188630,9	169911,7	143163,5	143163,5	24,1
1400	1,5	136579,0	135031,7	133156,3	114168,6	98746,3	98746,3	25,8
1500	1,5	130853,2	120921,2	131395,2	112085,9	93047,6	93047,6	29,2
1800	1	57080,4	55539,2	73477,8	61563,9	47981,5	47981,5	34,7
1900	1	56061,1	50365,9	71747,0	61035,1	44080,2	44080,2	38,6

Fonte: O autor (2021)

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Tabela 9.16 MRD para seção S2 sem furos e interação D-G e condição apoiada

L(mm)	t(mm)	P_{CRD} (N)	P_{CRG} (N)	P_{ult} (N)	P_{nd} (N)	P_{nG} (N)	P_{ultMRD}(N)	Erro(%)
1000	3	414962,6	436822,1	244077,7	217519,6	208069,2	208069,2	14,8
1100	3	552874,1	458251,8	298299,9	235373,1	225698,7	225698,7	24,3
1100	2,5	390769,7	372450,1	243010,5	188184,7	179960,6	179960,6	25,9
1200	2,5	377936,4	319449,9	243769,3	179579,4	170939,9	170939,9	29,9
1200	2	247522,2	247522,2	189492,1	134986,8	128771,9	128771,9	32,0
1300	2	238514,4	215469,8	188630,9	128427,5	122147,0	122147,0	35,2
1400	1,5	136579,0	135031,7	133156,3	83527,5	80141,5	80141,5	39,8
1500	1,5	130853,2	120921,2	131395,2	79148,2	76042,9	76042,9	42,1
1800	1	57080,4	55539,2	73477,8	38475,9	38710,9	38475,9	47,6
1900	1	56061,1	50365,9	71747,0	36215,0	36753,6	36215,0	49,5

Fonte: O autor (2021)

Podemos observar pelas Tabelas 9.15 e 9.16 que os resultados do MRD obtidos para a seção sem furos também não foram satisfatórios, com erros chegando até 50%.

Nesta seção do Capítulo, o MRD foi aplicado e os resultados de carga de ruptura obtidos pelo método foram comparados com os resultados obtidos na análise não linear. Para os perfis com furos, foram aplicadas quatro diferentes formulações do método, inicialmente o MRD convencional foi aplicado considerando a área bruta da seção, posteriormente o mesmo MRD foi aplicado considerando a área líquida da seção, o MRD foi aplicado considerando a interação D-G nos perfis e utilizando a área líquida das seções, e por fim, foi aplicado as formulas d

Por fim, observando os resultados obtidos pelo MRD, podemos observar uma grande variabilidade nos resultados. Na condição apoiada foi observado os piores resultados do MRD comparados aos obtidos pela análise não linear, com erros chegando até 50%. Na condição engastada, os melhores resultados foram obtidos considerando a área líquida e a formulação do MRD com furos, enquanto que na condição apoiada com torção restringida bons resultados foram obtidos considerando a área líquida e também considerando a interação D-G.

9.4 APLICAÇÃO DA FORMULAÇÃO DE ESPESSURA EQUIVALENTE

Neste capítulo, as equações de espessura equivalente para as flambagens global e distorcional foram aplicadas para determinação das cargas críticas de flambagem elásticas desses respectivos modos nos perfis com furos, e seus valores foram comparados com os resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos via ABAQUS. Foi utilizada a formulação proposta por Casafont et al. (2012, 2013) para determinação das espessuras

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

equivalentes nos furos e utilização do CUFSM para determinação das cargas críticas. As cargas críticas de flambagem elásticas para os modos distorcional e global foram determinadas para as condições apoiada e engastada.

Inicialmente iremos mostrar os resultados obtidos com as seções S3 e S4, pois elas são seções mais simples com apenas furos retangulares na alma. Os resultados de carga crítica com a utilização da formulação de espessuras equivalentes obtidas no CUFSM para as seções S3 e S4 e condição apoiada estão mostradas nas Tabelas 9.17 e 9.17. Nas tabelas, P_{crG} é a carga crítica de flambagem global obtida pelo Abaqus, P_{crD} é a carga crítica de flambagem distorcional obtida pelo ABAQUS, T_{rD} e T_{rG} são as espessuras equivalentes nos furos para os modos distorcional e global, $P_{crD,teq}$ e $P_{crG,teq}$ são os valores de carga crítica de flambagem distorcional e global obtidos pela formulação da espessura equivalente utilizando o CUFSM.

Tabela 9.17 Formulação de espessura equivalente para a seção S3, condição apoiada

L (mm)	TIPO	t (mm)	P_{crG} (N)	P_{crD} (N)	T_{rD}	T_{rG}	$P_{crG,teq}$	$P_{crD,teq}$	ErroDist.(%)	Erro Global(%)
901,8	20%	3	441503,36	430958,90	2,36	1,40	424111,24	435072,82	0,95	3,94
1002	20%	2,5	297762,96	289369,36	1,97	1,17	285914,58	292839,92	1,20	3,98
1202	20%	2	167562,49	180554,21	1,57	0,93	161471,74	164493,40	8,90	3,63
1403	20%	1,5	91878,44	98210,37	1,18	0,70	88519,87	90320,88	8,03	3,66
901,8	30%	3	441162,37	421201,34	2,36	1,40	424111,24	435072,82	3,29	3,87
1002	30%	2,5	297684,27	282418,41	1,97	1,17	285914,58	292839,92	3,69	3,95
1202	30%	2	167562,49	175308,21	1,57	0,93	161471,74	164493,40	6,17	3,63
1403	30%	1,5	91941,40	95207,03	1,18	0,70	88519,87	90320,88	5,13	3,72
935,2	40%	3	414407,77	412256,91	2,36	1,40	400123,22	409198,39	0,74	3,45
1002	40%	2,5	297107,21	276359,28	1,97	1,17	285914,58	292839,92	5,96	3,77
1202	40%	2	167483,80	170909,43	1,57	0,93	161471,74	164493,40	3,75	3,59
1403	40%	1,5	91888,94	92326,98	1,18	0,70	88519,87	90320,88	2,17	3,67
918,5	50%	3	425791,59	404833,82	2,36	1,40	411900,54	421867,94	4,21	3,26
1002	50%	2,5	296320,31	270824,75	1,97	1,17	285914,58	292839,92	8,13	3,51
1253	50%	2	155690,79	167656,91	1,57	0,93	150664,81	153378,87	8,52	3,23
1420	50%	1,5	89879,72	88919,70	1,18	0,70	86737,97	88433,20	0,55	3,50

Fonte: O autor (2021)

Para a seção S3 podemos observar que a determinação da carga crítica com a utilização da espessura equivalente nos furos por meio do software CUFSM teve bons resultados. Para o modo de flambagem distorcional, ao comparar com os resultados de carga crítica obtido pelo ABAQUS, o erro variou entre 0,55% e 8,9%. Para a flambagem global, o erro variou entre 3,21% e 3,98%. Podemos observar que para as seções S3 e S4, colunas com mesma espessura

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

e diferentes tipos de furos, os valores de espessura equivalente são iguais, isso ocorre, pois, a relação L_{np}/L é igual para as todas as colunas.

Tabela 9.18 Formulação de espessura equivalente para a seção S4, condição apoiada

L (mm)	TIPO	t (mm)	P _{crG} (N)	P _{crD} (N)	T _{rD}	T _{rG}	P _{crG,teq}	P _{crD,teq}	Erro Dist.(%)	Erro Global(%)
1185,6	20%	3	404086,60	394698,00	2,36	1,40	380405,22	394852,09	0,04	5,86
1264,64	20%	2,5	284907,90	272793,78	1,97	1,17	273243,28	284835,11	4,41	4,09
1501,76	20%	2	169660,48	163895,44	1,57	0,93	158031,31	163198,54	0,43	6,85
1738,88	20%	1,5	92526,38	91191,88	1,18	0,70	87865,54	91087,09	0,11	5,04
1185,6	30%	3	395326,00	394384,00	2,36	1,40	380405,22	394852,09	0,12	3,77
1304,16	30%	2,5	266472,96	270580,08	1,97	1,17	260751,86	270698,73	0,04	2,15
1482	30%	2	165383,80	167578,66	1,57	0,93	161376,74	167487,77	0,05	2,42
1837,68	30%	1,5	91044,30	82830,06	1,18	0,70	80251,94	82710,13	0,14	11,85
1185,6	40%	3	387507,40	393630,40	2,36	1,40	380405,22	394852,09	0,31	1,83
1343,68	40%	2,5	260877,48	257043,54	1,97	1,17	248838,75	257436,24	0,15	4,61
1501,76	40%	2	161615,80	163653,66	1,57	0,93	158031,31	163198,54	0,28	2,22
1817,92	40%	1,5	88171,20	84352,96	1,18	0,70	81710,82	84301,63	0,06	7,33
1185,6	50%	3	380307,38	393630,40	2,36	1,40	380405,22	394852,09	0,31	0,03
1383,2	50%	2,5	255636,82	244389,34	1,97	1,17	237534,79	244996,23	0,25	7,08
1482	50%	2	157668,82	167010,32	1,57	0,93	161376,74	167487,77	0,29	2,35
1877,2	50%	1,5	84751,74	79664,94	1,18	0,70	77426,73	79647,42	0,02	8,64

Fonte: O autor (2021)

Pela Tabela 9.18, para a seção S4 considerando a condição apoiada, os melhores resultados foram obtidos para o modo distorcional, com erro variando entre 0,02% e 4,41%. Para o modo global, o erro variou entre 0,03% e 11,85%.

Os resultados de carga crítica obtidas no CUFMSM para as seções S3 e S4 e condição engastada estão mostradas nas Tabelas 9.19 e 9.20.

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Tabela 9.19 Formulação de espessura equivalente para a seção S3, condição engastada

L (mm)	TIPO	t (mm)	P _{crG} (N)	P _{crD} (N)	T _{rD}	T _{rG}	P _{crG,teq}	P _{crD,teq}	Erro Dist.(%)	Erro Global(%)
1803,6	20%	3	432450,00	444600,00	2,36	1,40	375446,91	446136,37	0,35	13,18
2004	20%	2,5	291532,50	297742,50	1,97	1,17	270682,30	300508,78	0,93	7,15
2304,6	20%	2	176589,00	183006,00	1,57	0,93	152439,06	181928,26	0,59	13,68
2705,4	20%	1,5	95820,75	98982,00	1,18	0,70	82210,59	98689,92	0,30	14,20
1803,6	30%	3	433440,00	437962,50	2,36	1,40	375446,91	446136,37	1,87	13,38
2004	30%	2,5	292230,00	293062,50	1,97	1,17	270682,30	300508,78	2,54	7,37
2304,6	30%	2	177050,25	179835,75	1,57	0,93	152439,06	181928,26	1,16	13,90
2705,4	30%	1,5	96117,75	97137,00	1,18	0,70	82210,59	98689,92	1,60	14,47
1803,6	40%	3	431775,00	431145,00	2,36	1,40	375446,91	446136,37	3,48	13,05
2004	40%	2,5	289665,00	288607,50	1,97	1,17	270682,30	300508,78	4,12	6,55
2338	40%	2	172773,00	176148,00	1,57	0,93	152228,33	177322,70	0,67	11,89
2738,8	40%	1,5	94126,50	96691,50	1,18	0,70	82141,76	96544,77	0,15	12,73
1837	50%	3	419422,50	423540,00	2,36	1,40	373925,04	432345,17	2,08	10,85
2004	50%	2,5	291915,00	284287,50	1,97	1,17	270682,30	300508,78	5,71	7,27
2338	50%	2	172689,75	172919,25	1,57	0,93	152228,33	177322,70	2,55	11,85
2755,5	50%	1,5	93107,25	92182,50	1,18	0,70	82114,99	95497,04	3,60	11,81

Fonte: O autor (2021)

Observando a Tabela 9.19, podemos observar uma piora nos resultados para a carga crítica do modo global, com erro variando entre 6,55% e 14,20%. Para o modo distorcional o erro variou entre 0,35% e 5,7%.

Tabela 9.20 Formulação de espessura equivalente para a seção S4, condição engastada

L (mm)	TIPO	t (mm)	P _{crG} (N)	P _{crD} (N)	T _{rD}	T _{rG}	P _{crG,teq}	P _{crD,teq}	Erro Dist.(%)	Erro Global(%)
2134,08	20%	3	462420,00	426555,00	2,36	1,40	372398,38	462583,31	8,45	19,47
2371	20%	2,5	389205,00	421155,00	1,97	1,17	249478,75	312465,29	25,81	35,90
2766,4	20%	2	180189,00	179417,25	1,57	0,93	151951,12	193251,96	7,71	15,67
3319,68	20%	1,5	97254,00	97200,00	1,18	0,70	82108,69	101294,58	4,21	15,57
2311,92	30%	3	406732,50	417825,00	2,36	1,40	364903,53	422919,22	1,22	10,28
2549,04	30%	2,5	277987,50	282172,50	1,97	1,17	245253,26	288921,80	2,39	11,78
2726,8	30%	2	190354,50	175932,00	1,57	0,93	152502,19	194144,35	10,35	19,89
3319,68	30%	1,5	97510,50	95589,00	1,18	0,70	82108,69	101294,58	5,97	15,80
2371,2	40%	3	389857,50	408982,50	2,36	1,40	363546,44	405246,18	0,91	6,75
2529,4	40%	2,5	281520,00	277110,00	1,97	1,17	245574,54	292777,18	5,65	12,77
2766,4	40%	2	185814,00	172289,25	1,57	0,93	151951,12	193251,96	12,17	18,22
3477	40%	1,5	90031,50	90582,75	1,18	0,70	81707,73	93460,46	3,18	9,25
2371,2	50%	3	377932,50	392737,50	2,36	1,40	363546,44	405246,18	3,18	3,81
2568,8	50%	2,5	266467,50	265365,00	1,97	1,17	244967,96	285143,54	7,45	8,07
2766,4	50%	2	180609,75	164756,25	1,57	0,93	151951,12	193251,96	17,30	15,87

Fonte: O autor (2021)

Observando a Tabela 9.20, a seção S4 com condição engastada teve os piores resultados, com erros altos e grande variabilidade nos resultados. Para o modo global, o erro variou entre 3,81% e 35,9%. Para o modo distorcional, o erro variou entre 0,91% e 25,81%.

As seções S1 e S2 são mais complexas, com furos na alma e nas mesas, cada furo foi substituído por uma parede com espessura equivalente. Os resultados de carga crítica obtidas para as seções S1 e S2 com condição apoiada estão mostradas nas Tabelas 9.21 e 9.22

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Tabela 9.21 Formulação de espessura equivalente para a seção S1, condição apoiada

L (mm)	t (mm)	P _{crG} (N)	P _{crD} (N)	P _{crG,teq}	P _{crD,teq}	Erro Dist.(%)	Erro Global(%)
1400	3	418898,32	435176,75	387204,69	437562,53	0,55	7,57
1300	3	474346,73	436499,37	391173,03	497825,82	14,05	17,53
1500	2,5	300337,07	295534,93	269835,40	315413,10	6,73	10,16
1600	2,5	268088,82	297189,91	264530,88	281165,45	5,39	1,33
1700	2	186544,05	184814,46	170785,60	196746,09	6,46	8,45
1800	2	168529,25	186174,39	168000,94	177481,21	4,67	0,31
2000	1,5	100827,93	101516,37	96412,22	107651,68	6,04	4,38
2100	1,5	92210,535	102248,9	94940,25	98464,48	3,70	2,96
2400	1	46142,572	43792,373	42326,16	48789,14	11,41	8,27
2500	1	42808,885	44070,463	42079,37	45262,65	2,71	1,70

Fonte: O autor (2021)

Para a seção S1, o erro na determinação da carga crítica de flambagem distorcional utilizando o método da espessura equivalente variou entre 0,55% e 11,41%. Para o modo de flambagem global, o erro variou entre 0,31% e 17,53%.

Tabela 9.22 Formulação de espessura equivalente para a seção S2, condição apoiada

L (mm)	t (mm)	P _{crG} (N)	P _{crD} (N)	P _{crG,teq}	P _{crD,teq}	ErroDist.(%)	Erro Global(%)
1000	3	436822,08	414962,56	360322,64	472811,56	13,94	17,51
1100	3	382940,81	460320,88	376212,64	401894,02	12,69	1,76
1100	2,5	310024,55	330686,72	247459,44	328064,82	0,79	20,18
1200	2,5	267103,75	313800,85	258510,94	282542,06	9,96	3,22
1200	2	206326,9	211150,12	150100,18	216533,56	2,55	27,25
1300	2	180390,2	199962,46	156740,34	221752,78	10,90	13,11
1400	1,5	115321,27	113994,97	82886,78	119443,85	4,78	28,13
1500	1,5	101419,6	109948,5	86358,60	106099,95	3,50	14,85
1800	1	46525,174	48269,024	35862,22	46923,73	2,79	22,92
1900	1	42365,11	46767,717	37170,51	42643,71	8,82	12,26

Fonte: O autor (2021)

Pela Tabela 9.22, para a seção S2, o erro para o modo distorcional variou entre 0,79% e 13,94%, enquanto que para o modo global o erro variou entre 1,76% e 28,13%.

Para a condição engastada, as Tabelas 9.23 e 9.24 mostram os resultados obtidos para as seções S1 e S2.

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Tabela 9.23 Formulação de espessura equivalente para a seção S1, condição engastada

L (mm)	t (mm)	P _{crG} (N)	P _{crD} (N)	P _{crG,teq}	P _{crD,teq}	Erro Dist.(%)	Erro Global(%)
2800	3	416360	437760	366194,06	447498,74	2,22	12,05
2700	3	444000	444080	369731,72	470447,40	5,94	16,73
3000	2,5	299008	303532	250821,52	322185,38	6,15	16,12
3100	2,5	281776	299976	248964,94	304392,05	1,47	11,64
3300	2	195628	192332	156849,88	204145,63	6,14	19,82
3500	2	189336	175956	154893,37	191052,55	8,58	18,19
3600	1,5	121056	107140	88366,73	114775,62	7,13	27,00
3700	1,5	115252	106772	87608,73	114481,54	7,22	23,99

Fonte: O autor (2021)

Tabela 9.24 Formulação de espessura equivalente para a seção S2, condição engastada

L (mm)	t (mm)	P _{crG} (N)	P _{crD} (N)	P _{crG,teq}	P _{crD,teq}	Erro Dist.(%)	Erro Global(%)
1900	3	490657,5	493942,5	409223,57	526999,83	6,69	16,60
2000	3	449797,5	482985	405334,99	488142,06	1,07	9,89
2100	2,5	335812,5	335992,5	278944,45	360443,35	7,28	16,93
2200	2,5	310050	329377,5	276757,66	338787,12	2,86	10,74
2300	2	222468,75	213646,5	172205,43	226243,58	5,90	22,59
2500	2	192800,25	205731	169645,34	208690,85	1,44	12,01
2900	1,5	107388	113379,75	92838,68	116172,29	2,46	13,55
3000	1,5	101108,25	112126,5	92286,89	109336,49	2,49	8,72
3500	1	48901,5	49671	38269,28	50630,08	1,93	21,74
3600	1	46458	49198,5	38690,09	48426,23	1,57	16,72

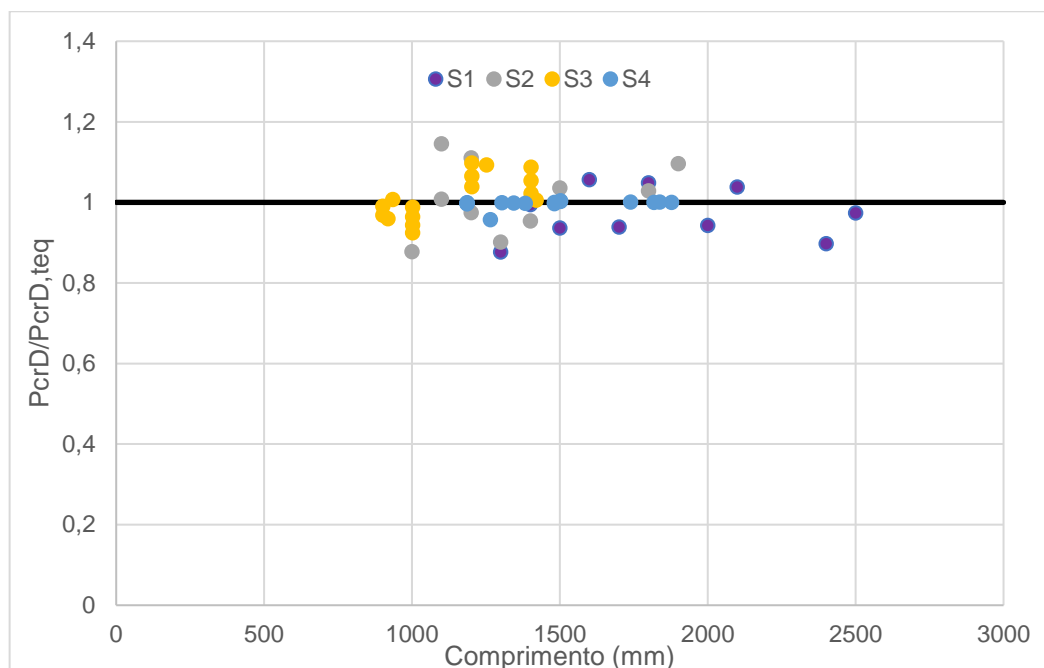
Fonte: O autor (2021)

Pela Tabela 9.23, para a seção S1, o erro para o modo distorcional variou entre 2,22% e 8,58%, enquanto que para o modo global o erro variou entre 11,64% e 27%. Para a seção S2, observando a Tabela 9.24, podemos observar que para o modo distorcional o erro variou entre 1,07% e 7,28%, e para o modo global o erro variou entre 8,72% e 22,59%.

Por fim, agrupando os resultados obtidos para todas as seções, as Figuras 9.13 e 9.14 mostram os resultados obtido pelo método da espessura equivalente para condição apoiada para os modos de flambagem distorcional e global, respectivamente. Onde nos gráficos, o eixo y representa a razão entre as cargas críticas obtida no ABAQUS e pelo método da espessura

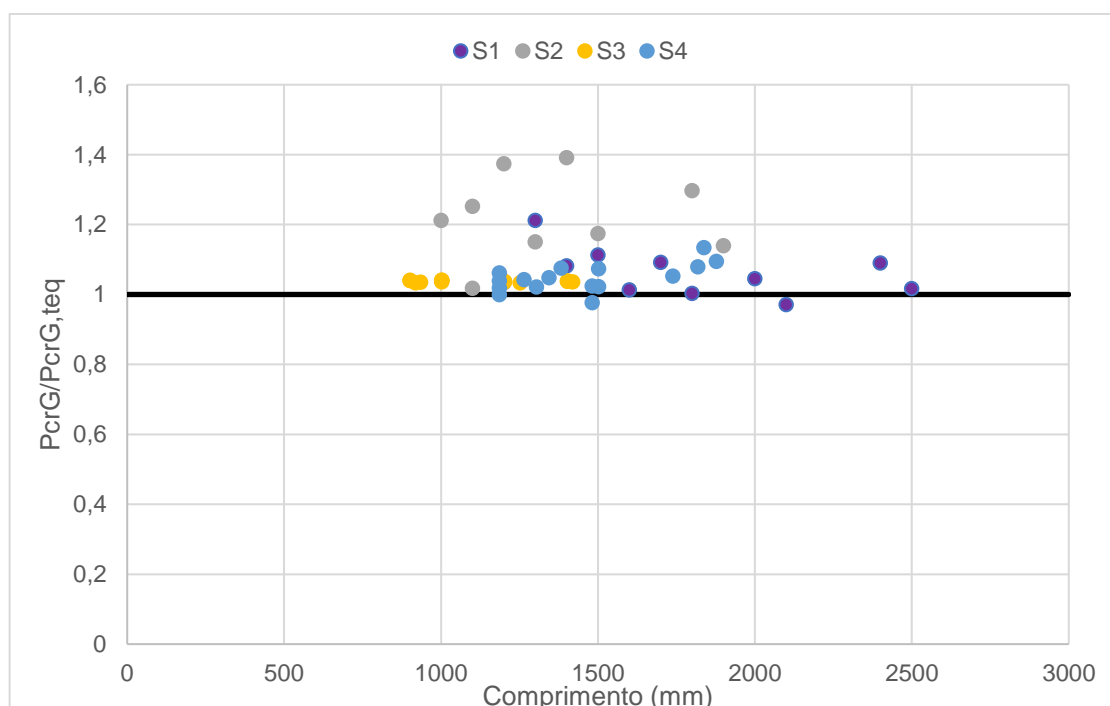
equivalente, e o eixo y representa os comprimentos das colunas analisadas. Além disso, quanto mais próximos da linha horizontal com valor igual, melhores os resultados obtidos.

Figura 9.13 Resultados método espessura equivalente para seção apoiada, modo distorcional



Fonte: O autor (2021)

Figura 9.14 Resultados método espessura equivalente para seção apoiada, modo global



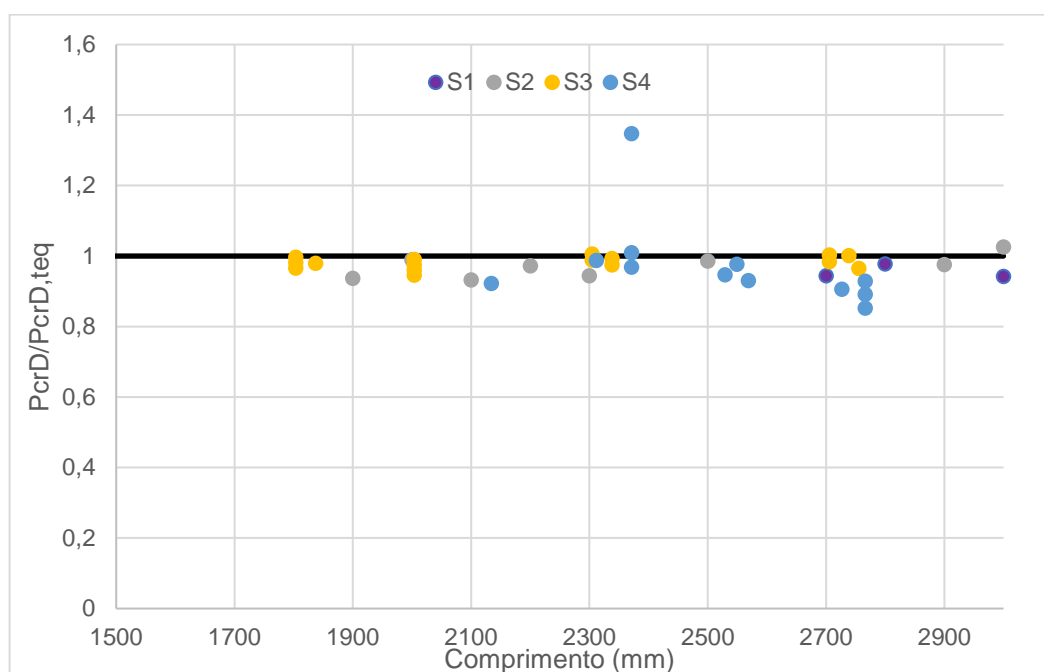
Fonte: O autor (2021)

CAPÍTULO 9 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

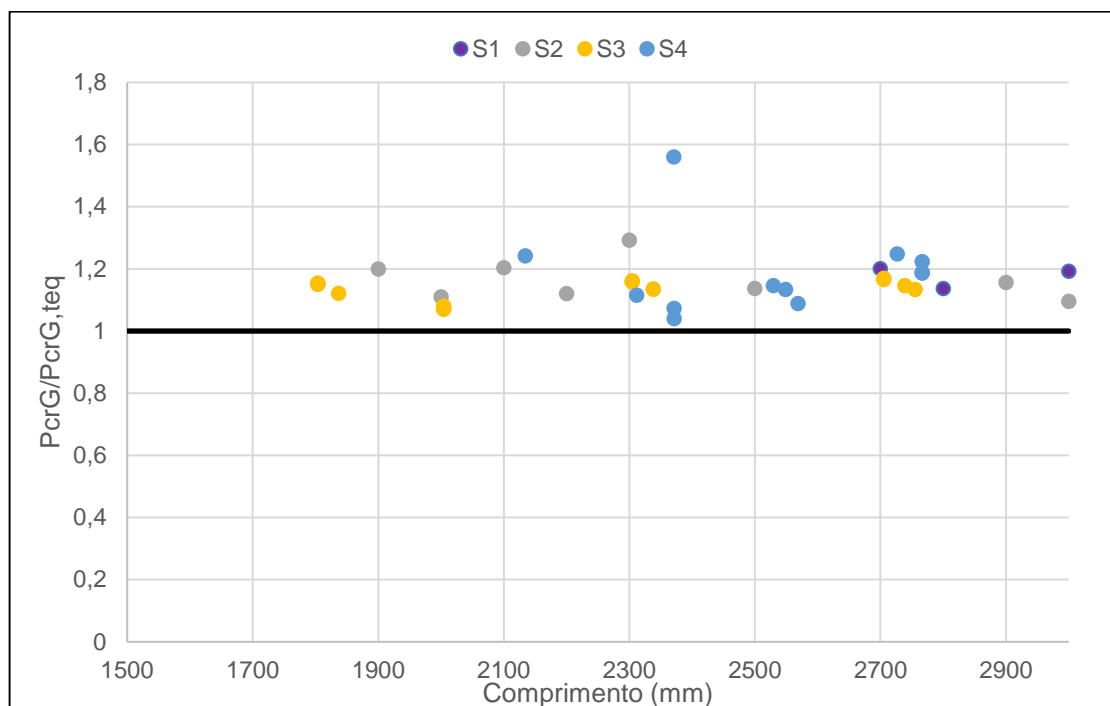
Podemos observar pelas Figuras 9.13 e 9.14, que para a condição apoiada a formulação de espessura equivalente, no geral se obteve bons resultados. Para o modo de flambagem distorcional, a razão entre as cargas críticas variando entre 0.9 e 1.1, enquanto que para o modo de flambagem global, a razão variou entre 1 e 1.4, tendo uma piora nos resultados, principalmente devido aos resultados obtidos na seção S2.

As Figuras 9.15 e 9.16 mostram os resultados obtidos para a condição engastada para os modos distorcional e global, respectivamente.

Figura 9.15 Resultados método espessura equivalente para seção engastada, modo distorcional



Fonte: O autor (2021)

Figura 9.16 Resultados método espessura equivalente para seção engastada, modo global

Fonte: O autor (2021)

Podemos observar pela Figura 9.15, os ótimos resultados obtidos para o modo de flambagem distorcional, com exceção de uma das colunas da seção S4 que obteve razão entre as cargas críticas de 1,4. O método de espessura equivalente para o modo global também obteve bons resultados como pode ser observado pela Figura 9.16.

Por fim, de maneira geral, a metodologia de espessura equivalente apresentou bons resultados de carga crítica para as seções apoiada e engastada, e é uma ótima ferramenta principalmente para análises iniciais de flambagem em perfis com furos.

CAPÍTULO 10

CONCLUSÕES

Neste capítulo serão discutidas as conclusões gerais deste trabalho, além da sugestão de trabalhos futuros.

10.1 CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho teve como objetivos analisar a interação entre as flambagens distorcional e global (D-G) em colunas de perfis rack perfurados por meio de análises numéricas. Os softwares GBTUL, CUFSM e ABAQUS foram utilizados nas análises lineares, enquanto que apenas o software ABAQUS foi utilizado na realização da análise não linear.

Como já mencionado anteriormente os softwares GBTUL e CUFSM realizam análises lineares de flambagem elásticas em perfis formados a frio sem furos, a partir destes softwares é possível determinar as curvas de flambagem, cargas críticas e configurações deformadas dos modos de flambagem. No entanto, esses dois softwares ainda não realizam análises nos perfis perfurados, neste trabalho, no caso dos perfis perfurados, a análise linear foi feita no software ABAQUS, onde é possível inserir os furos. Portanto, os softwares GBTUL e CUFSM foram utilizados para validar os resultados da análise linear em perfis sem furos obtidos no ABAQUS, ou seja, inicialmente foram determinadas as curvas de flambagem nos perfis sem furos utilizando os softwares GBTUL e CUFSM, posteriormente as curvas de flambagem também foram determinadas no software ABAQUS, e os resultados obtidos foram comparados, obtendo uma boa congruência nesses resultados. Por fim, a metodologia da espessura equivalente foi aplicada, este é um método onde os furos são substituídos por uma parede com uma espessura equivalente, e assim, o software CUFSM pode ser utilizado. Os valores de carga crítica obtidos no ABAQUS foram comparados com os obtidos pela metodologia da espessura equivalente,

onde bons resultados foram encontrados, e a metodologia da espessura equivalente é um método que pode ser utilizado em análises iniciais em perfis com furos para determinação das cargas críticas de flambagem.

A maioria das análises numéricas realizadas neste trabalho foram feitas no software ABAQUS, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) em suas análises. Um dos passos mais importantes para utilização desse método é a definição de um modelo numérico para as análises. A partir de modelos numéricos de colunas de seção rack perfuradas de sistemas de estocagem utilizados por outros autores, foram definidos modelos numéricos para três condições de apoio que foram utilizadas nesse trabalho. As análises das interações entre as flambagens foram feitas para as condições apoiada, engastada e apoiada com torção restringida. Por fim, os modelos numéricos definidos foram validados a partir de ensaios experimentais de colunas de seção rack perfurados presentes na literatura.

A avaliação da interação D-G nas colunas foi feita em duas etapas. Na 1^o etapa foram realizadas análises lineares elásticas de flambagem para selecionar colunas com possível interação D-G. As colunas foram selecionadas a partir das curvas de flambagens em comprimentos de colunas onde a razão entre as cargas críticas de flambagem elástica distorcional e global possuem valor próximo a 1. Na análise linear também foram determinadas as configurações deformadas dos modos de flambagem global e distorcional, estes foram utilizados como imperfeição geométrica na análise não linear, esta análise corresponde a 2^o etapa da avaliação da interação.

A 2^o etapa do trabalho foi a realização das análises não lineares das colunas selecionadas na etapa anterior. A análise não linear foi feita considerando a coluna com um comportamento elástico-plástico perfeito e considerando imperfeições geométricas nas seções. A avaliação da interação D-G foi efetivamente feita na inserção das imperfeições geométricas na análise não linear. As configurações deformadas dos modos de flambagem distorcional e global obtidos na análise linear foram combinados e considerados como imperfeição geométrica. Para cada coluna analisada foram realizadas 13 análises não lineares variando os valores das magnitudes das imperfeições dos dois modos de flambagem que foram combinados, sendo que em cada análise não linear foi determinado a carga de ruptura, configuração deformada e curvas de equilíbrio da coluna. Por fim, nas condições engastada e apoiada com torção restringida, os menores valores de carga de ruptura foram observados considerando apenas o modo global como imperfeição, enquanto que na condição apoiada, a menor carga de ruptura foi observada considerando apenas o modo distorcional como imperfeição.

O Método da Resistência Direta (MRD) é um dos métodos mais utilizados no dimensionamento de perfis formados a frio, no entanto, esse método ainda não é válido para o caso de seções rack perfuradas de sistemas de estocagem, pois as normas desses sistemas ainda requerem ensaios experimentais para o dimensionamento desses perfis. Devido a isso, diversos autores vêm conduzindo estudos para tentar enquadrar esses perfis no MRD. O Método da Resistência Direta foi aplicado nos perfis com interação analisados neste trabalho, e seus resultados de carga de ruptura foram comparados com valores obtidos na análise não linear. No caso dos perfis com condição engastada e apoiada com torção restringida, o MRD obteve resultados satisfatórios, no caso da condição apoiada, o erro do MRD apresentou grande variabilidade.

Por fim, este trabalho analisou a interação D-G em perfis rack perfurados por meio do Método dos Elementos utilizando o software ABAQUS, sendo que as análises foram feitas para três condições de apoio. Foram definidos modelos numéricos para cada condição de apoio e realizado análises não lineares para estudar o comportamento das colunas. Por fim, o MRD foi aplicado e seus resultados foram comparados com os obtidos na análise não linear., sendo que nas condições engastada e apoiada com torção restringida, o MRD apresentou bons resultados.

10.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das conclusões deste trabalho, verificou-se a possibilidade da sugestão de trabalhos futuros nos itens a seguir:

- Ensaios experimentais das colunas analisadas numericamente neste trabalho, com o intuito de validar as simulações numéricas;
- Análise da interação Local-Distorcional (L-D) e Local-Distorcional-Global (L-D-G) dos perfis analisados neste trabalho;
- Análise da interação D-G das colunas selecionadas neste trabalho com outros tipos de aço, variando os valores da tensão de escoamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS, **NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**, Rio de Janeiro, 2010.

AISI S100, 2016. **North American Specification for the Design of cold-formed steel structural members (NAS)**, American Iron and Steel Institute, Washington DC, 2016.

AS/NZS 4084, 2012, **Steel storage racking, standards Australia/Standards New Zealand**, Sydney, Australia, 2012.

ÁDÁNY, S. et al. GBT and cFSM: Two modal approaches to the buckling analysis of unbranched thin-walled members. **Advanced Steel Construction**, v. 5, n. 2, p. 195–223, 2009.

ANBARASU, M.; MURUGAPANDIAN, G. Experimental study on cold-formed steel web stiffened lipped channel columns undergoing distortional–global interaction. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 49, n. 4, p. 1433–1442, 2016.

ASHRAF, M.; GARDNER, L.; NETHERCOT, D. A. Finite element modelling of structural stainless steel cross-sections. **Thin-Walled Structures**, v. 44, n. 10, p. 1048–1062, 2006.

BALDASSINO, N. et al. An experimental investigation on solid and perforated steel storage racks uprights. **Journal of Constructional Steel Research**, v.155, n. January, p. 409-425, 2019.

BEBIANO, R. et al. **GBTUL 2.06 - Buckling and Vibration of Thin Walled Members**, freeware available at < <http://www.civil.ist.utl.pt/gbt/> >.

BERTOCCI, L. et al. Experimental, numerical, and regulatory P-Mx-My domains for cold-

formed perforated steel uprights of pallet-racks. **Thin-Walled Structures**, v. 119, p. 151-165, 2017.

BONADA, J. et al. Selection of the initial geometrical imperfection in nonlinear FE analysis of cold-formed steel rack columns. **Thin-Walled Structures**, v. 55, p. 99-111, 2012.

BONADA, J. et al. Influence of the cold work effects in perforated rack columns under pure compression load. **Engineering Structures**, v. 97, p. 130–139, 2015.

BONADA, J. et al. Distortional Influence of Pallet Rack Uprights Subject to Combined Compression and Bending. **Structures**, v. 8, p. 275-285, 2016.

BORGES DINIS, P.; CAMOTIM, D.; SILVESTRE, N. FEM-based analysis of the local-plate/distortional mode interaction in cold-formed steel lipped channel columns. **Computers and Structures**, v. 85, n. 19–20, p. 1461–1474, 2007.

CAMOTIM, D. et al. Review: Interactive behaviour, failure and DSM design of cold-formed steel members prone to distortional buckling. **Thin-Walled Structures**, v. 128, n. October 2017, p. 12–42, 2018.

CAMOTIM, D.; DINIS, P. B. Coupled instabilities with distortional buckling in cold-formed steel lipped channel columns. **Thin-Walled Structures**, v. 49, n. 5, p. 562–575, 2011.

CASAFONT, M. et al. An experimental investigation of distortional buckling of steel storage rack columns. **Thin-Walled Structures**, v. 49, p. 933-946, 2011.

CASAFONT, M. et al. Linear buckling analysis of perforated steel storage rack columns with the Finite Strip Method. **Thin-Walled Structures**, n. 61, p. 71-85, 2012.

CASAFONT, M. et al. Design of steel storage rack columns via the direct strength method. **Journal of Structural Engineering**, v. 139, n. 5, p. 669–679, 2013.

CRISAN, A.; UNGUREANU, V.; DUBINA, D. Behaviour of cold-formed steel perforated sections in compression. Part 1 - Experimental investigations. **Thin-Walled Structures**, v. 61, p. 86-96, 2012a.

CRISAN, A.; UNGUREANU, V.; DUBINA, D. Behaviour of cold-formed steel perforated sections in compression: Part 2 - Numerical investigations and design considerations. **Thin-Walled Structures**, v. 61, p. 97-105, 2012b.

DIAS MARTINS, A.; CAMOTIM, D.; BORGES DINIS, P. On the direct strength design of cold-formed steel columns failing in local-distortional interactive modes. **Thin-Walled Structures**, v. 120, n. March, p. 432–445, 2017.

DINIS, P. B. et al. Local-distortional-global interaction in lipped channel columns: Experimental results, numerical simulations and design considerations. **Thin-Walled Structures**, v.61, p. 2-13, 2012.

DINIS, P. B. et al. CFS lipped channel columns affected by L-D-G interaction. Part II: Numerical simulations and design considerations. **Computers and Structures**, v.207, p. 219-232, 2018.

DINIS, P. B.; CAMOTIM, D. Post-buckling behaviour and strength of cold-formed steel lipped channel columns experiencing distortional/global interaction. **Computers and Structures**, v. 89, p. 422-434, 2011.

DINIS, P. B.; CAMOTIM, D. Cold-formed steel columns undergoing local-distortional coupling: Behaviour and direct strength prediction against interactive failure. **Computers and Structures**, v. 147, p. 181-208, 2015.

DINIS, P. B.; YOUNG, B.; CAMOTIM, D. Local-distortional interaction in cold-formed steel rack-section columns. **Thin-Walled Structures**, v. 81, p. 185–194, 2014.

DOS SANTOS, E. S.; BATISTA, E. M.; CAMOTIM, D. Experimental investigation

concerning lipped channel columns undergoing local-distortional-global buckling mode interaction. **Thin-Walled Structures**, v.54, p. 19-34, 2012.

DUBINA, D.; UNGUREANU, V. Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members. **Thin-Walled Structures**, v. 40, n. 3, p. 239–262, 2002.

DUBINA, D.; UNGUREANU, V. Instability mode interaction: From Van der Neut model to ECBL approach. **Thin-Walled Structures**, v. 81, p. 39-49, 2014.

ELIAS, G. C. et al. Ultimate load of steel storage systems uprights. **Engineering Structures**, v. 170, p. 53–62, 2018.

EN 15512, 2009, **Steel static storage systems, European Technical Committee Cen/TC 344**, European Specification, 2009.

FARIA, V. O. **Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações**. 2016. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

FREITAS, A. M. S.; FREITAS, M. S. R.; SOUZA, F. T. Analysis of steel storage rack columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 61, n. 8, p. 1135–1146, 2005.

GARIFULLIN, M.; NACKENHORST, U. Computational analysis of cold-formed steel columns with initial imperfections. **Procedia Engineering**, v. 117, n. 1, p. 1073-1079, 2015.

KOEN, D. **Structural capacity of light gauge steel storage rack uprights** Master of Engineering 2008. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - School of Civil Engineering, The University of Sydney, Sydney, 2008.

LACERDA, E. G. M. **Análise não linear de treliças pelo método dos elementos finitos posicional**. 2014. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

LI, Z. et al. Review: Constrained finite strip method developments and applications in cold-formed steel design. **Thin-Walled Structures**, v. 81, p. 2–18, 2014.

LI, Z.; SCHAFER, B. W. Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: Conventional and constrained finite strip methods. **20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures - Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction**, p. 17–31, 2010.

MARTINS, A. D. et al. On the relevance of local-distortional interaction effects in the behaviour and design of cold-formed steel columns. **Computers and Structures**, v. 160, p. 57–89, 2015.

MARTINS, A. D.; CAMOTIM, D.; DINIS, P. B. Behaviour and DSM design of stiffened lipped channel columns undergoing local-distortional interaction. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 128, p. 99–118, 2017.

MARTINS, A. D.; CAMOTIM, D.; DINIS, P. B. On the distortional-global interaction in cold-formed steel columns: Relevance, post-buckling behaviour, strength and DSM design. **Journal of Constructional Steel Research**, v.145, p. 449-470, 2018.

MARTINS, A. D.; DINIS, P. B.; CAMOTIM, D. On the influence of local-distortional interaction in the behaviour and design of cold-formed steel web-stiffened lipped channel columns. **Thin-Walled Structures**, v. 101, p. 181–204, 2016.

MICHAEL DAVIES, J.; LEACH, P.; TAYLOR, A. The design of perforated cold-formed steel sections subject to axial load and bending. **Thin-Walled Structures**, v. 29, n. 1–4, p. 141–157, set. 1997.

MOEN, C. D.; SCHAFER, B. W. Experiments on cold-formed steel columns with holes. **Thin-Walled Structures**, v. 46, n. 10, p. 1164–1182, out. 2008.

MOEN, C. D.; SCHAFER, B. W. Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes. **Engineering Structures**, v. 31, n. 12, p. 2812–2824, dez. 2009.

MOEN, C. D.; SCHAFER, B. W. Direct strength method for design of cold-formed steel columns with holes. **Journal of Structural Engineering**, v. 137, n. 5, p. 559–570, 2011.

NEIVA, L. H. DE A. et al. Numerical and experimental analysis of perforated rack members under compression. **Thin-Walled Structures**, v. 130, p. 176-193, 2018.

PASTOR, M. M. et al. Residual stresses and initial imperfections in non-linear analysis. **Engineering Structures**, v. 46, p. 493–507, 2013.

PASTOR, M. M. et al. Imperfection amplitudes for nonlinear analysis of open thin-walled steel cross-sections used in rack column uprights. **Thin-Walled Structures**, v. 76, p. 28-41, 2014.

REN, C.; WANG, B.; ZHAO, X. Numerical predictions of distortional-global buckling interaction of perforated rack uprights in compression. **Thin-Walled Structures**, v. 136, p. 292-301, 2019.

RMI, 2012, **Specification for the design, testing and utilization of industrial steel storage racks**, ANSI MH16.1-2012, Rack manufactures Institute, Technical report, 2012.

RIKS, E. The application of Newton's methods to the problems elastic stability. **Journal of Applied Mechanics**, v. 39, n. 4, p. 1060-1065, 1972.

RIKS, E. An incremental approach to the solution of snapping and buckling problemsInternational. **Journal of Solids and Structures**, v. 15, n. 7, p. 529-551, 1979.

ROURE, F. et al. Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and

EC3. **Thin-Walled Structures**, v. 49, n. 1, p. 167-184, 2011.

SANTOS, E. S. et al. Cold-formed steel lipped channel columns undergoing local-distortional-global interaction: Experimental and numerical investigation. **22nd International Specialty Conference on Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction**, p. 193–211, 2014.

SCHAFFER, B. W.; ÁDANY, S. Buckling analysis of cold formed steel members using CUFSM: Conventional and constrained finite strip methods. In: Proceedings of 18th international speciality conference on cold formed steel structures, Orlando, USA; October 26-28, 2006, p.39-54.

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

SCHAFFER, B. W.; LI, Z.; MOEN, C. D. Computational modeling of cold-formed steel. **Thin-Walled Structures**, v. 48, n. 10–11, p. 752–762, 2010.

SCHAFFER, B. W.; PEKÖZ, T. Computational modeling of cold-formed steel: Characterizing geometric imperfections and residual stresses. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 47, n. 3, p. 193–210, 1998a.

SCHAFFER, B. W.; PEKÖZ, T. Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. **International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures: Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction**, p. 69–76, 1998b.

SILVA, A. C. C. **Dimensionamento à flambagem distorcional via MRD de colunas metálicas perfuradas em perfil rack**. 2017. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D.; DINIS, P. B. Post-buckling behaviour and direct strength design of lipped channel columns experiencing local/distortional interaction. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 73, p. 12–30, 2012.

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

TROUNCER, A. N.; RASMUSSEN, K. J. R. Flexural-torsional buckling of ultra light-gauge steel storage rack uprights. **Thin-Walled Structures**, v. 81, p. 159–174, 2014.

VIJAYAVENGADESH KUMAR, J.; ARUL JAYACHANDRAN, S. Experimental investigation and evaluation of Direct Strength Method on beam-column behavior of uprights. **Thin-Walled Structures**, v. 102, p. 165-179, 2016.

YOUNG, B. et al. Cold-Formed Steel Lipped Channel Columns Influenced by Local-Distortional Interaction : Strength and DSM Design. **Journal of Structural Engineering**, v. 139, n. June, p. 1059–1074, 2013.

YOUNG, B.; DINIS, P. B.; CAMOTIM, D. CFS lipped channel columns affected by L-D-G interaction. Part I: Experimental investigation. **Computers and Structures**, v. 207, p. 200-218, 2018.

ZHANG, P.; ALAM, M. S. Experimental investigation and numerical simulation of pallet-rack stub columns under compression load. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 133, p. 282-299, 2017.

ZHAO, X. **Measurement and Application of Geometric Imperfections in Cold-Formed Steel Members**. 2016. 417. Tese (Doutorado em Engenharia) - Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland (2016).

ZHAO, X.; REN, C.; QIN, R. An experimental investigation into perforated and non-perforated steel storage rack uprights. **Thin-Walled Structures**, v. 112, p. 159–172, 2017.