



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Flávio Rodrigues

**Avaliação Estrutural de Painéis Enrijecidos Fabricados em Aço
Inoxidável**

Rio de Janeiro

2024

Flávio Rodrigues

Avaliação estrutural de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável



Tese de doutorado apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadores: Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima
Prof. Dr. André Tenchini da Silva

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

R696 Rodrigues, Flávio.
Avaliação estrutural de painéis enrijecidos fabricados em aço
inoxidável / Flávio Rodrigues. – 2024.
231 f.

Orientadores: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, André Tenchini
da Silva.

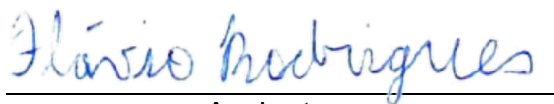
Tese (Doutorado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Aço - Estruturas - Teses. 3.
Deformações e tensões - Teses. 4. Análise estrutural (Engenharia) -
Teses. I. Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de. II. Silva, André Tenchini
da. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de
Engenharia. IV. Título.

CDU 669.14.018.8

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta tese, desde que citada a fonte.



Assinatura

Rio de Janeiro, 04 de Fevereiro de 2025

Data

Flávio Rodrigues

Avaliação estrutural de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável

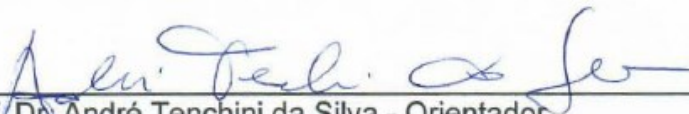
Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 20 de dezembro de 2024.

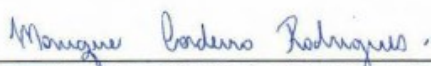
Banca Examinadora:



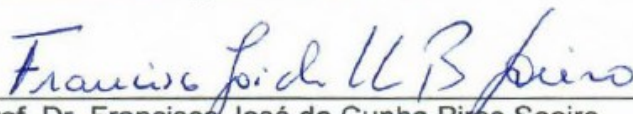
Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima - Presidente/Orientador
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. André Tenchini da Silva - Orientador
Faculdade de Engenharia – UERJ



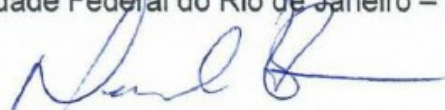
Profa. Dra. Monique Cordeiro Rodrigues
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Francisco José da Cunha Pires Soeiro
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Eduardo de Miranda Batista
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ



Prof. Dr. Marcelo Igor Lourenço de Souza
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Rio de Janeiro

2024

AGRADECIMENTOS

Aos meus Pais por todo o amor e carinho dedicados a mim ao longo da vida.

A minha noiva Viviane pela compreensão e paciência nos momentos de ausência dedicados ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco, falecido ao longo do desenvolvimento deste trabalho, por toda a amizade e parceria ao longo de nossa vida pessoal, acadêmica e profissional.

Aos Professores Luciano Rodrigues Ornelas de Lima e André Tenchini da Silva por toda a ajuda e incentivo oferecidos ao longo do curso de Doutorado.

A Professora Monique Cordeiro Rodrigues pela ajuda nos ensaios de caracterização dos corpos-de-prova deste trabalho.

Aos amigos Fernando Sarquis e Vinicius de Souza pela ajuda na montagem dos ensaios experimentais deste trabalho.

Aos funcionários da Secretaria do PGE CIV e do Laboratório de Engenharia Civil da UERJ pelo zelo no trato com os alunos.

A Universidade do Estado do Rio de Janeiro e a FAPERJ por todo o suporte.

Ao profissional Luciano Mendonça pela fabricação e montagem dos modelos experimentais deste trabalho.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram na minha formação acadêmica e profissional.

O que seria da vida se não tivéssemos o sonho de tentar algo novo?

Vincent Van Gogh

RESUMO

Rodrigues, Flávio. ***Avaliação estrutural de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável***. 2024. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Painéis enrijecidos apresentam várias aplicações na Engenharia, como por exemplo, em estruturas do tipo naval/*offshore*, onde são empregados como elementos estruturais de navios e plataformas de petróleo. Outras aplicações incluem estruturas de pontes, tanques de armazenamento, dentre outras. Aspectos essenciais dos mecanismos de falha de painéis enrijecidos são seu nível de imperfeições geométricas iniciais bem como de tensões residuais presentes em tais estruturas, oriundas dos processos de fabricação. Algumas normas técnicas que tratam do tema apresentam critérios a serem aplicados ao projeto e dimensionamento de painéis enrijecidos fabricados em aço carbono. Contudo, com a evolução tecnológica dos materiais e suas demandas mais severas em termos de corrosão e resistência mecânica, faz-se necessária a utilização de aços especiais cujo projeto não está coberto nas normas técnicas atuais voltadas ao aço carbono. Portanto, este trabalho tem por objetivo, avaliar a resistência última de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico e verificar a influência de diferentes níveis de imperfeições iniciais na sua capacidade resistente. A fim de atingir tais objetivos, ensaios experimentais de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável foram conduzidos em laboratório, para proporção do comprimento do painel enrijecido pelo espaçamento entre enrijecedores de 2.70 e 4.35 de forma a abranger os valores práticos utilizados nas estruturas do tipo naval/*offshore*. Posteriormente, um modelo em elementos finitos foi desenvolvido e calibrado de forma a reproduzir os resultados experimentais. Uma análise paramétrica foi realizada de forma a aumentar a base de dados a fim de se verificar se as normas correntes aplicadas às estruturas em aço carbono poderiam ser aplicadas aos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável. Os resultados encontrados demonstraram que algumas normas de projeto poderiam apresentar dimensionamento conservador e não conservador para valores de esbeltez baixo e alto, respectivamente. Desta forma, uma nova equação de dimensionamento baseada na calibração do parâmetro C_x (razão da resistência última no que diz respeito à tensão normal uniaxial na direção longitudinal pela tensão $\sigma_{0.2\%}$ da placa) foi proposta, apresentando melhoria dos resultados.

Palavras-chave: Aço Inoxidável; Painéis Enrijecidos; Elementos Finitos; Análise Não-Linear; Análise Experimental.

ABSTRACT

Rodrigues, Flávio. ***Structural assessment of stainless steel stiffened panels***. 2024. 231 p. Thesis (DSc in Civil Engineering) - Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Stiffened plate panels present several applications in Engineering, for instance, in naval/offshore structures, where they are employed as structural elements of ships and vessels. Other utilizations include bridge structures, storage tanks and so on. Essential aspects of the failure mechanisms of stiffened plated panels are the initial geometrical imperfections and residual stresses embedded in such structures due to the fabrication processes. Some technical design guides present rules to be applied to the design of carbon steel stiffened plated panels. However, with the technological evolution of the materials and their stricter demands on corrosion and mechanical resistance, it is necessary to utilise special steel whose design is not covered in the codes, as mentioned earlier. Hence, this work aims to assess the ultimate resistance of austenitic stainless steel stiffened plated panels and verify the influence of different initial imperfections on their structural capacity. In order to achieve this objective, experimental tests of stainless steel stiffened panels were carried out at the laboratory, with an aspect ratio between the panel length and the stiffener spacing of 2.70 and 4.35 to cover the practical values used in the naval/offshore structures. Afterwards, a FE model was developed and calibrated against experimental results. A parametric analysis was performed to enlarge the database to check if the current rules applied to carbon steel structures can be applied to stainless steel stiffened plated panels. The results showed that some design rules could provide conservative and non-conservative designs for values of low and high slenderness, respectively. Finally, a new equation based on the calibration of the C_x parameter (ratio of the ultimate strength concerning uniaxial normal stress to the specified minimum yielding point of the plate in the longitudinal direction) was proposed providing improved results.

Keywords: Stainless Steel; Stiffened Plated Panels; Finite Elements; Nonlinear Analysis; Experimental Test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bloco de navio.....	19
Figura 2 – Configuração geral de painel enrijecido [1]	20
Figura 3 – Níveis de falha de painéis enrijecidos [1]	20
Figura 4 – Aspecto geral de embarcação composta por painéis enrijecidos [3].....	21
Figura 5 – Curvas tensão-deformação típicas para aços inoxidáveis e carbono [4]..	22
Figura 6 – Margens de corrosão nominais para casco duplo [6]	26
Figura 7 – Região de enchimento/esvaziamento de tanques (<i>bellmouth</i>) [8].....	28
Figura 8 – Arranjo experimental estudado por Baláz e Murray [12]	30
Figura 9 – Modelo composto pelo conjunto placa-enrijecedor [14]	31
Figura 10 – Modos de falha verificados por Grondin <i>et al.</i> [15]	32
Figura 11 – Painéis com aberturas quadrada e retangular entre enrijecedores [16] .	33
Figura 12 – Soldas de filete contínuas e intermitentes [21]	34
Figura 13 – Flambagem local das placas para painéis isotrópicos (a) e ortotrópicos (b) [23].....	36
Figura 14 – Aspecto geral das vigas de alma esbelta [24]	36
Figura 15 – Modelos de painéis enrijecidos estudados por Xu e Soares [26]	37
Figura 16 – Distribuições aleatórias de <i>pittings</i> [27]	38
Figura 17 – Sequências de soldagem estudadas [28].....	39
Figura 18 – Geometria dos painéis enrijecidos estudados [28].....	40
Figura 19 – Deslocamentos perpendiculares ao plano da placa – Unidades em (m) [28]	40
Figura 20 – Diferentes posições das mossas nos painéis enrijecidos [29].....	41
Figura 21 – Deformada pós-flambagem dos modelos experimental e numérico [31]	42
Figura 22 – Painéis enrijecidos nos quais foram medidas as tensões residuais biaxiais [34]	43
Figura 23 – Pontos onde foram medidas as tensões residuais biaxiais [34]	44
Figura 24 – Tensões residuais longitudinais e transversais [34]	44
Figura 25 – Distribuição de tensões residuais genérica [34]	45
Figura 26 – Deformada pós-colapso a) viga-caixão b) enrijecedores superiores [37]	46
Figura 27 – Modelos de vigas de alma esbelta fabricadas em aço inoxidável [40] ...	47

Figura 28 – Estado plano biaxial de tensões normais em painel enrijecido [45]	50
Figura 29 – Flambagem de painéis curtos [45]	52
Figura 30 – Flambagem de painéis longos [45].....	53
Figura 31 – Placa simplesmente apoiada submetida à compressão uniforme [45]...	55
Figura 32 – Coeficiente de flambagem <i>versus</i> proporção $\alpha = l/s$ [45]	56
Figura 33 – Carregamentos solicitantes em placas e painéis enrijecidos [1]	58
Figura 34 – Carregamento combinado [45]	62
Figura 35 – Distribuição de tensão em um painel comprimido longitudinalmente [45]	64
Figura 36 – Vãos livres a serem considerados para o enrijecedor [1].....	69
Figura 37 – Largura efetiva sw [1]	70
Figura 38 – Características geométricas – Painel 1	73
Figura 39 – Características geométricas – Painel 2	73
Figura 40 – Prensa hidráulica Lousenhausenwerk disponível para os ensaios	74
Figura 41 – Painel 1	74
Figura 42 – Painel 2	75
Figura 43 – Diagrama tensão x deformação [50]	76
Figura 44 – Corpos-de-prova antes do ensaio de tração	77
Figura 45 – Geometria dos corpos-de-prova (dimensões em milímetros).....	77
Figura 46 – Marcação de ranhuras na superfície dos corpos-de-prova	78
Figura 47 – Equipamento INSTRON 3382 utilizado para os ensaios de tração	79
Figura 48 – Diagramas tensão <i>versus</i> deformação – chapa	79
Figura 49 – Diagramas tensão <i>versus</i> deformação – cantoneira	80
Figura 50 – Sistema de aquisição de dados.....	82
Figura 51 – LVDTs e <i>strain gauges</i> – Painel 1 and Painel 2	83
Figura 52 – Esquema experimental – Vista frontal - Painel 1	84
Figura 53 – Esquema experimental – Vista posterior - Painel 1	84
Figura 54 – Cotas dos LVDTs – Vista lateral - Painel 1	85
Figura 55 – Cotas dos LVDTs e <i>strain gauges</i> – Vista frontal - Painel 1	85
Figura 56 – Cotas dos <i>strain gauges</i> – Vista posterior - Painel 1	86
Figura 57 – LVDTs e <i>strain gauges</i> – Vista posterior - Painel 1	87
Figura 58 – Esquema experimental – Vista frontal - Painel 2	87
Figura 59 – Esquema experimental – Vista posterior - Painel 2	88
Figura 60 – Cotas dos LVDTs – Vista lateral - Painel 2	88

Figura 61 – Cotas dos LVDTs e <i>strain gauges</i> – Vista frontal - Painel 2.....	89
Figura 62 – Cotas dos <i>strain gauges</i> – Vista posterior - Painel 2.....	89
Figura 63 – LVDTs e <i>strain gauges</i> – Vista frontal - Painel 2.....	90
Figura 64 – <i>Strain gauges</i> – Vista posterior - Painel 2	90
Figura 65 – Diagrama carga <i>versus</i> deformação – Placa do Painel 1.....	91
Figura 66 – Diagrama carga <i>versus</i> deformação – Enrijecedor do Painel 1	92
Figura 67 – Diagrama carga <i>versus</i> deslocamento – LVDT superior - Painel 1	92
Figura 68 – Diagrama carga <i>versus</i> deslocamento – LVDT inferior - Painel 1	93
Figura 69 – Diagrama carga <i>versus</i> deformação – Placa do Painel 2.....	93
Figura 70 – Diagrama carga <i>versus</i> deformação – Enrijecedor do Painel 2	94
Figura 71 – Diagrama carga <i>versus</i> deslocamento – LVDT - Painel 2.....	94
Figura 72 – Diagrama carga <i>versus</i> deslocamento - Painel 1	95
Figura 73 – Diagrama carga <i>versus</i> deslocamento - Painel 2	95
Figura 74 – Diferentes níveis de carregamento – Experimental - Painel 1.....	96
Figura 75 – Diferentes níveis de carregamento – Experimental - Painel 2.....	97
Figura 76 – Modelos em elementos finitos dos painéis enrijecidos.....	101
Figura 77 – Imperfeições geométricas global e local [57]	102
Figura 78 – Condições de contorno - Imperfeições geométricas globais	102
Figura 79 – Campo de deslocamentos obtido pela análise de flambagem elástica	103
Figura 80 – Análise de sensibilidade das imperfeições geométricas iniciais – Painel 1	105
Figura 81 – Melhor modelo de imperfeições iniciais – Painel 1.....	105
Figura 82 – Curvas carga vertical <i>versus</i> deslocamento vertical – Painel 2.....	106
Figura 83 – Deformadas experimental e numérica – Painel 1.....	107
Figura 84 – Deformadas experimental e numérica – Painel 2.....	107
Figura 85 – Comparação carga <i>versus</i> deformação – Placa do Painel 1.....	108
Figura 86 – Comparação carga <i>versus</i> deformação – Enrijecedor do Painel 1	109
Figura 87 – Comparação carga <i>versus</i> deslocamento – LVDT superior - Painel 1.	109
Figura 88 – Comparação carga <i>versus</i> deslocamento – LVDT inferior - Painel 1 ...	110
Figura 89 – Comparação carga <i>versus</i> deformação – Placa do Painel 2.....	110
Figura 90 – Comparação carga <i>versus</i> deformação – Enrijecedor do Painel 2	111
Figura 91 – Comparação carga <i>versus</i> deslocamento – LVDT - Painel 2.....	112
Figura 92 – Comparação carga <i>versus</i> deslocamento - Painel 1	112
Figura 93 – Comparação carga <i>versus</i> deslocamento - Painel 2.....	113

Figura 94 – Diferentes passos de carregamento – Numérico - Painei 1	114
Figura 95 – Diferentes passos de carregamento – Numérico - Painei 2	115
Figura 96 – Geometria detalhada do enrijecedor [1]	119
Figura 97 – Painei com enrijecedor em cantoneira	120
Figura 98 – Painei com enrijecedor em perfil T	120
Figura 99 – Painei com enrijecedor em barra chata	121
Figura 100 – Curvas carga vertical <i>versus</i> deslocamento vertical – $\beta < 0.94$	122
Figura 101 – Curvas carga vertical <i>versus</i> deslocamento vertical – $\beta > 0.94$	122
Figura 102 – Distribuição de tensões de von Mises (MPa) – $\beta < 0.94$	125
Figura 103 – Distribuição de tensões de von Mises (MPa) – $\beta > 0.94$	126
Figura 104 – Classificação dos modos de falha dos painéis enrijecidos	127
Figura 105 – Interpretação gráfica da equação (27) – Fator de utilização conforme ABS [1]	129
Figura 106 – Parâmetro C_x em função do parâmetro de esbeltez β	131
Figura 107 – Parâmetro de ajuste $A(K)$	133
Figura 108 – Parâmetro C_x <i>versus</i> β para os aços carbono e inoxidável austenítico 304	136
Figura 109 – Relação P_u/P_0 <i>versus</i> β para painéis com diferentes enrijecedores ..	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores nominais de corrosão [6]	26
Tabela 2 – Características geométricas de painéis enrijecidos [49]	72
Tabela 3 – Propriedades mecânicas	81
Tabela 4 – Comparação da carga última numérica x experimental	106
Tabela 5 – Características dos painéis enrijecidos da análise paramétrica	118
Tabela 6 – Parâmetros dos painéis enrijecidos – $\beta < 0.94$	123
Tabela 7 – Parâmetros dos painéis enrijecidos – $\beta > 0.94$	124
Tabela 8 – Verificações de projeto das placas individuais – Painel 1	128
Tabela 9 – Verificações de projeto das placas individuais – Painel 19	129
Tabela 10 – Metodologia de correção do Termo 2 da equação (27)	134
Tabela 11 – Comparação estatística entre ABS [1] e as proposições deste trabalho	135
Tabela 12 – Propriedades geométricas dos painéis enrijecidos	150
Tabela 13 – Propriedades geométricas dos enrijecedores	161
Tabela 14 – Resistências, modos de falha e estado de tensões dos painéis enrijecidos	172
Tabela 15 – Correção do Termo 2 da equação (27)	184

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	<i>American Bureau of Shipping</i>
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
EC3	<i>Eurocode 3 – European committee for standardisation – Design of steel structures</i>
ERE	Extensômetro de resistência elétrica
ESFO	Engenharia de sistemas flutuantes <i>offshore</i>
FEN	Faculdade de Engenharia
FPSO	<i>Floating, production storage and offloading platform</i> - Plataforma de produção, armazenamento e transferência de petróleo
LEC-UERJ	Laboratório de Engenharia Civil da UERJ
LVDT	Transdutores de deslocamento de tensão linear
MEF	Método dos elementos finitos
NBR	Norma Brasileira
OCIMF	<i>Oil Companies International Marine Forum</i>
TLP	<i>Tension leg platform</i> - Plataforma de pernas atirantadas
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Comprimento da placa entre enrijecedores
b	Espaçamento entre enrijecedores num painel enrijecido
b_2	Maior largura do flange em balanço do enrijecedor
b_f	Largura do flange do enrijecedor
d_w	Altura da alma do enrijecedor
g	Espaçamento entre soldas de filete
h_w	Altura da alma do enrijecedor
i_0	Momento de inércia mínimo do conjunto placa-enrijecedor (ver equação (51))
i	Momento de inércia mínimo do conjunto placa-enrijecedor
k	Coeficiente de flambagem dependente do estado de tensões, da razão de aspecto e das condições de contorno da placa
k_s	Coeficiente de flambagem para cisalhamento puro
l	Comprimento da placa entre enrijecedores
l_g	Perna da solda de filete
m	Número de meias ondas na direção longitudinal da placa
n	Número de meias ondas na direção transversal da placa
p	Parâmetro de espaçamento entre soldas de filete intermitentes em cadeia ou intercaladas
p	Pressão atuante nas estruturas compostas por placas
q	Pressão atuante na direção perpendicular da placa
s	Largura da placa entre enrijecedores
s_e	Largura efetiva da placa colaborante
s_w	Largura efetiva determinada de acordo com a Figura 37
t	Espessura da placa do painel enrijecido
t_f	Espessura do flange do enrijecedor
t_w	Espessura da alma do enrijecedor
t_p	Espessura da placa do painel enrijecido
t_r	Garganta da solda de filete
w	Comprimento da solda de filete

$w(x, y)$	Campo de deslocamentos
A	Área total da seção transversal (enrijecedor e chapa colaborante total)
A_e	Área da seção transversal efetiva
A_p	Área da seção transversal da placa entre enrijecedores
A_s	Área da seção transversal do enrijecedor, excluindo-se a chapa colaborante
C_m	Coeficiente de ajuste do momento fletor nas extremidades do enrijecedor que pode ser tomado como 0,75
D	Rigidez da placa
E	Módulo de elasticidade
I_e	Momento de inércia do enrijecedor e respectiva placa colaborante associada s_e
M	Máximo momento fletor resultante de cargas normais ao plano da placa entre enrijecedores ou momento fletor global atuante sobre uma embarcação
N_x	Carga normal na direção longitudinal da placa para uma largura unitária
N_y	Carga normal na direção transversal da placa para uma largura unitária
N_{xy}	Carga cisalhante ao longo das direções longitudinal e transversal da placa para uma largura unitária
P	Carga total de compressão no enrijecedor e sua respectiva placa colaborante total entre enrijecedores
P_0	Carga de plastificação teórica utilizando-se a tensão $\sigma_{0,2\%}$, para uma relação elasto-plástica perfeita entre tensão e deformação
P_r	Limite linear elástico proporcional da estrutura que pode ser adotado como 0,6 para o aço carbono
P_U	Carga última do painel enrijecido
$P_{u,num}$	Carga última numérica
$P_{u,exp}$	Carga última experimental
SM_w	Módulo resistente efetivo do conjunto enrijecedor-flange, levando-se em consideração a largura efetiva s_w
α	Razão de aspecto $\left(\frac{l}{s}\right)$ da placa

β	Esbeltez da placa
ε_0	Deformação correspondente à tensão σ_0
ε_x	Deformação normal na direção x
κ	Razão entre as tensões normais nas extremidades da face da placa
η	Máximo fator de utilização de resistência admissível
φ	Coeficiente que reflete a interação entre as tensões normais longitudinais e transversais (valores negativos são aceitos)
ϕ	Função empírica relacionada à esbeltez da placa
$\bar{\lambda}$	Esbeltez não dimensional
∇^4	Operador bi-harmônico
ν	Coeficiente de Poison
σ_a	Tensão normal devido a carregamento axial
σ_{ax}	Tensão normal na direção longitudinal da placa devido a esforços de membrana
σ_{ay}	Tensão normal na direção transversal da placa devido a esforços de membrana
σ_b	Tensão normal devido à flexão
σ_{bx}	Tensão normal na direção longitudinal da placa devido a esforços de flexão no plano
σ_{by}	Tensão normal na direção transversal da placa devido a esforços de flexão no plano
σ_{cr}	Tensão crítica de flambagem
σ_e	Tensão de von Mises
σ_{rx}	Tensão residual na direção longitudinal do painel enrijecido
σ_{ry}	Tensão residual na direção transversal do painel enrijecido
$\sigma_{x\ max}$	Máxima tensão de compressão na direção longitudinal da placa
σ_{xm}	Tensão normal média na direção longitudinal
$\sigma_{y\ max}$	Máxima tensão de compressão na direção transversal da placa
σ_0	Tensão de escoamento para o aço carbono ou tensão $\sigma_{0.2\%}$ para o aço inoxidável
$\sigma_{0.2\%}$	Tensão a 0.2% para o aço inoxidável
σ_{Cx}	Tensão crítica de flambagem na direção longitudinal da placa

σ_{Cy}	Tensão crítica de flambagem na direção transversal da placa
σ_{CA}	Tensão crítica de flambagem para carregamento axial
σ_E	Tensão de flambagem elástica ideal
σ_{Ei}	Tensão normal de flambagem elástica na direção longitudinal (σ_{Ex}) ou transversal (σ_{Ey}) da placa
$\sigma_{E(C)}$	Tensão de flambagem de Euler
σ_{Ux}	Resistência última em relação à tensão normal longitudinal da placa
σ_{Uy}	Resistência última em relação à tensão normal transversal da placa
τ	Tensão de cisalhamento nas faces laterais da placa
τ_0	Resistência ao cisalhamento da placa entre enrijecedores
τ_C	Tensão crítica de flambagem para cisalhamento puro
τ_E	Tensão de flambagem elástica por cisalhamento
τ_U	Resistência última em relação à tensão cisalhante nas arestas da placa

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
Apresentação	19
Motivação	21
Objetivos e Metodologia	23
Escopo do trabalho	23
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	50
2.1. Introdução	50
2.2. Flambagem local da placa entre enrijecedores	54
2.2.1. Resolução da equação diferencial de equilíbrio	54
2.2.2. Correção devido à plasticidade	59
2.2.3. Avaliação da resistência à flambagem de uma placa entre enrijecedores	63
2.3. Avaliação da carga última de uma placa entre enrijecedores	65
2.4. Avaliação do estado limite de flambagem de viga-coluna	66
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	72
3.1. Introdução	72
3.2. Caracterização dos materiais à tração	75
3.3. Montagem e instrumentação dos ensaios à compressão	81
3.4. Resultados experimentais	91
4. MODELOS NUMÉRICOS	99
4.1. Introdução	99
4.2. Tipo de elemento, malha de elementos finitos e material	99
4.3. Imperfeições iniciais	101
4.4. Comparação dos resultados experimentais e numéricos	104
5. ANÁLISE PARAMÉTRICA	117
5.1. Considerações iniciais	117
5.2. Discussão dos resultados	121
5.3. Verificações de projeto	128
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
6.1. Principais conclusões	139

6.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	141
REFERÊNCIAS.....	144
APÊNDICE A – PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DOS PAINÉIS	150
APÊNDICE B – PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DOS ENRIJECEDORES.....	161
APÊNDICE C – RESULTADOS DA ANÁLISE PARAMÉTRICA	172
APÊNDICE D – CORREÇÃO DA EQUAÇÃO (27).....	183
APÊNDICE E – CONFIGURAÇÃO DEFORMADA DOS PAINÉIS ENRIJECIDOS.....	195
APÊNDICE F – RESULTADOS DA RELAÇÃO $PUP0$ VERSUS β	217
APÊNDICE G – VERIFICAÇÕES MANUAIS DE RESISTÊNCIA.....	225

INTRODUÇÃO

Apresentação

Painéis enrijecidos são frequentemente utilizados em estruturas *offshore*, como pode ser observado na Figura 1. A configuração típica das estruturas compostas por painéis enrijecidos pode ser vista na Figura 2, onde l é o comprimento da placa, s é o espaçamento entre enrijecedores, e t é a espessura da placa. Aspectos relevantes nos mecanismos de falha de painéis enrijecidos são os seus níveis de imperfeições geométricas e de tensões residuais presentes nestas estruturas oriundas dos processos de fabricação. A resistência de painéis enrijecidos decresce rapidamente com o aumento das imperfeições geométricas iniciais e das tensões residuais presentes nos mesmos.

Ao longo do desenvolvimento das metodologias para a avaliação da resistência dos painéis enrijecidos, alguns critérios têm sido propostos na literatura. As normas técnicas correntes apresentam critérios para o projeto e dimensionamento de painéis enrijecidos fabricados em aço carbono, tais como ABS [1] and DNV-RP-C201 [2].



Figura 1 – Bloco de navio

De uma forma geral, os modos de falha de painéis enrijecidos podem ser agrupados em três diferentes níveis: (i) placa entre enrijecedores, (ii) o enrijecedor com sua respectiva placa colaborante e (iii) o sistema de painel enrijecido como um todo, composto por placa, enrijecedor e respectivas vigas primárias de suporte, como pode ser visto na Figura 3.

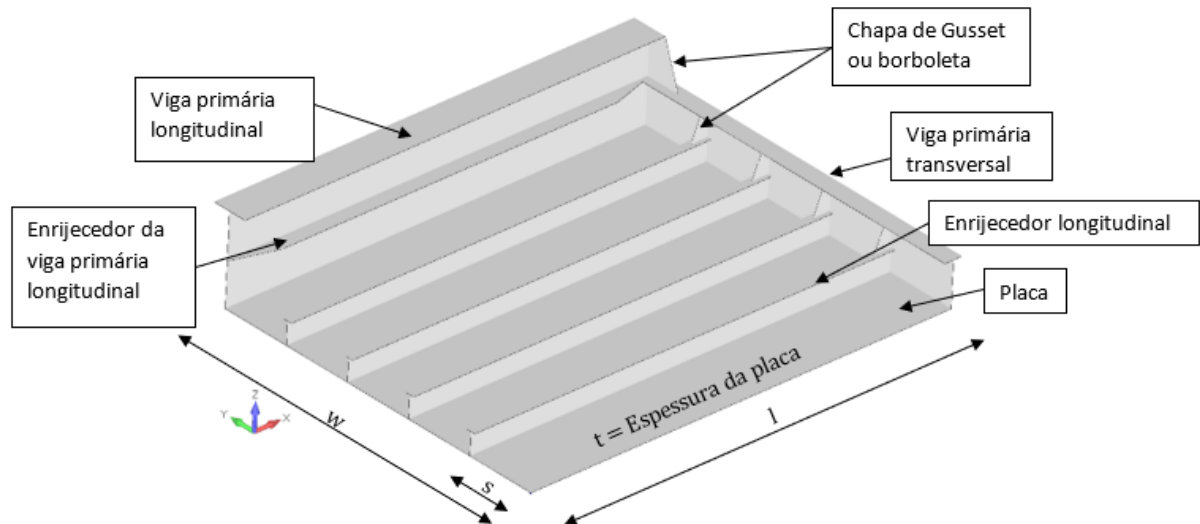


Figura 2 – Configuração geral de painel enrijecido [1]

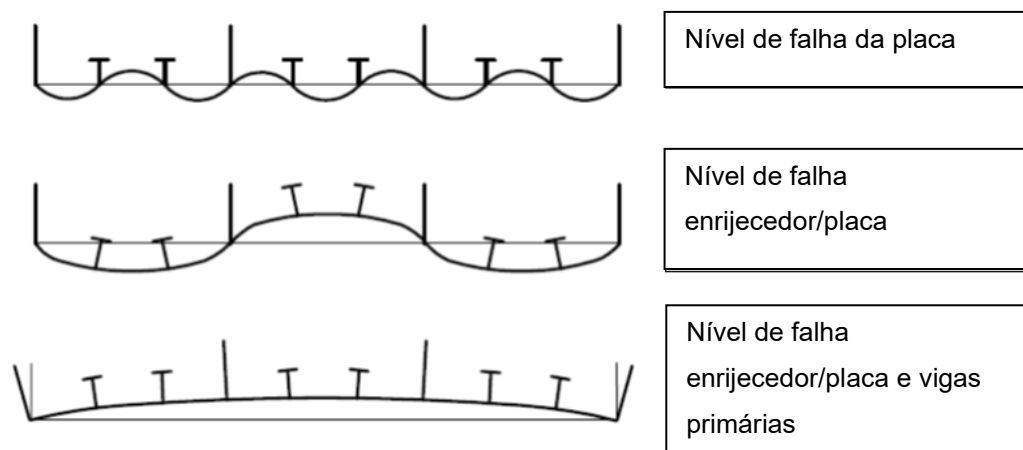


Figura 3 – Níveis de falha de painéis enrijecidos [1]

Uma estrutura do tipo naval/*offshore* eficiente, deve levar em consideração os diferentes níveis de falha citados anteriormente. Desta forma, deve haver redundância estrutural entre cada nível de falha e seu respectivo predecessor, ou seja, ainda que seja verificada a falha de uma determinada placa, seu respectivo enrijecedor deve

suportar o carregamento oriundo desta placa. De modo análogo, a falha do sistema de enrijecedores com suas respectivas placas, não deve causar o colapso imediato da estrutura, pois se espera que as vigas primárias principais tenham capacidade de redistribuição e ductilidade tais para se evitar um colapso progressivo e abrupto da estrutura. A Figura 4 apresenta o aspecto geral de uma embarcação composta por painéis enrijecidos. Nesta podem ser observadas placas, enrijecedores e vigas primárias que devem atuar conjuntamente para resistir aos esforços solicitantes.

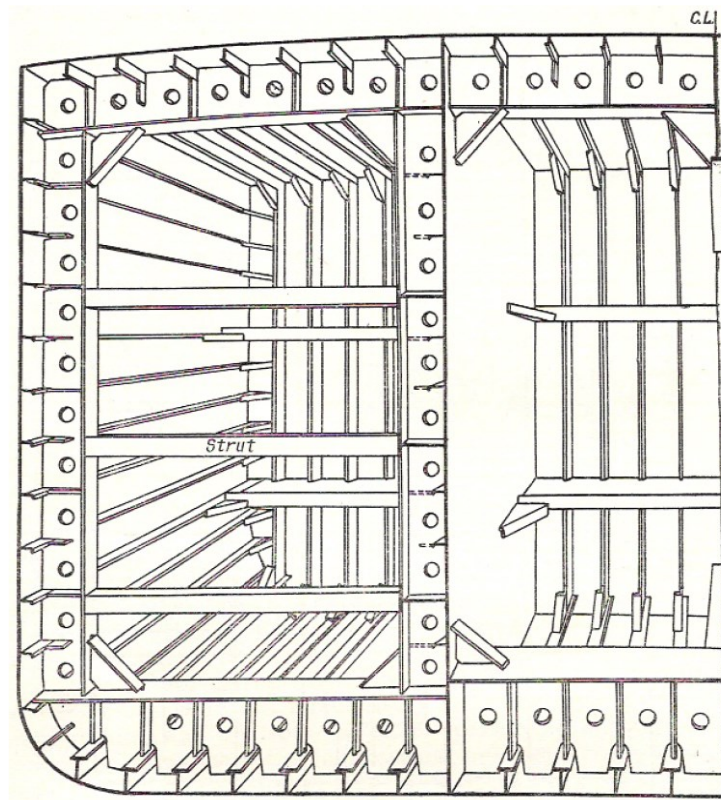


Figura 4 – Aspecto geral de embarcação composta por painéis enrijecidos [3]

Motivação

Fazendo-se uma revisão bibliográfica da literatura técnica disponível para a avaliação da resistência mecânica de painéis enrijecidos, bem como dos seus mecanismos de falha, pode-se perceber que existe uma grande quantidade de material publicado para a avaliação destas estruturas quando fabricadas em aço carbono. Contudo, quando se buscam referências técnicas acerca da resistência mecânica de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável, percebe-se que existe pouco material disponível.

Considerando-se que a natureza dos diagramas tensão *versus* deformação dos aços inoxidáveis difere bastante daqueles apresentados pelos aços carbono, como pode ser visto na Figura 5, espera-se um comportamento estrutural distinto para os painéis enrijecidos fabricados com estes diferentes materiais.

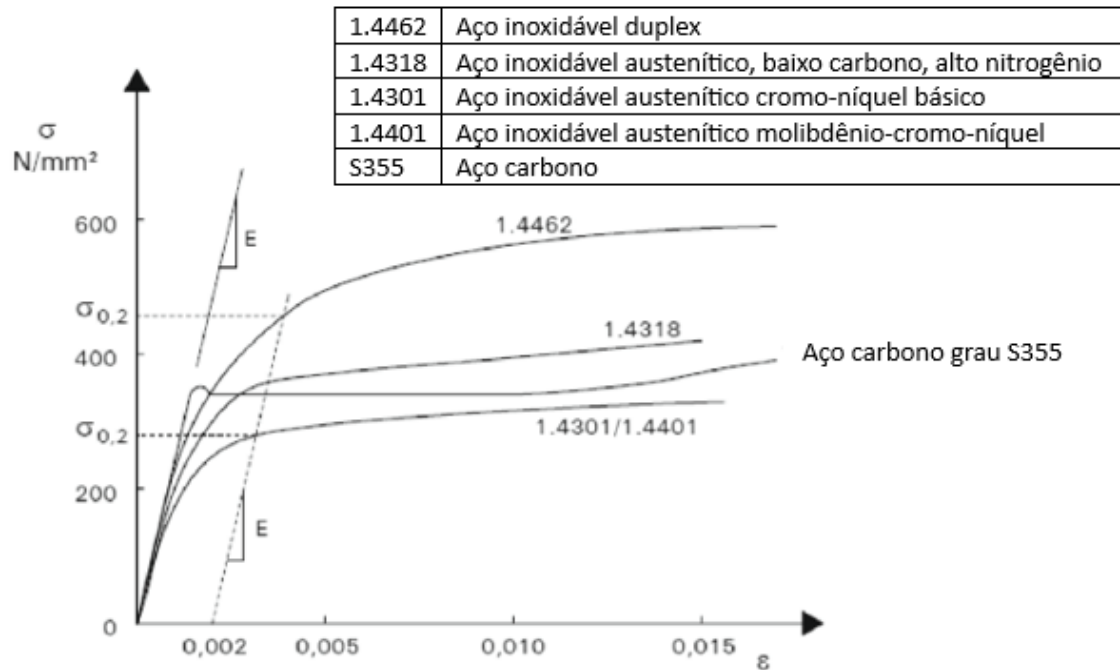


Figura 5 – Curvas tensão-deformação típicas para aços inoxidáveis e carbono [4]

São esperadas diferenças no estado de tensões, largura de chapa colaborante quando da flambagem da placa entre enrijecedores, carga última, entre outras, para os painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável quando comparados com seus pares em aço carbono.

Uma vez que o presente trabalho trata do projeto e dimensionamento de painéis enrijecidos que são largamente utilizados nas indústrias naval/*offshore*, a elevada resistência à corrosão dos aços inoxidáveis é uma característica extremamente desejável, dado o ambiente quimicamente agressivo onde navios, plataformas e embarcações em geral operam.

As diferenças supracitadas em termos de comportamento estrutural e resistência à corrosão, constituem motivação para um estudo mais aprofundado dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável.

Objetivos e Metodologia

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento estrutural de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável com base em ensaios de laboratório e modelos numéricos considerando-se a influência de diferentes níveis de imperfeições iniciais na resistência dos mesmos. Serão feitas avaliações da norma técnica ABS [1], utilizada para o dimensionamento de painéis enrijecidos fabricados em aço carbono para se determinar se a mesma apresenta resultados coerentes e adequados para o dimensionamento de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável do tipo austenítico.

Para tanto, foram realizados ensaios em laboratório de painéis enrijecidos, fabricados em aço inoxidável austenítico. Adicionalmente, modelos numéricos em elementos finitos foram desenvolvidos e calibrados com os resultados verificados nos ensaios experimentais.

Por meio de modelos numéricos, diferentes configurações geométricas dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável serão estudadas. Portanto, será desenvolvida uma análise paramétrica para a avaliação de como determinadas características como esbeltez das placas entre enrijecedores, razão de aspecto, tipo de enrijecedor, espessura das placas, dentre outras, influenciam na resistência dos painéis enrijecidos.

A partir dos resultados experimentais e numéricos obtidos, objetiva-se a proposição de formulações e métodos de dimensionamento de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável. São propostas formulações similares e que modifiquem de forma sutil aquelas existentes para o dimensionamento de painéis enrijecidos fabricados em aço carbono [1].

Escopo do trabalho

Neste capítulo de introdução foram apresentadas algumas aplicações e utilizações dos painéis enrijecidos na engenharia naval/*offshore*. Foram citadas algumas normas que regulam o projeto e dimensionamento dos painéis enrijecidos fabricados em aço carbono, bem como parâmetros que influenciam na resistência dos mesmos, tais como as imperfeições geométricas iniciais. A motivação para o estudo dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável foi exposta, bem como os

objetivos e a metodologia a ser aplicada neste trabalho de pesquisa. Um resumo dos capítulos subsequentes é descrito a seguir.

No capítulo dois será apresentada uma breve revisão bibliográfica dos principais trabalhos contemplando o estudo de painéis enrijecidos.

No capítulo três serão apresentados os parâmetros que governam o projeto e dimensionamento dos painéis enrijecidos, que foram obtidos de princípios gerais da engenharia, tais como Teoria da Elasticidade e Métodos de Energia. Serão apresentadas algumas equações de dimensionamento oriundas destes princípios e presentes nas normas técnicas de projeto de painéis enrijecidos fabricados em aço carbono.

No capítulo quatro será apresentado o programa experimental, detalhando os ensaios de caracterização à tração dos materiais e os ensaios de compressão dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável.

No capítulo cinco serão apresentados os modelos numéricos desenvolvidos para a realização de uma análise paramétrica para o estudo da resistência dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico.

No capítulo seis será realizada uma análise paramétrica para a avaliação de como aspectos geométricos relacionados com a esbeltez das placas entre enrijecedores, razão de aspecto, tipo de enrijecedor, espessura das placas, dentre outros, influenciam na resistência dos painéis enrijecidos confeccionados em aço inoxidável. Serão exibidos os resultados da análise paramétrica realizada com o auxílio do método dos elementos finitos e serão feitos comentários acerca do comportamento estrutural observado para os painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável.

No capítulo sete serão tecidas as considerações finais sobre o presente trabalho e será feito um resumo das principais conclusões obtidas. Adicionalmente, serão apresentadas sugestões para futuras pesquisas em consonância com o tema apresentado nesta tese.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo de revisão bibliográfica tem por objetivo abordar alguns trabalhos disponíveis na literatura que tratam de corrosão em estruturas de aço e também dos aspectos que influenciam na resistência de painéis enrijecidos.

Em artigo publicado pela OCIMF [5], são relatados diversos mecanismos de corrosão que afetam as estruturas marítimas, notadamente aquelas que produzem e armazenam petróleo. O efeito da corrosão ao longo de um determinado período de tempo provoca a diminuição da espessura dos elementos estruturais prejudicando portanto, sua eficiência estrutural.

As Sociedades Classificadoras, de uma forma geral, estabelecem taxas de corrosão em suas normas de dimensionamento para serem levadas em conta na fase de projeto das estruturas marítimas e *offshore*. Tais taxas de corrosão dependem diretamente da localização da estrutura a ser projetada bem como do elemento estrutural a ser dimensionado. A título de ilustração, na Tabela 1 e na Figura 6, podem ser visualizados alguns valores de corrosão nominais de projeto preconizados pela Sociedade Classificadora ABS em sua norma *Floating Production Installations* [6] para estruturas de casco duplo. Um guia detalhado de inspeção de casco de embarcações para a classificação da criticidade de anomalias por corrosão pode ser encontrado em ABS [7].

A despeito das margens de corrosão nominais de cerca de 2.00 mm, a serem levadas em consideração durante a fase de projeto, experiências recentes de membros da OCIMF [5], têm demonstrado taxas de corrosão de até 2.00 mm por ano devido à corrosão por *pitting*, nas estruturas de embarcações novas compostas por cascos simples e duplos. Grandes taxas de corrosão têm sido verificadas no fundo de tanques de óleo não pintados devido, entre outros, a processos de corrosão induzidos por micróbios. Adicionalmente, taxas de corrosão generalizada de até 0.24 mm por ano têm sido verificadas em espaços preenchidos por vapores. Estes tipos de desgaste e taxas de corrosão aceleradas, muito acima daquelas previstas em projeto, são motivos de sérias preocupações pois podem levar a falhas estruturais com consequente vazamento de óleo, explosão e até mesmo, a perda da embarcação.

Tabela 1 – Valores nominais de corrosão [6]

Elemento estrutural/Localização	Valores de corrosão nominal de projeto (mm)		
	Tanque de óleo	Tanque de lastro efetivamente pintado	Tanque de flutuação
Chapa de convés	1.0	2.0	1.0
Chapa de costado	N.A.	1.5	1.0
Chapa de fundo	N.A.	1.0	1.0
Chapa de fundo interna (casco duplo)	1.5		1.0
Chapa de antepara longitudinal	Entre tanques de óleo	N.A.	1.0
	Entre outros tanques		1.0
Chapa de antepara transversal	Entre tanques de óleo	N.A.	1.0
	Entre outros tanques		1.0
Elementos de apoio longitudinal e transversal de convés	1.5	2.0	1.0
Elementos internos de duplo fundo (pisos e vigas primárias)	N.A.	2.0	1.0
Elementos internos de duplo fundo (enrijecedores)	N.A.	2.0	1.0
Enrijecedores verticais e elementos de apoio não citados anteriormente	1.0	1.0	1.0
Longitudinais/enrijecedores não verticais e elementos de apoio não citados anteriormente.	1.5	2.0	1.0

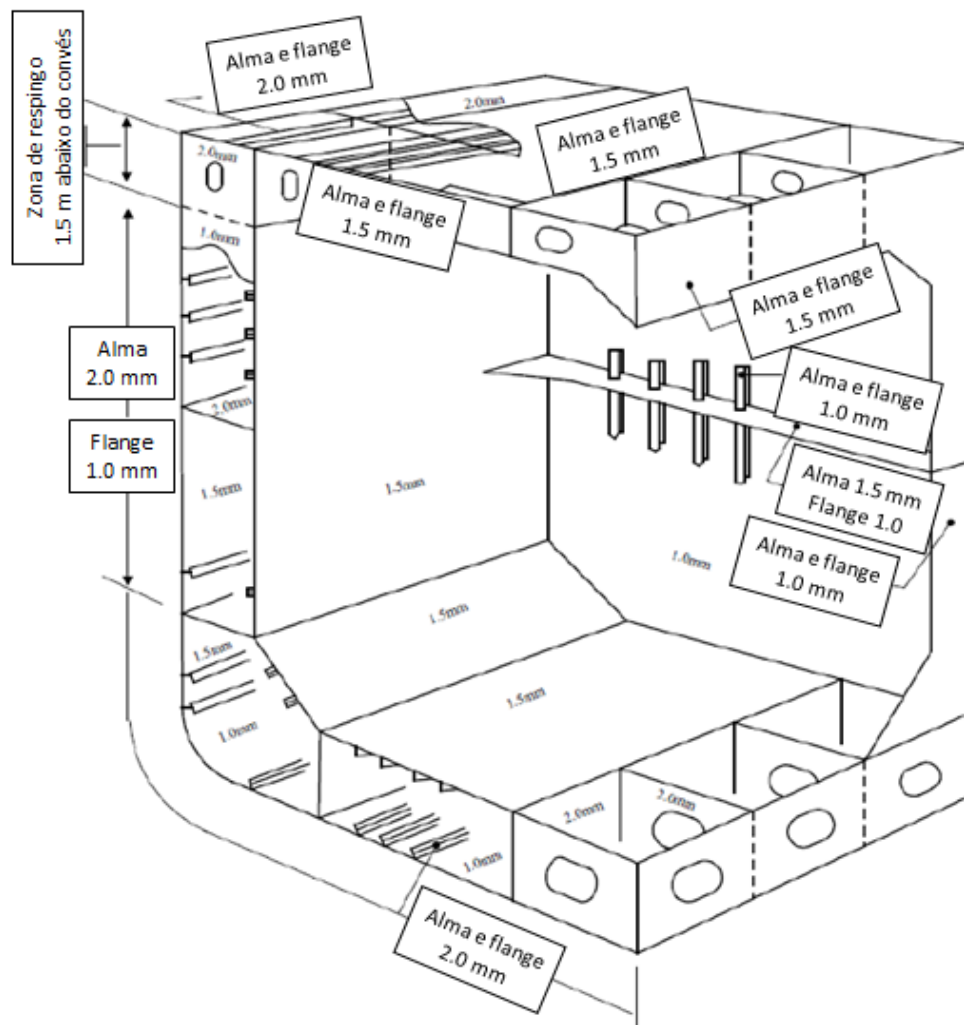


Figura 6 – Margens de corrosão nominais para casco duplo [6]

Adicionalmente aos mecanismos de corrosão mais convencionais, uma possível causa de corrosão acelerada tem sido o ataque microbial de bactérias presentes nos tanques de óleo de embarcações de casco duplo. Aparentemente, uma vez que o óleo cru é frequentemente carregado para o interior da embarcação a temperaturas superiores a do ar e também do mar onde a plataforma está instalada, durante este processo, a temperatura da estrutura dos tanques mantém-se a níveis superiores ao normal devido ao isolamento térmico proporcionado pelo casco duplo. Temperaturas elevadas em conjunto com água decantada nos tanques de óleo oferecem um ambiente propício para a proliferação de bactérias redutoras de sulfato. Adicionalmente, temperaturas elevadas no interior dos tanques de óleo em conjunto com água decantada podem ativar a formação de células corrosivas na superfície interna inferior dos mesmos [5].

Ainda de acordo com artigo publicado pela OCIMF [5], processos de corrosão excessiva por *pitting* na parte inferior de tanques de óleo não pintado têm sido relatados para navios tanque com menos de 5 anos de fabricação. Em um caso em particular, a profundidade média dos *pits* encontrados variou entre 2 mm e 4 mm, com uma densidade variando de 200 *pits*/m² até 400 *pits*/m² e *pits* com profundidade máxima de 7 mm. Estas taxas de corrosão por *pitting* são significativamente maiores do que aquelas normalmente esperadas nas normas de dimensionamento das Sociedades Classificadoras e têm sido atribuídas ao ataque microbial de bactérias nos tanques de óleo.

A corrosão por *pitting* é uma forma de corrosão localizada que é mais comumente encontrada no chapeamento de fundo de tanques e superfícies horizontais ou detalhes estruturais onde a água tende a se acumular. Ainda de acordo com a OCIMF [5], chapas de aço não pintadas em tanques de carga estão frequentemente cobertas por uma camada preta passiva e uma graxa residual remanescente de carregamentos anteriores de óleo que tendem a proteger a superfície do metal de uma corrosão acentuada. Uma perda localizada destas proteções naturais, particularmente em regiões de enchimento/esvaziamento de tanques (*bellmouths*), pode rapidamente causar um severo processo de corrosão por *pitting*. Uma corrosão extrema por *pitting*, além de causar perda de resistência estrutural pode levar a uma perfuração localizada do casco e a um sério problema ambiental. A Figura 7, exibe uma região de enchimento/esvaziamento de tanques (*bellmouth*) onde a formação de *pittings* é relativamente frequente.



Figura 7 – Região de enchimento/esvaziamento de tanques (*bellmouth*) [8]

Um eventual acidente provocado por um processo corrosivo pode provocar danos em larga escala para as empresas e a sociedade em geral. Há de se ter em mente que, os prejuízos não se limitam aos ativos físicos e lucros cessantes afetados pela corrosão, como por exemplo, embarcações, máquinas, equipamentos e perdas de produção. As perdas oriundas dos processos corrosivos podem afetar também as pessoas, com afastamentos temporários de seus postos de trabalho ou mesmo óbitos.

Adicionalmente, a perda de contenção de tubulações, vasos e tanques, originada por processos corrosivos, pode acarretar em consequências catastróficas para o meio ambiente. Um vazamento de óleo que venha a ocorrer em uma plataforma de petróleo tem o potencial de contaminar a flora e a fauna das regiões em que está inserida, provocando danos à vida marinha.

Finalmente, a própria reputação de empresas privadas e organizações governamentais ou não governamentais podem ser impactadas pelas consequências de acidentes que têm sua origem nas mazelas da corrosão. Empresas petroleiras podem ter o valor das suas ações negociadas em bolsas de valores, diminuídas em função de destaques negativos na mídia acerca de acidentes em suas instalações. Instituições governamentais como a Marinha do Brasil atrelada ao Ministério da Defesa, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, o Ministério do Meio Ambiente dentre outras, podem ser questionadas pela sociedade civil acerca da fiscalização exercida sobre as empresas produtoras e operadoras de

hidrocarbonetos. Sociedades classificadoras podem eventualmente serem questionadas se suas normas técnicas e códigos são adequados e proporcionam o nível de segurança satisfatório e desejável para os ativos a que se destinam.

Desta forma, os prejuízos decorrentes da corrosão vão muito além dos ativos nos quais ocorrem. As perdas devido à corrosão podem impactar pessoas, meio ambiente e reputação de organizações públicas e privadas.

Face ao exposto, é de todo desejável a utilização de materiais mais resistentes à corrosão em comparação aos aços carbonos tradicionais em ambientes agressivos como aqueles encontrados em embarcações *offshore*. De fato, recentemente, o AISC publicou dois códigos de projeto, [9] e [10], que tratam especificamente de estruturas fabricadas em aço inoxidável. Desta forma, os aços inoxidáveis podem se apresentar como materiais alternativos a serem utilizados no projeto e dimensionamento de estruturas *offshore*, motivo pelo qual os painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável merecem ser estudados.

Ao longo das últimas décadas, muitos autores têm estudado o comportamento estrutural de painéis enrijecidos fazendo uso de técnicas experimentais e numéricas.

Dow e Smith [11] estudaram o comportamento da flambagem e da pós-flambagem de placas retangulares sob compressão uniaxial na direção longitudinal. Os autores avaliaram a influência de várias formas de imperfeições geométricas iniciais na resistência das placas. Os pesquisadores concluíram que o efeito de uma determinada imperfeição geométrica inicial seria extremamente dependente da amplitude mas dependeria em menor escala da sua forma e da posição ao longo do comprimento da placa.

Baláz and Murray [12] utilizaram modelos experimentais em escala real para a realização de ensaios de flexão em um par de vigas constituídas por placas conectadas longitudinalmente a um *deck* metálico para avaliar como critério de falha, o aparecimento da primeira região com plasticidade. Os resultados obtidos foram utilizados para se comparar a largura colaborante da placa entre enrijecedores com as previstas por algumas normas de projeto. Os autores concluíram que a maioria dos códigos de projeto apresentavam resultados conservadores, ao passo que outras normas não conduziam a resultados precisos para placas esbeltas. A Figura 8 apresenta o arranjo experimental estudado por estes autores.

Os efeitos das distorções devido ao processo de soldagem, bem como das tensões residuais na resistência última de placas retangulares não enrijecidas,

sujeitas à compressão uniaxial, foram estudados por Cui e Mansour [13]. Os autores fizeram um resumo bastante interessante das formulações propostas por diferentes pesquisadores para a determinação da resistência última de placas não enrijecidas.

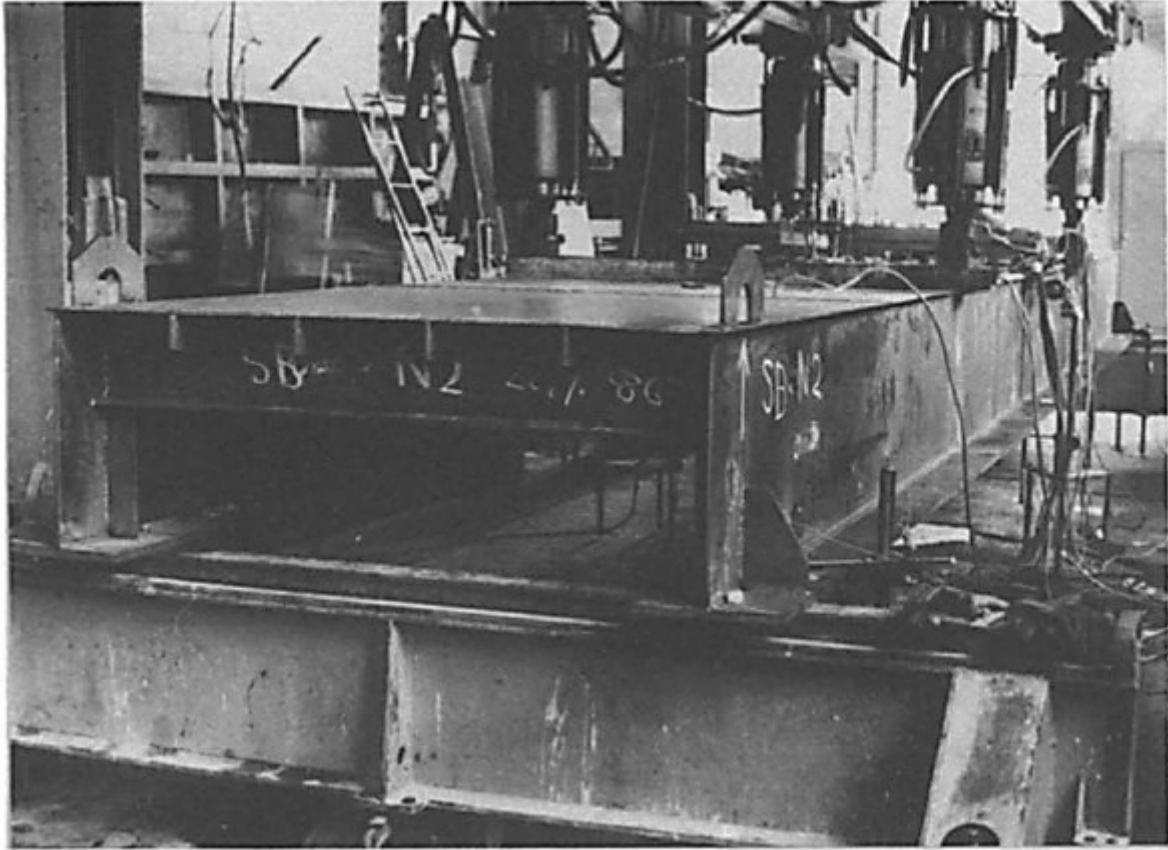


Figura 8 – Arranjo experimental estudado por Baláz e Murray [12]

Paik *et al.* [14] conduziram um estudo para o desenvolvimento de um método analítico simplificado para a determinação da resistência última de um painel enrijecido submetido a cargas de compressão uniaxial. O modelo exibido na Figura 9, composto pelo conjunto placa-enrijecedor, foi utilizado para se representar o painel enrijecido para a avaliação de três modos de colapso a saber: falha da placa, falha do enrijecedor sem rotação do mesmo e flambagem local da alma do enrijecedor levando-se a flambagem por torção do enrijecedor. Finalmente, os autores propuseram uma nova abordagem para a avaliação da largura efetiva da placa entre enrijecedores do painel como uma função não somente da carga de compressão aplicada, mas também das imperfeições iniciais na forma de deflexões iniciais e tensões residuais induzidas pelo processo de soldagem.

Grondin *et al.* [15] avaliaram a capacidade de carga de um painel enrijecido fabricado em aço carbono submetido à compressão axial e flexão, utilizando o método dos elementos finitos. Os autores investigaram diversos parâmetros, tais como: imperfeições iniciais da placa, tensões residuais, momentos fletores na extremidade do painel e razão entre as seções transversais da placa e do enrijecedor (A_p/A_s). Para todos os casos investigados, exceto onde indicado o contrário, a razão (A_p/A_s) foi tomada igual a 3.0 e a razão de aspecto (l/s) foi adotada igual a 4.0. A tensão residual de compressão na placa foi adotada como sendo 15% da tensão de escoamento, e o modelo de imperfeição inicial considerou três meias ondas senoidais. Os autores concluíram que tanto a magnitude quanto a forma das imperfeições iniciais exerciam influência significativa na capacidade de carregamento dos painéis enrijecidos quando estes falhavam por flambagem das placas. Ainda que a capacidade mínima de carga por flambagem seja obtida quando a configuração de imperfeições iniciais é constituída por oito meias ondas senoidais ao longo do comprimento do painel enrijecido, os autores recomendam que apenas três ou quatro meias ondas senoidais sejam assumidas quando a forma exata das imperfeições iniciais é desconhecida. Finalmente, os autores concluíram que as imperfeições iniciais na placa exerciam influência desprezível na capacidade de carga por flambagem global por flexão de Euler. A Figura 10 mostra os modos de falha de painéis enrijecidos verificados pelos autores.

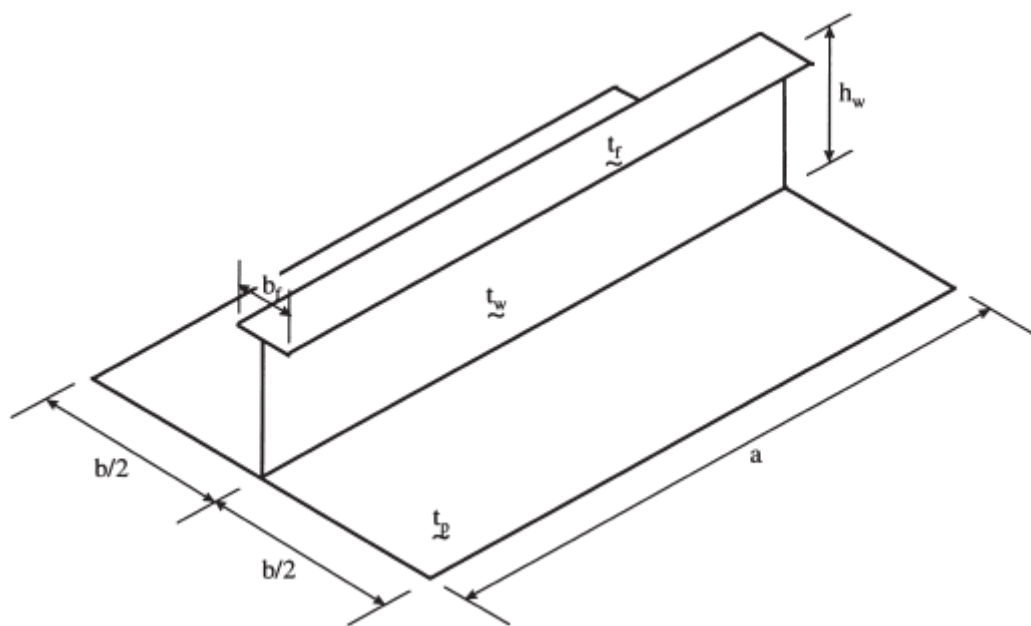
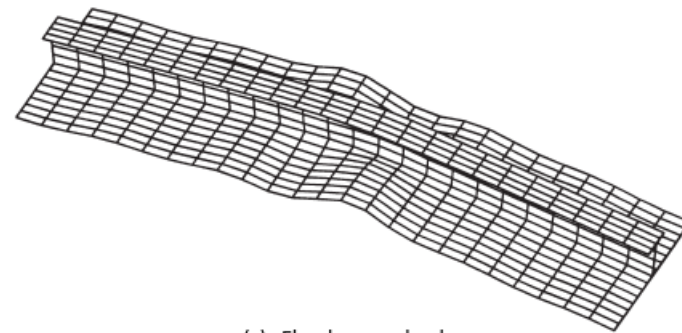
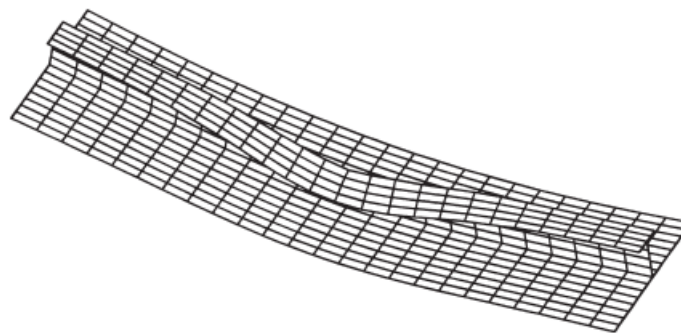


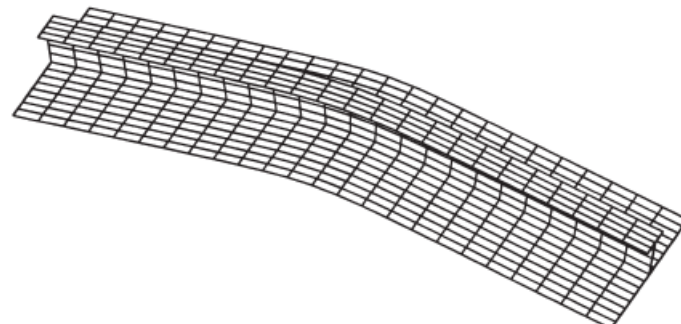
Figura 9 – Modelo composto pelo conjunto placa-enrijecedor [14]



(c) Flambagem da placa



(b) Flambagem por torção do enrijecedor



(a) Flambagem global por flexão - Euler

Figura 10 – Modos de falha verificados por Grondin *et al.* [15]

Alagusundaramoorthy *et al.* [16] investigaram a redução da carga de colapso de painéis enrijecidos sob compressão uniaxial devido a presença de aberturas quadradas e retangulares na placa entre enrijecedores e o aumento na resistência dos mesmos painéis devido à instalação de reforço ao redor das aberturas. Os pesquisadores utilizaram painéis enrijecidos fabricados em escala reduzida para a realização das análises experimentais. Os autores concluíram que a resistência dos painéis enrijecidos devido à instalação de reforço ao redor das aberturas estudadas,

aumentou consideravelmente para os modos de falha iniciados a partir das placas entre enrijecedores mas foi comparativamente menor para os modos de falha iniciados a partir dos enrijecedores. A Figura 11 exhibe os modelos experimentais com abertura na placa entre enrijecedores.

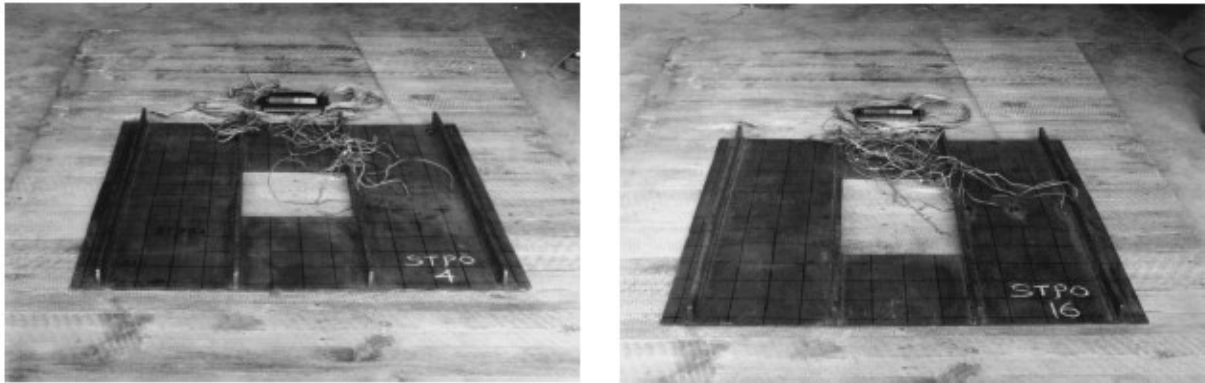


Figura 11 – Painéis com aberturas quadrada e retangular entre enrijecedores [16]

Johansson *et al.* [17] apresentaram uma visão geral do dimensionamento de estruturas compostas por placas utilizando-se o Eurocode 3, Parte 1-5 [18], destacando os painéis enrijecidos e não enrijecidos em pontes padrões de aço e estruturas similares. Os autores concluíram que a primeira versão do Eurocode 3, Parte 1-5 [18], poderia ser melhorada em muitos aspectos de modo a se obter um dimensionamento menos conservador.

Paik e Lee [19] desenvolveram um método semi-analítico para o cálculo da resistência última de placas e painéis enrijecidos fabricados em aço e ligas de alumínio, sujeitos a carregamentos simultâneos no plano e fora do plano. Os pesquisadores desenvolveram um programa de computador baseado na teoria proposta e testaram sua precisão e aplicabilidade, comparando-se os resultados obtidos com as previsões teóricas e numéricas disponíveis na literatura. Os autores concluíram que o método semi-analítico proposto seria bastante útil na previsão da resistência última de painéis enrijecidos.

Yusuke *et al.* [20] estudaram os efeitos das distorções devido à soldagem em painéis enrijecidos de navios que transportam carros. Os autores realizaram uma série de análises térmicas utilizando elementos finitos para a previsão das tensões residuais de compressão nas direções longitudinal e transversal das placas dos painéis enrijecidos e seus efeitos sobre a flambagem dos mesmos. Os pesquisadores concluíram que para uma mesma geometria de enrijecedor, a força de tração na

região de interface placa-enrijecedor e a força de compressão nas placas entre enrijecedores, dependeria somente do aporte térmico médio, não importando se foi utilizada soldagem contínua ou intermitente no processo.

Khedmati *et al.* [21] conduziram uma série de análises numéricas detalhadas de painéis enrijecidos submetidos a cargas de compressão longitudinais ou transversais atuantes no plano da placa do painel. Os painéis enrijecidos foram selecionados das estruturas dos *decks* de embarcações reais. Três procedimentos de soldagem dos enrijecedores à estrutura do *deck* foram considerados: soldagem de filete contínua, soldagem de filete intermitente em cadeia e soldagem de filete intermitente intercalada. A Figura 12 mostra os diferentes tipos de soldagem de filete estudados. Os autores concluíram que, em comparação com painéis enrijecidos constituídos por soldagem contínua, a resistência última decaiu de forma mais acentuada para os painéis com solda intermitente em cadeia do que para aqueles com solda intermitente intercalada.

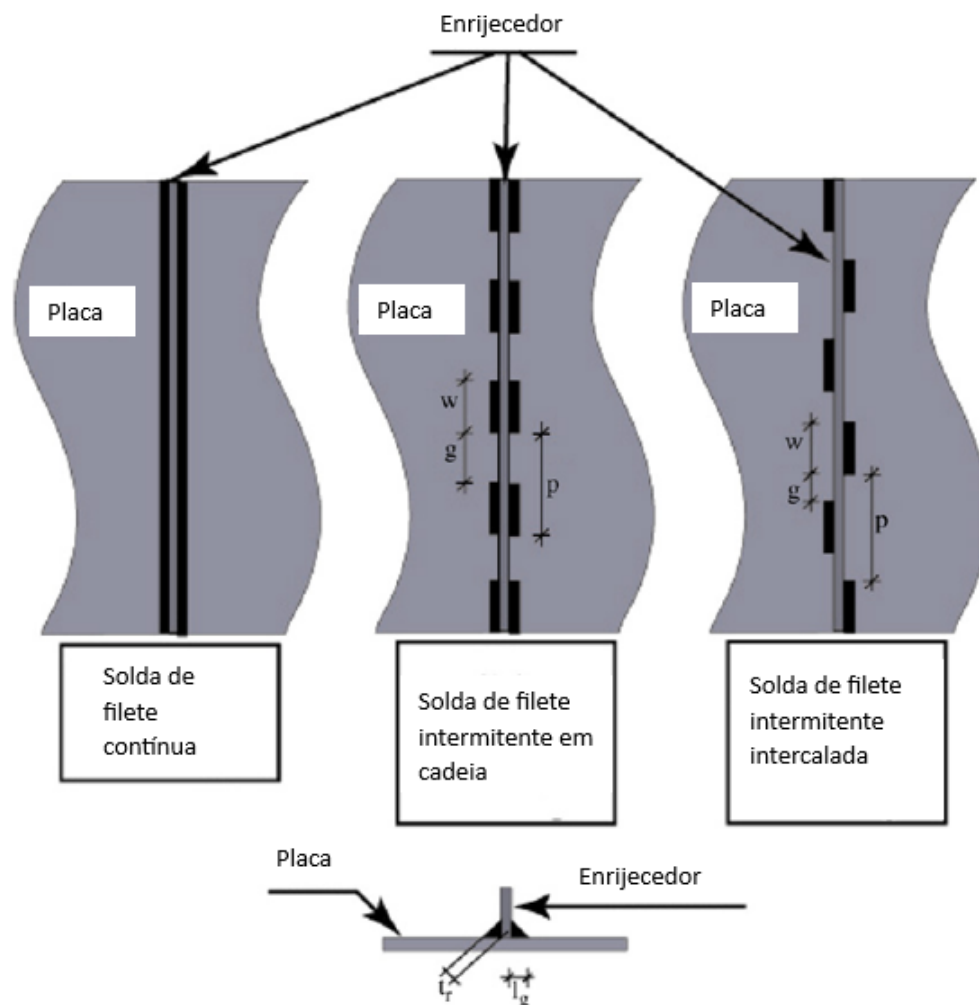


Figura 12 – Soldas de filete contínuas e intermitentes [21]

Ainda estudando o tema de painéis enrijecidos, Khedmati *et al.* [22] investigaram o comportamento no regime pós-flambagem de painéis fabricados em liga de alumínio, submetidos à compressão axial e pressão lateral perpendicular ao plano da placa entre enrijecedores. Os autores analisaram a influência de parâmetros geométricos, da zona termicamente afetada e das tensões residuais na resistência última dos painéis enrijecidos. Os pesquisadores concluíram que para pequenas magnitudes de pressão lateral, os painéis enrijecidos colapsaram sob compressão axial no plano, numa configuração de condição de apoio birrotulada. Contudo, com o aumento da pressão lateral, o modo de colapso se alterou para uma condição de apoio engastada. No que diz respeito à resistência última dos painéis enrijecidos, foi observado seu decréscimo com o aumento da largura da zona termicamente afetada na região da placa entre enrijecedores. Finalmente, os autores concluíram que as tensões residuais oriundas dos processos de soldagem, conduziram à diminuição da resistência última dos painéis enrijecidos estudados.

Stamatelos *et al.* [23] em seus estudos apresentaram uma metodologia para a avaliação analítica do comportamento da flambagem local e pós-flambagem de painéis enrijecidos isotrópicos e ortotrópicos. Os autores investigaram o comportamento de painéis enrijecidos, com diferentes razões de aspecto e número de enrijecedores carregados sob compressão uniaxial. A Figura 13 mostra os modelos em elementos finitos com os modos de flambagem encontrados para os painéis isotrópicos e ortotrópicos estudados. Os pesquisadores compararam a metodologia analítica proposta com resultados de análises não lineares obtidas com o método dos elementos finitos e concluíram que as cargas críticas de flambagem, a inclinação das curvas carga *versus* deslocamento na região pré-flambagem e pós-flambagem, assim como as cargas últimas dos painéis enrijecidos, puderam ser previstas com precisão satisfatória pelo método analítico desenvolvido.

Hassanein [24] realizou um estudo da resistência ao cisalhamento de vigas de alma esbelta fabricadas em aço inoxidável do tipo *lean duplex* (baixo conteúdo de níquel) grau EN 1.4162, utilizando o método dos elementos finitos. O autor realizou uma análise paramétrica variando a geometria do flange, da alma e a esbeltez da alma das vigas de alma esbelta. O aspecto geral das vigas de alma esbelta estudadas pode ser observado na Figura 14. O autor concluiu que a razão entre a largura do flange e a altura da alma afeta os modos de falha das vigas de alma esbelta fabricadas em aço inoxidável do tipo *lean duplex*. Adicionalmente, o pesquisador concluiu que o

comportamento estrutural das vigas de alma esbelta estudadas foi afetado pela razão entre a espessura do flange e a espessura da alma, ou seja, o aumento desta relação permitiu à viga alcançar maiores resistências e também maior ductibilidade.

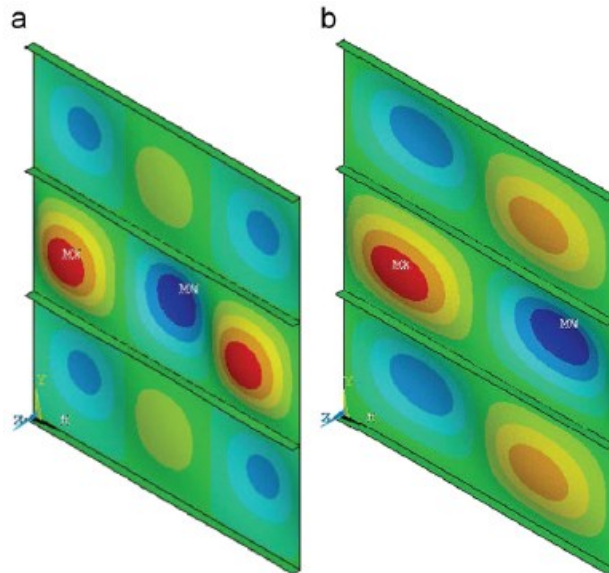


Figura 13 – Flambagem local das placas para painéis isotrópicos (a) e ortotrópicos (b) [23]

Amante e Estefen [25] estudaram a resistência à flambagem de painéis enrijecidos incorporando o campo de imperfeições iniciais real medido em um estaleiro, em modelos de elementos finitos. Os autores concluíram que a maior diminuição da resistência última dos painéis enrijecidos estudados, ocorreu quando o campo de imperfeições iniciais dos modelos numéricos coincidiu com o modo de flambagem natural das placas entre enrijecedores.

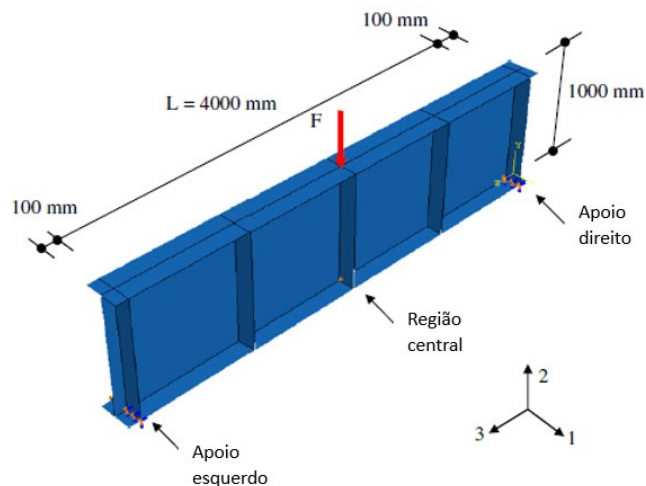


Figura 14 – Aspecto geral das vigas de alma esbelta [24]

Xu e Soares [26] avaliaram a resistência última de cinco painéis enrijecidos fabricados em aço carbono. Os painéis, que foram confeccionados em escala reduzida e apresentavam dois enrijecedores na direção longitudinal, foram submetidos à compressão axial até o colapso e também no regime pós-flambagem e foram avaliados utilizando-se resultados experimentais e modelos em elementos finitos. Os autores impuseram imperfeições iniciais aos modelos numéricos adotando-se o campo de deslocamentos medido e também formulações analíticas. Os pesquisadores concluíram que a resistência última dos painéis enrijecidos apresentada pelos modelos numéricos e os experimentais foi semelhante. Contudo, em alguns casos, as deformações pós-flambagem nas análises realizadas com o auxílio do método dos elementos finitos diferiram quando foram comparados os resultados dos modelos com campo de deslocamentos medido e com formulações analíticas. A Figura 15 apresenta os modelos em elementos finitos dos painéis enrijecidos estudados pelos autores.

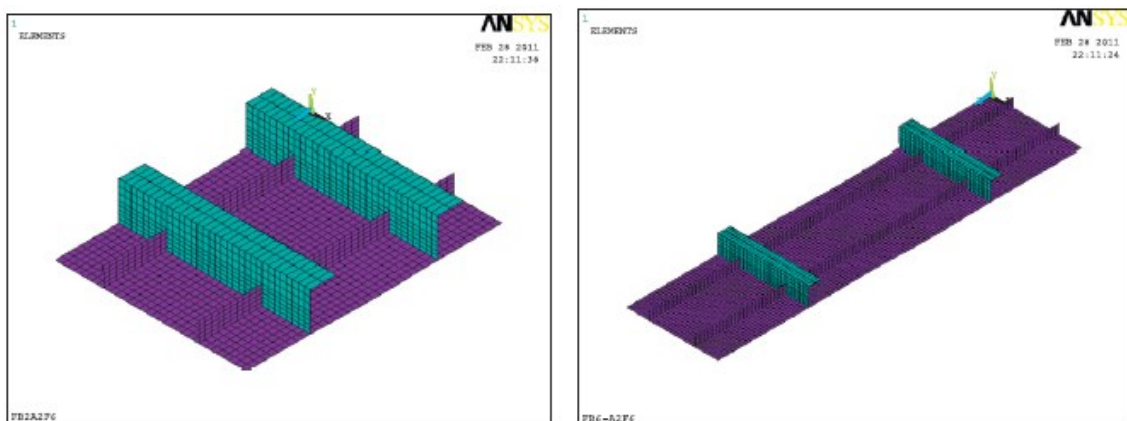


Figura 15 – Modelos de painéis enrijecidos estudados por Xu e Soares [26]

A fim de se avaliar a influência da corrosão por *pitting* na resistência última à compressão de painéis enrijecidos, Sultana *et al.* [27] conduziram uma série de análises em elementos finitos para investigar o efeito de corrosão aleatória na capacidade à compressão de estruturas marítimas. As variáveis estudadas incluíram a extensão da corrosão, a esbeltez e a razão de aspecto das placas dos painéis enrijecidos. A Figura 16 exhibe as distribuições aleatórias de *pitting* que foram estudadas pelos autores. Os pesquisadores concluíram que o comportamento mecânico de um elemento estrutural com corrosão é amplamente dependente da localização da corrosão, severidade e do campo de imperfeições iniciais.

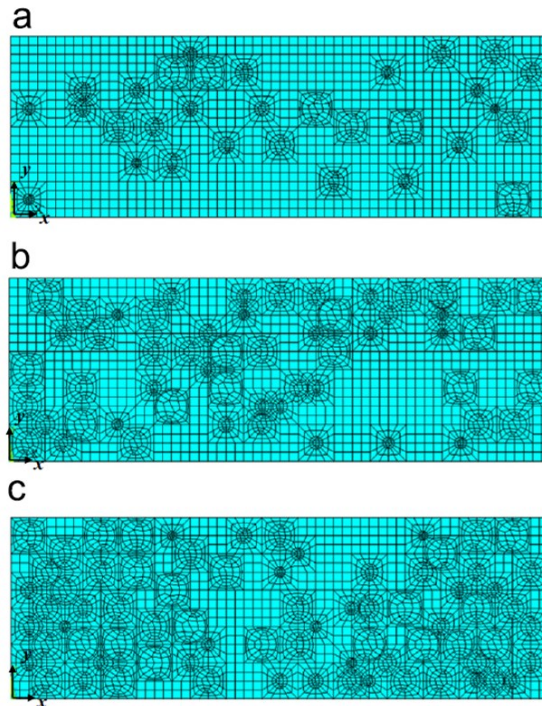


Figura 16 – Distribuições aleatórias de *pittings* [27]

Shadkam *et al.* [28] estudaram o efeito da sequência de soldagem e do tipo de enrijecedor na distorção de painéis enrijecidos. Para tanto, utilizaram modelos em elementos finitos. Os autores concluíram que a sequência de soldagem B aliada ao enrijecedor em cantoneira seria o par que provocaria a menor distorção do painel enrijecido. A Figura 17 exhibe as sequências de soldagem estudadas pelos autores, a Figura 18 apresenta a geometria dos painéis enrijecidos e a Figura 19 mostra o campo de deslocamentos perpendiculares ao plano da placa para a sequência de soldagem B aliada ao enrijecedor em cantoneira.

Chujutalli *et al.* [29] estudaram o efeito na resistência última dos painéis enrijecidos devido a aplicação de mossas locais em diferentes regiões dos mesmos. Os pesquisadores utilizaram modelos experimentais em escala reduzida, representativos de painéis enrijecidos em escala real da região de fundo à meia nau de navios do tipo Suezmax. Modelos numéricos também foram utilizados para a avaliação da perda da capacidade resistente última em relação a painéis enrijecidos sem imperfeições geométricas. A Figura 20 exhibe as diferentes posições de mossas locais aplicadas aos painéis enrijecidos. Os autores concluíram que os painéis com mossas localizadas no meio do vão exibiram uma diminuição da resistência última acentuada, quando comparados aos painéis com mossas localizadas a um quarto do vão. Adicionalmente, os pesquisadores concluíram que a falha para os painéis sem

moossa se deu na placa entre enrijecedores, enquanto que para os panéis com moossa, verificou-se um modo de falha global na região da imperfeição aplicada, independentemente se o dano estava presente no enrijecedor central ou no lateral.

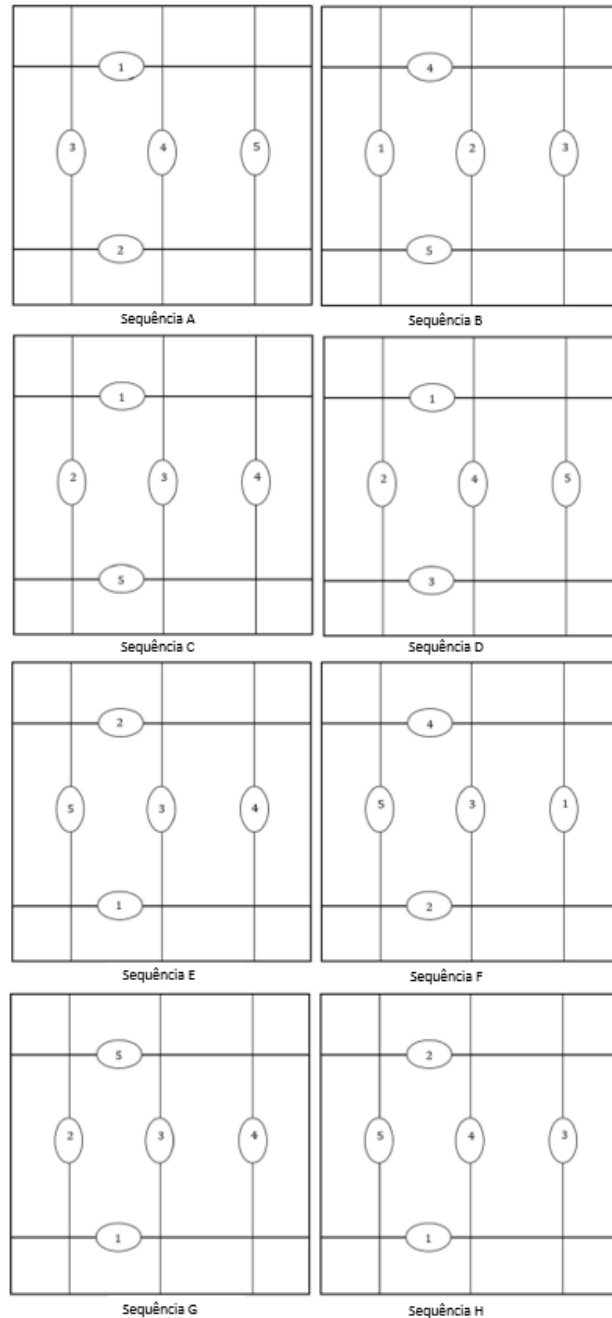


Figura 17 – Sequências de soldagem estudadas [28]

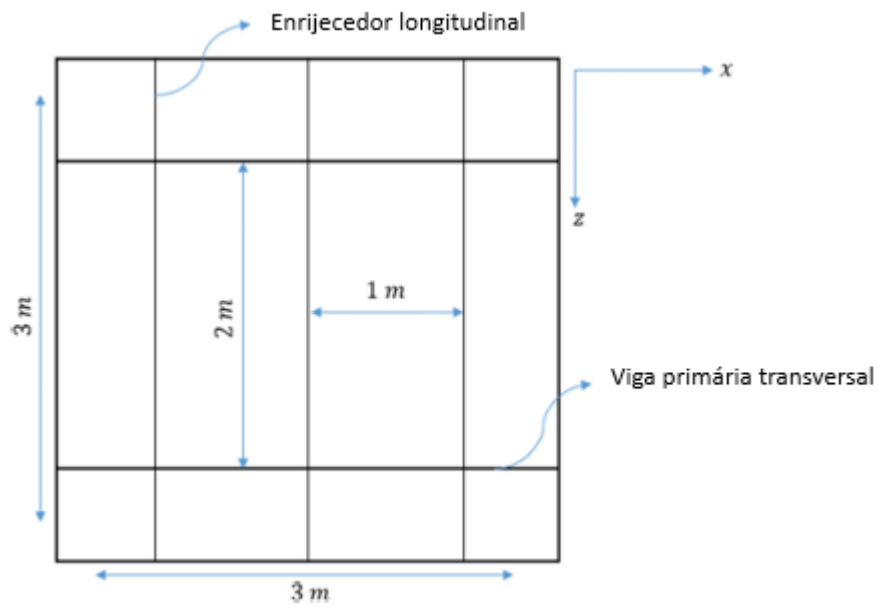


Figura 18 – Geometria dos painéis enrijecidos estudados [28]

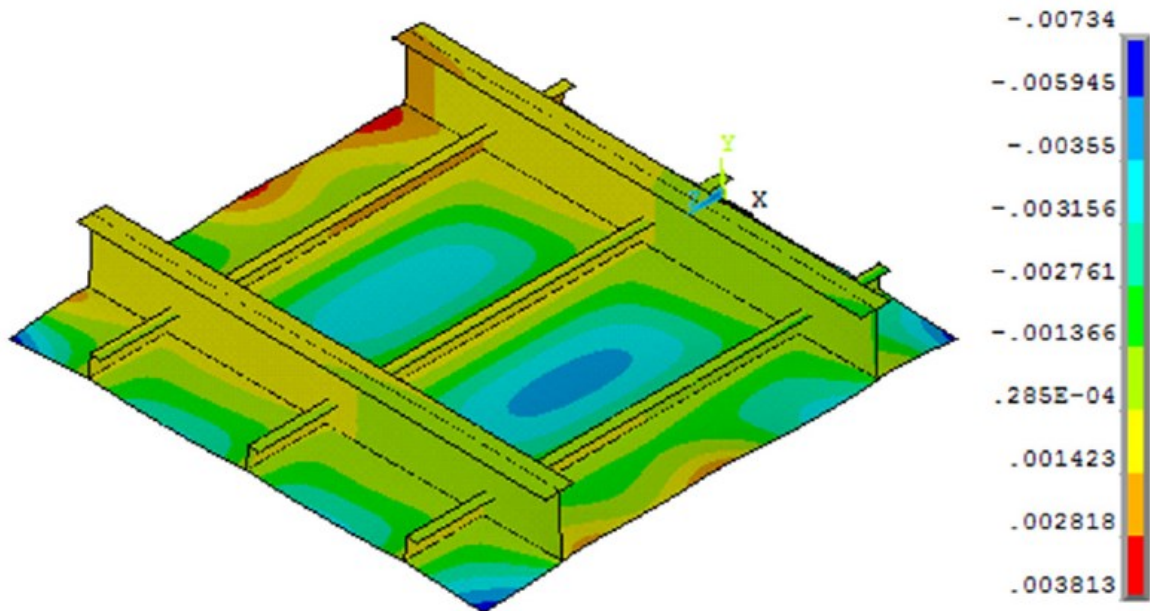


Figura 19 – Deslocamentos perpendiculares ao plano da placa – Unidades em (m) [28]

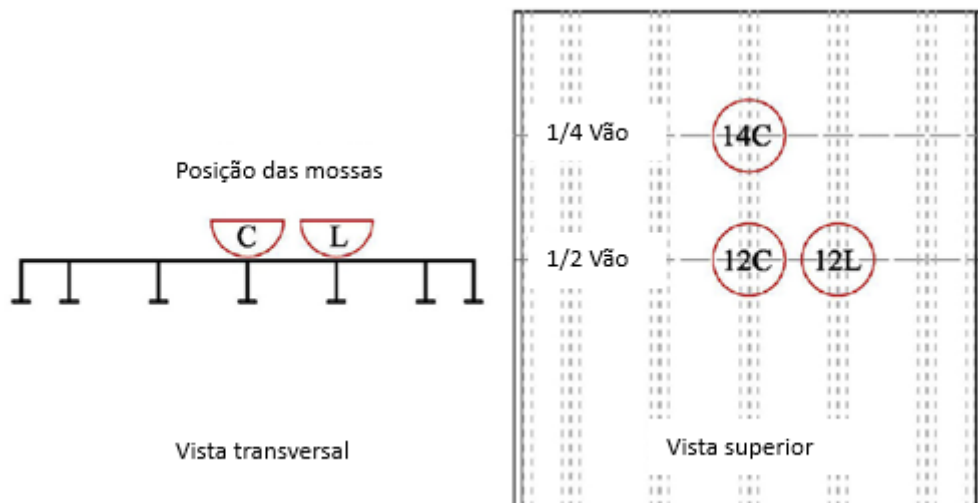


Figura 20 – Diferentes posições das molas nos painéis enrijecidos [29]

Rodrigues *et al.* [30] fizeram uma comparação da carga última de painéis enrijecidos fabricados em aço carbono e aço inoxidável, sujeitos à compressão uniaxial, avaliando diferentes níveis de imperfeições iniciais na resistência dos mesmos. Para tanto, utilizaram o método numérico dos elementos finitos. Os autores concluíram que quanto maior a imperfeição geométrica inicial atribuída aos painéis enrijecidos, menor seriam as suas resistências últimas.

O comportamento de flambagem por cisalhamento de vigas de alma esbelta fabricadas em aço inoxidável austenítico e duplex foi investigado por Chen *et al.* [31]. Os autores avaliaram a influência de enrijecedores transversais verticais soldados na alma dos painéis, na resistência à flambagem das vigas de alma esbelta. Foram realizados ensaios experimentais e análise paramétrica em elementos finitos. Os pesquisadores propuseram novos critérios de dimensionamento baseados nos resultados encontrados em suas análises e concluíram que a metodologia proposta demonstrou maior precisão na previsão da flambagem por cisalhamento de vigas de alma esbelta fabricadas em aço inoxidável, quando comparada aos resultados apresentados pelos Eurocodes EN 1993-1-5 [18] e EN 1993-1-4 [44]. A Figura 21 exibe a comparação de um modelo experimental com o respectivo modelo numérico após a flambagem dos painéis da alma das vigas.

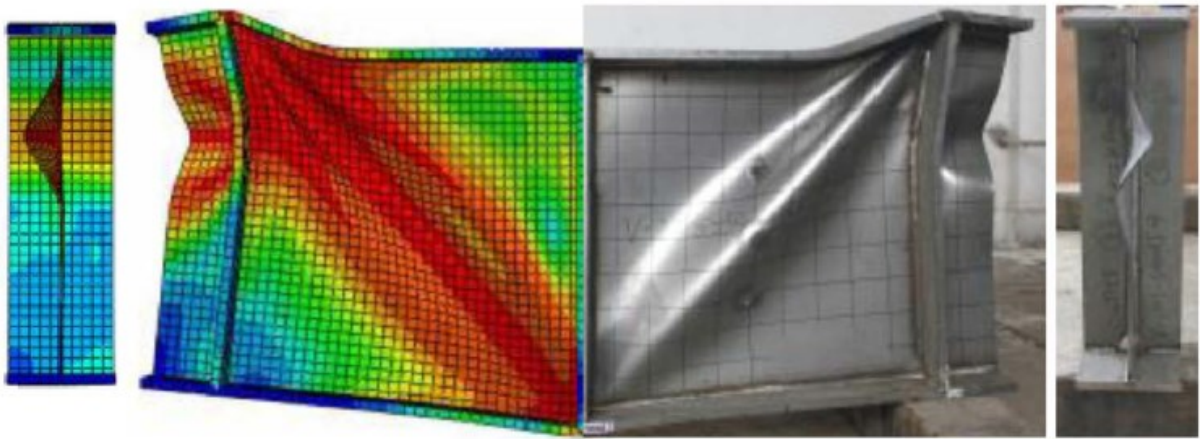


Figura 21 – Deformada pós-flambagem dos modelos experimental e numérico [31]

Os efeitos das sequências de soldagem na distorção e geração de tensões residuais em painéis enrijecidos foram estudados por Rodrigues *et al.* [32]. Os autores realizaram três diferentes sequências de soldagem feitas por robô em painéis enrijecidos e obtiveram reduções significativas nas tensões residuais de compressão bem como nas distorções. Os pesquisadores concluíram que a sequência de soldagem a partir dos enrijecedores internos para os externos apresentava uma melhor distribuição de calor, gerando menores distorções e tensões residuais.

Yuan *et al.* [33] investigaram o comportamento ao cisalhamento de vigas de alma esbelta fabricadas em aço inoxidável austenítico e duplex. Foram estudados painéis de vigas de alma esbelta com e sem reforço diagonal ao longo da alma. Para tanto, os autores utilizaram modelos experimentais e realizaram análise paramétrica em elementos finitos para ampliar a base de dados de resultados. Os resultados encontrados levaram os pesquisadores a propor novos critérios de dimensionamento para a avaliação da resistência ao cisalhamento de vigas de alma esbelta. Os autores concluíram que a presença de enrijecedores diagonais iria subdividir o painel da alma da viga em sub-painéis triangulares e proporcionariam rigidez adicional fora do plano da alma, resultando em profundas mudanças na deformada, quando da aplicação da carga crítica de flambagem, resistência última e resistência pós-flambagem das vigas, quando comparadas com aquelas enrijecidas apenas na direção vertical da alma. De forma geral, foi verificado um aumento considerável na resistência à flambagem por cisalhamento, resistência última ao cisalhamento e rigidez à flexão, quando da aplicação de enrijecedores diagonais nas almas das vigas.

Yi *et al.* [34] realizaram medições diretas das tensões residuais biaxiais oriundas dos processos de soldagem. Tais medições foram feitas em painéis enrijecidos em escala real da região de fundo de um navio do tipo contentor que foi fabricado utilizando-se a mesma tecnologia de soldagem frequentemente utilizada na indústria da construção naval. Adicionalmente, os autores apresentaram modelos computacionais em elementos finitos e formulações analíticas simples para estimar as tensões residuais devido à soldagem. Os autores concluíram que os modelos numéricos, bem como as formulações analíticas simplificadas, apresentaram boa concordância com as medições diretas realizadas nos painéis enrijecidos, na previsão das tensões residuais oriundas da soldagem. A Figura 22 mostra os painéis enrijecidos nos quais foram medidas as tensões residuais biaxiais. A Figura 23 apresenta os pontos onde as tensões residuais biaxiais foram medidas. Na Figura 24 podem ser visualizadas as tensões residuais longitudinais e transversais que foram medidas, com sua magnitude em função da distância em relação à linha de centro da solda. Finalmente, a Figura 25 exibe a distribuição de tensões residuais genérica para um painel enrijecido onde na região dos enrijecedores longitudinais e das vigas primárias transversais prevalecem as tensões normais de tração e entre estes elementos podem ser observadas regiões com tensões normais de compressão que equilibram as forças oriundas das tensões residuais atuantes nas respectivas áreas.



Figura 22 – Painéis enrijecidos nos quais foram medidas as tensões residuais biaxiais [34]

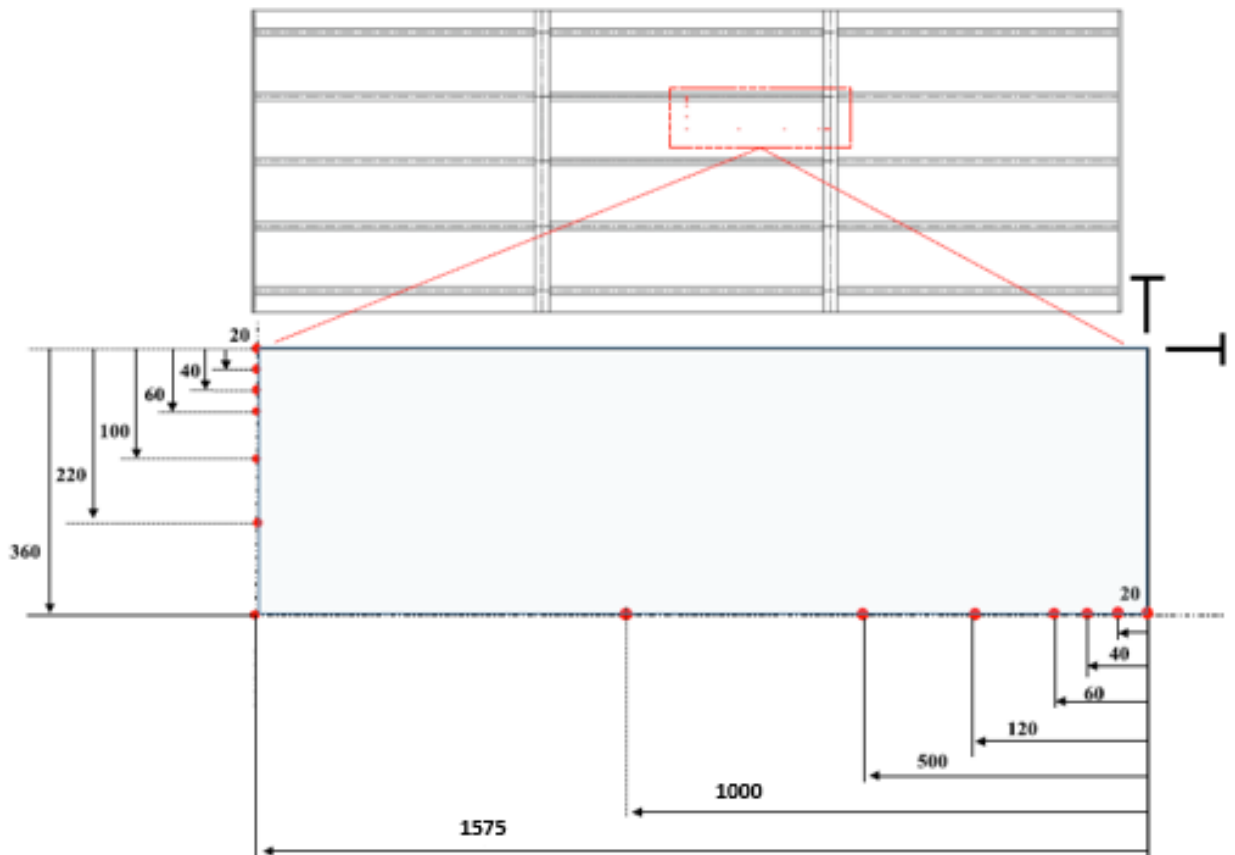


Figura 23 – Pontos onde foram medidas as tensões residuais biaxiais [34]

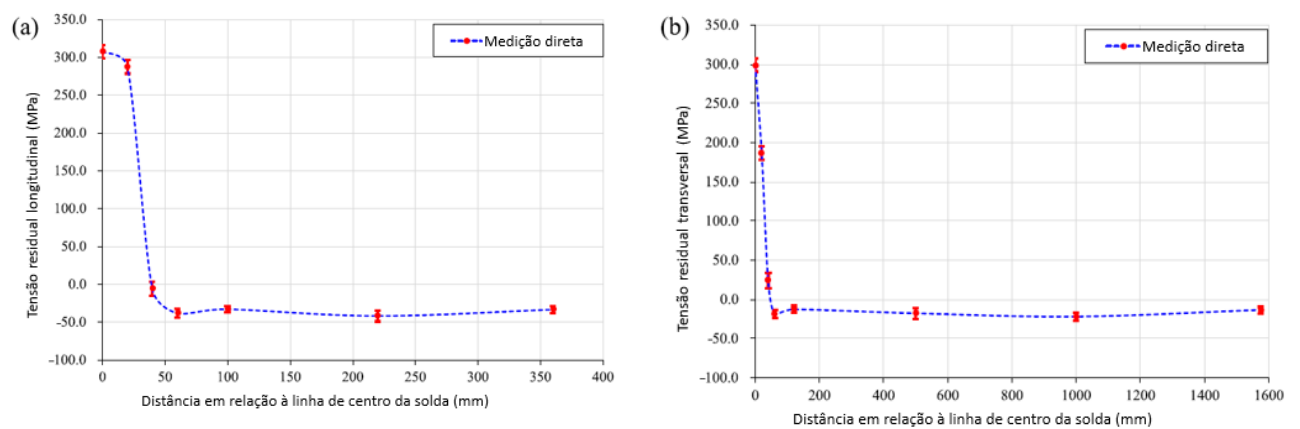


Figura 24 – Tensões residuais longitudinais e transversais [34]

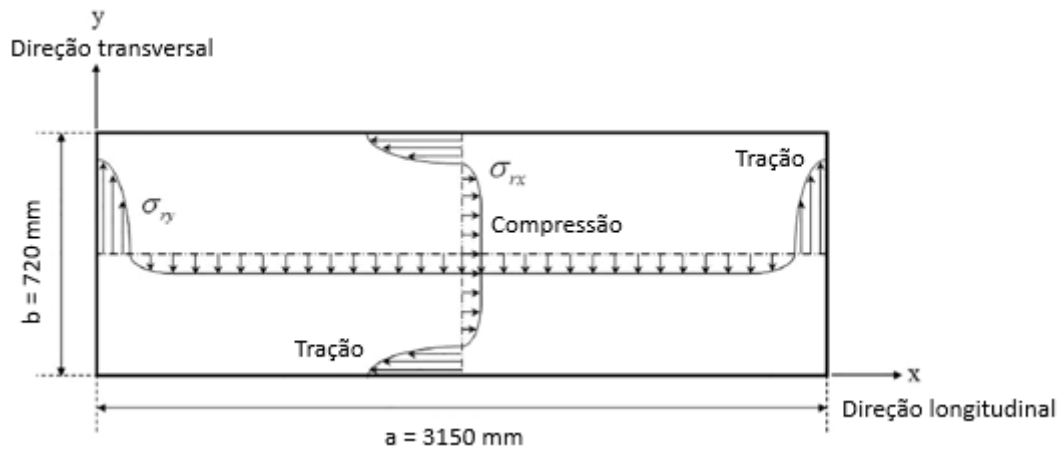


Figura 25 – Distribuição de tensões residuais genérica [34]

Kövesdi *et al.* [35] estudaram a resistência à flambagem de painéis enrijecidos na direção longitudinal submetidos à compressão, com enrijecedores de seção transversal fechada. Os pesquisadores investigaram a metodologia corrente de projeto do Eurocode 3 [18] que descreve o comportamento de painéis enrijecidos como uma combinação de coluna e placa e propuseram um procedimento alternativo de dimensionamento. Os pesquisadores concluíram que as formulações do Eurocode apresentavam previsões seguras de resistência para o comportamento interativo de coluna e placa dos painéis enrijecidos, porém, não econômica em muitos casos.

Ryu *et al.* [36] pesquisaram o colapso progressivo de painéis enrijecidos fabricados em escala real, em situação de incêndio. Foram estudados painéis com e sem proteção passiva ao fogo, com a utilização de modelos em elementos finitos. Os pesquisadores concluíram que a modelagem numérica com a utilização de elementos finitos de casca plana para a estrutura em aço dos painéis enrijecidos e também para a proteção passiva ao fogo, apresentou resultados satisfatórios tanto para a análise estrutural de transferência de calor quanto para a resposta estrutural não linear, quando do colapso progressivo da estrutura devido ao incêndio.

Quispe *et al.* [37] estudaram a resistência última da seção transversal tipo caixão denominada de viga-navio de uma embarcação do tipo Suezmax, quando submetida a carregamento de flexão. Para tanto, os autores utilizaram um modelo experimental em escala reduzida e modelos numéricos. A Figura 26 exhibe a configuração deformada pós-colapso para os modelos experimental e numérico.

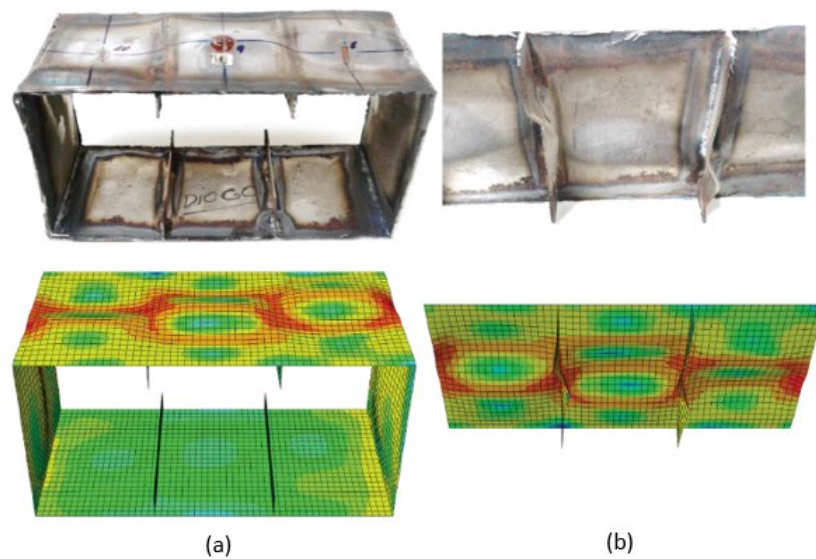


Figura 26 – Deformada pós-colapso a) viga-caixão b) enrijecedores superiores [37]

Os autores concluíram que os modelos numéricos de viga-caixão poderiam ser aplicados a outros painéis representativos de navios com diferentes combinações de esbeltez, para as placas entre enrijecedores e para os enrijecedores, no estudo do comportamento estrutural dos painéis enrijecidos.

Martins e Cardoso [38] pesquisaram a flambagem elástica por cisalhamento de vigas de alma esbelta com enrijecedores instalados na direção diagonal da alma. Foram estudados enrijecedores de alma com seção transversal aberta e fechada e foram propostos coeficientes de flambagem por cisalhamento para as configurações de painéis estudadas pelos autores. Os pesquisadores concluíram que o comportamento de flambagem elástica dependeria fortemente das características mecânicas dos enrijecedores instalados na direção diagonal da alma das vigas. Adicionalmente, os autores perceberam que a colocação dos enrijecedores na alma das vigas esbeltas, na direção da diagonal comprimida seria mais efetiva do que a inserção destes enrijecedores na direção da diagonal tracionada.

Prato *et al.* [39] estudaram diferentes estratégias de modelagem numérica em elementos finitos para se reproduzir os resultados de ensaios experimentais de compressão de painéis enrijecidos fabricados em liga de alumínio. O trabalho dos autores discutiu os efeitos na flambagem e no regime pós-flambagem de diferentes metodologias para a representação de imperfeições geométricas e ligações de enrijecedores do tipo cantoneira rebitada nas placas dos painéis enrijecidos. Os pesquisadores concluíram que a utilização de um modelo de conexão representativo

entre os enrijecedores e as placas dos painéis enrijecidos, seria o fator mais significativo no desenvolvimento de modelos precisos para a previsão da flambagem e estudo do comportamento pós-flambagem dos painéis enrijecidos, embora, as imperfeições geométricas também exercessem um importante papel neste contexto.

No estudo de vigas de alma esbelta com enrijecedores longitudinais na alma, Chen e Yuan [40] pesquisaram o comportamento da flambagem local sob a ação de momento fletor e esforço cortante. Foram utilizados modelos em elementos finitos e experimentais de vigas de alma esbelta fabricadas em aço inoxidável austenítico e duplex para a realização de uma análise paramétrica objetivando avaliar a influência dos enrijecedores longitudinais horizontais na flambagem local dos painéis. A Figura 27 exibe dois modelos experimentais que foram analisados.

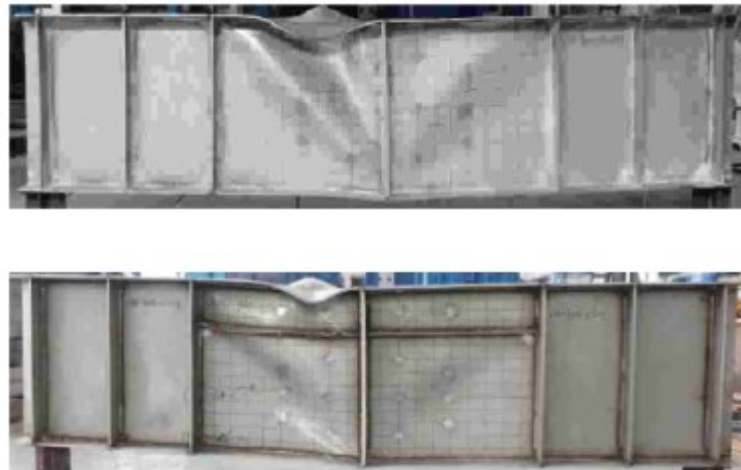


Figura 27 – Modelos de vigas de alma esbelta fabricadas em aço inoxidável [40]

Os autores concluíram que comparadas às vigas de alma esbelta constituídas apenas de enrijecedores verticais, a presença dos enrijecedores horizontais longitudinais conduziu a um aumento significativo da carga crítica de flambagem e a um aumento considerável da resistência última.

Rodrigues *et al.* [41] estudaram o comportamento estrutural de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304, quando submetidos à compressão. Os autores estudaram a resistência última das placas entre enrijecedores do tipo cantoneira. Foram comparados os resultados apresentados por ensaios experimentais e por análise paramétrica em elementos finitos com os resultados fornecidos por critérios de dimensionamento do ABS [1]. A investigação

revelou discrepâncias entre os resultados encontrados pelos pesquisadores e aqueles fornecidos pelo ABS [1]. Desta forma, uma nova equação de dimensionamento para a avaliação da resistência última das placas entre enrijecedores fabricadas em aço inoxidável austenítico 304 foi proposta, uma vez que os critérios de projeto do ABS [1] foram calibrados para painéis enrijecidos fabricados em aço carbono.

Wang *et al.* [42] estudaram o comportamento da resistência última de painéis enrijecidos sob esforços simultâneos de compressão no plano da placa entre enrijecedores e carregamento de pressão perpendicular a este plano. Para tanto, utilizaram o método dos elementos finitos, para avaliar a resistência estrutural de modelos compostos por um enrijecedor e sua respectiva placa colaborante. Os autores concluíram que a posição e a forma de introdução das imperfeições iniciais na alma dos enrijecedores exerceria grande influência na segurança e confiabilidade dos modelos estudados em prever adequadamente o comportamento estrutural dos painéis enrijecidos.

Nos trabalhos mencionados anteriormente, foram considerados, em sua maioria, painéis enrijecidos fabricados em aço carbono. A exceção apresentou-se para as vigas de alma esbelta fabricadas em aço inoxidável austenítico e duplex, em que alguns pesquisadores estudaram essencialmente o comportamento à flambagem da alma dos painéis quando submetidos a esforços de flexão e cisalhamento. As referências mencionadas na revisão bibliográfica deste trabalho ocuparam-se da investigação dos parâmetros que afetam o comportamento dos painéis enrijecidos, tais como: parâmetro de esbeltez, tipo de enrijecedor, imperfeições geométricas iniciais, tensões residuais, modos de falha, critérios de falha, procedimentos de soldagem, corrosão por *pitting* e critérios de dimensionamento preconizados pelas normas técnicas. Por outro lado, até onde se tem conhecimento, os painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável submetidos à compressão só foram estudados por Rodrigues *et al.* [41] em artigo que antecedeu a conclusão deste trabalho de pesquisa. Com este cenário em mente, este trabalho de pesquisa objetiva investigar o comportamento estrutural à compressão de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável. Para tanto, serão utilizados modelos experimentais em escala reduzida e modelos numéricos com o auxílio do método dos elementos finitos. No contexto das análises numéricas, foi utilizado o *software* Ansys [55] para o pré-processamento e o processamento dos modelos em elementos finitos e o *software* Femap/Nastran [56] para o pós-processamento dos resultados.

Adicionalmente, será feita a investigação da norma ABS [1], que trata da resistência de painéis enrijecidos fabricados em aço carbono, para se avaliar se suas previsões de resistência também se aplicariam adequadamente aos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Introdução

Painéis enrijecidos são frequentemente utilizados em estruturas marítimas conforme mencionado anteriormente. Tais painéis são compostos por placas, enrijecedores e vigas primárias. A principal função das placas dos painéis enrijecidos, no âmbito das embarcações *offshore*, é a transferência das cargas hidrostáticas e hidrodinâmicas (a diferença entre as pressões externa e interna) para os enrijecedores e estes, por sua vez, fazem o descarregamento nas estruturas primárias [45].

De forma geral, as placas dos elementos estruturais de embarcações e estruturas marítimas estão submetidas a um estado plano biaxial de tensões normais oriundo de esforços de flexão globais e de esforços locais devido ao carregamento de pressão atuante perpendicularmente às placas entre enrijecedores. Adicionalmente, tensões de cisalhamento desenvolvem-se ao longo das arestas das placas entre enrijecedores. A Figura 28 apresenta de forma esquemática um estado plano biaxial de tensões normais nas placas dos painéis enrijecidos devido às cargas globais de viga-navio e aos carregamentos locais de pressão no casco das embarcações.

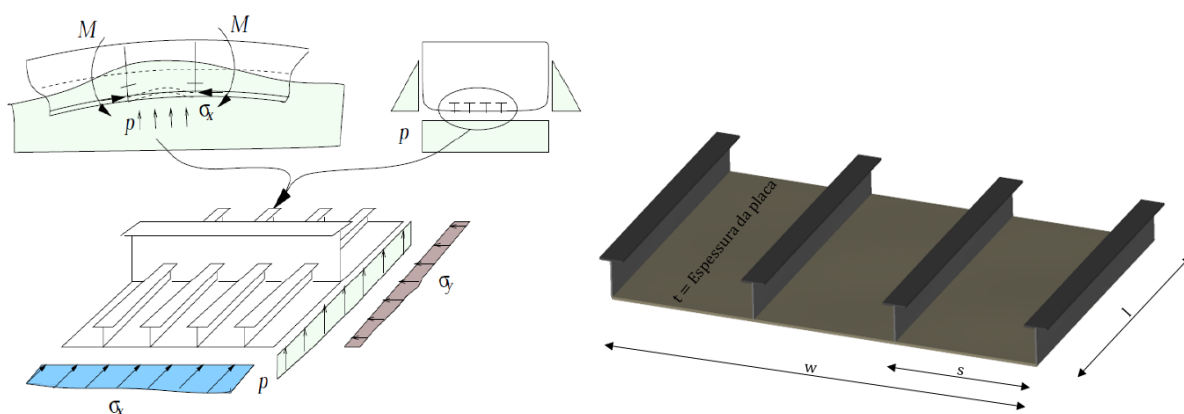


Figura 28 – Estado plano biaxial de tensões normais em painel enrijecido [45]

A análise rigorosa dos painéis enrijecidos submetidos às ações simultâneas de pressões laterais e carregamentos no plano das placas não é tarefa simples. Para fins de dimensionamento, o problema é frequentemente dividido de tal forma que a carga crítica de flambagem, bem como a carga última das placas sejam determinadas para cada carregamento atuando isoladamente. A carga crítica de flambagem e também a

carga última das placas submetidas à ação simultânea de esforços normais ao plano das mesmas e também esforços atuantes no plano, é determinada por meio de alguma fórmula de interação entre estes esforços [45].

Os parâmetros de maior influência no comportamento estrutural dos painéis enrijecidos estão elencados a seguir:

- relação comprimento/largura do painel enrijecido (l/w);
- geometria do enrijecedor (cantoneira, tê ou barra chata) e espaçamento entre os mesmos (s);
- relação comprimento/largura das placas entre enrijecedores (proporção $\alpha = l/s$);
- esbeltez das placas ($\text{largura/espessura} = s/t$);
- número de enrijecedores (n);
- tensões residuais;
- imperfeições geométricas iniciais;
- condições de contorno;
- tipo de carregamento.

Conforme [45], os possíveis modos de falha de painéis enrijecidos quando submetidos à compressão longitudinal podem ser classificados da seguinte forma:

- Flambagem da placa entre enrijecedores – Ocorre quando a máxima capacidade estrutural da placa é excedida podendo resultar no colapso do painel enrijecido antes que uma plastificação significativa ocorra nos enrijecedores;
- Flambagem por flexão dos enrijecedores e respectiva placa colaborante – Este tipo de falha geralmente envolve a plastificação dos enrijecedores, que é acelerada pela perda de rigidez à flexão, devido à flambagem ou plastificação da placa colaborante;
- Flambagem por flexo-torção dos enrijecedores – Ocorre devido a perda de rigidez à flexo-torção elástica ou elastoplástica dependendo da esbeltez dos enrijecedores, da rigidez rotacional proporcionada pelas placas colaborantes e das imperfeições geométricas iniciais;
- Flambagem global do painel – Envolve a flexão dos enrijecedores e das vigas primárias.

Para painéis curtos, ou seja, painéis com reduzida proporção $\alpha = l/s$, das placas entre enrijecedores, a flambagem local das referidas placas pode ser o modo de falha crítico. Contudo, as placas, dependendo das condições de contorno e da rigidez à torção dos enrijecedores, apresentam ainda elevada reserva de resistência. Tal reserva de resistência pode ser levada em consideração no projeto de painéis enrijecidos. Contudo, deve-se assegurar que a flambagem local das placas entre enrijecedores não ocorra com frequência, pois a repetição frequente de flambagem local das placas e posteriormente, a retificação das mesmas por meio da inversão do carregamento, pode levar à falha das placas por fadiga de baixo ciclo [45].

O comportamento pós-flambagem das placas entre enrijecedores depende fortemente das condições de contorno. Importantes interações podem ocorrer entre os enrijecedores e suas respectivas placas colaborantes. Enrijecedores com elevada rigidez à torção podem apresentar substancial redistribuição de carregamento no regime pós-flambagem das placas entre eles, como pode ser visto na Figura 29(a). Desta forma, uma considerável redistribuição de tensões pode ocorrer no regime pós-flambagem das placas, o que leva a um incremento na capacidade de carga, como pode ser visto na Figura 29(c).

Enrijecedores que apresentam reduzida rigidez à torção acompanharão a rotação das respectivas placas colaborantes em uma conformação que reproduz os modos de flambagem das mesmas, conforme pode ser observado na Figura 29(b).

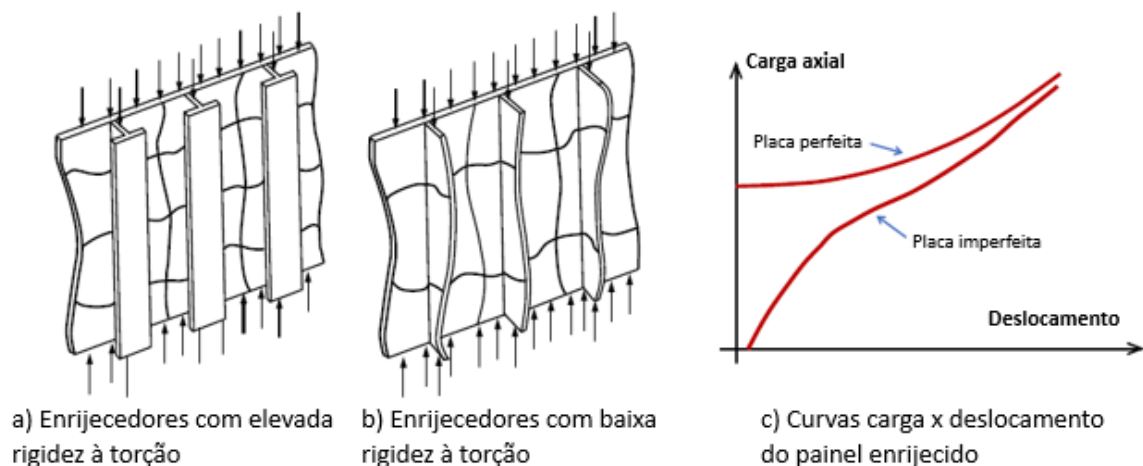


Figura 29 – Flambagem de painéis curtos [45]

Para painéis longos, ou seja, aqueles que apresentam elevada proporção $\alpha = l/s$ das placas entre enrijecedores, a flambagem por flexão dos enrijecedores com as respectivas placas colaborantes apresenta-se como um possível modo de falha, como

pode ser observado na Figura 30(a). Painéis com enrijecedores de elevada rigidez à flexão, apresentarão um modo de colapso por flexo-compressão característico de colunas. Neste caso, o diagrama carga axial *versus* deslocamento, característico deste modo de falha pode ser visualizado na Figura 30(b). Quando a flambagem ocorre com os enrijecedores em compressão e estes apresentam baixa rigidez torcional, a flambagem por torção dos enrijecedores pode ser o modo de falha dominante. A interação entre os modos de flambagem por flexão e torção pode levar a um descarregamento abrupto da estrutura no regime pós-flambagem, conforme exibido na Figura 30(c) [45].

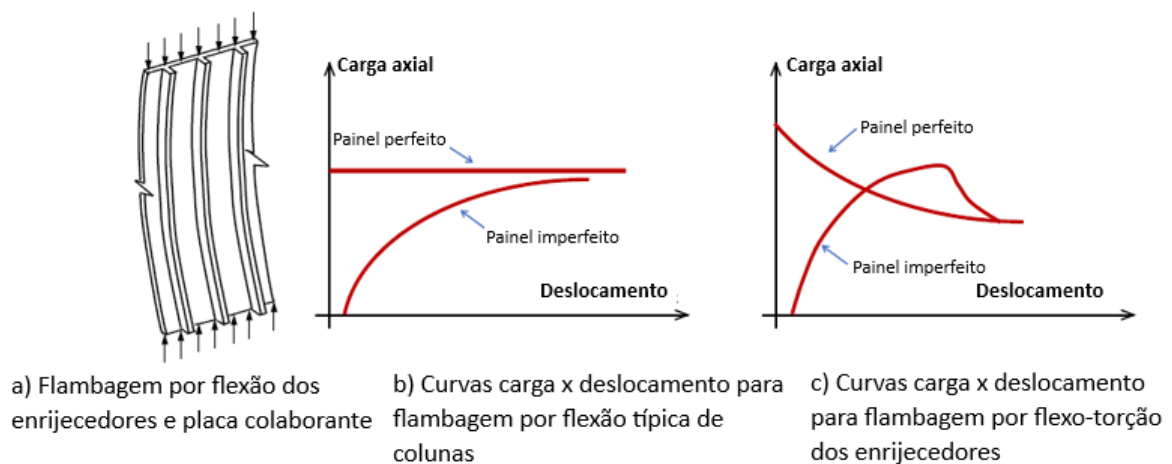


Figura 30 – Flambagem de painéis longos [45]

As imperfeições geométricas iniciais também influenciam de forma significativa o comportamento à flambagem de painéis curtos e longos. As curvas carga axial *versus* deslocamento na Figura 29 e na Figura 30 exibem diferentes formas para painéis perfeitos e imperfeitos para painéis enrijecidos curtos e longos, respectivamente. A trajetória de equilíbrio se inicia na origem das abscissas para painéis curtos ou longos sem imperfeições geométricas iniciais. Para painéis curtos ou longos, as imperfeições geométricas iniciais conduzem a rigidez e a capacidade última de carga dos mesmos para magnitudes completamente diferentes quando comparados aos painéis sem imperfeições.

2.2. Flambagem local da placa entre enrijecedores

A abordagem clássica para os problemas de flambagem elástica de placas é feita por meio da resolução da equação diferencial de equilíbrio ou por meio de métodos de energia. Uma boa fonte de consulta para os problemas de cascas e placas pode ser encontrada em Timosenko e Woinowsky-Krieger [46].

2.2.1. Resolução da equação diferencial de equilíbrio

O procedimento para o cálculo da carga crítica de flambagem elástica para uma placa sem imperfeições iniciais e submetida à compressão uniforme no plano, está ilustrado a seguir. A equação de equilíbrio para uma placa é dada por (1):

$$\nabla^4 w = \frac{1}{D} \left(q + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

Onde:

$w(x, y)$ – Campo de deslocamentos;

$N_x = \sigma_x t$ – Carga normal na direção longitudinal da placa para uma largura unitária;

$N_y = \sigma_y t$ – Carga normal na direção transversal da placa para uma largura unitária;

$N_{xy} = \sigma_{xy} t$ – Carga cisalhante ao longo das direções longitudinal e transversal da placa para uma largura unitária;

$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ – Rigidez da placa;

E – Módulo de elasticidade;

t – Espessura da placa;

ν – Coeficiente de Poisson;

$\nabla^4 = (\nabla^2)^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)^2$ – Operador bi-harmônico;

Para compressão uniaxial, condições de contorno simplesmente apoiadas e nenhuma carga de pressão aplicada perpendicularmente ao plano da placa, a equação (1), toma a seguinte forma:

$$\nabla^4 w = \frac{N_x}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2)$$

A carga crítica de flambagem resulta da resolução da equação diferencial. A seguinte função de deslocamentos satisfaz a equação (2) e as condições de contorno.

$$w = C_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (3)$$

Onde:

m – Número de meias ondas na direção longitudinal da placa;

n – Número de meias ondas na direção transversal da placa;

b – Largura da placa;

a – Comprimento da placa.

Uma vez obtido o campo de deslocamentos, pode-se obter o campo de deformações por meio da Teoria da Elasticidade. A partir do campo de deformações e utilizando-se relações constitutivas, pode-se deduzir o campo de tensões e também a tensão de flambagem elástica para compressão uniaxial:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 k \quad (4)$$

Onde:

σ_E – Tensão de flambagem elástica ideal;

s – Largura da placa;

k – Coeficiente de flambagem dependente do estado de tensões, da proporção $\alpha = l/s$ e das condições de contorno da placa.

A Figura 31 ilustra a condição de carregamento para a qual a equação (4) foi obtida:

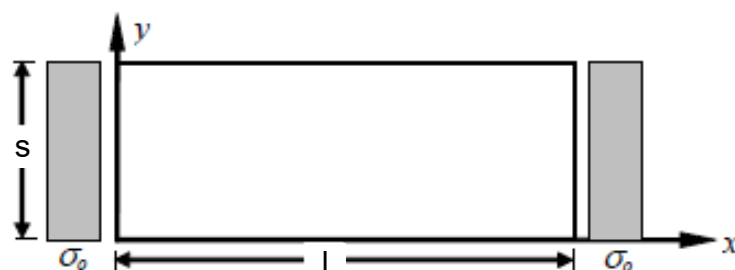


Figura 31 – Placa simplesmente apoiada submetida à compressão uniforme [45]

O diagrama que exibe a relação entre o coeficiente de flambagem e a proporção $\alpha = l/s$ de uma placa simplesmente apoiada em seu contorno, para um dado número de meias ondas na sua direção longitudinal, pode ser visualizado na Figura 32.

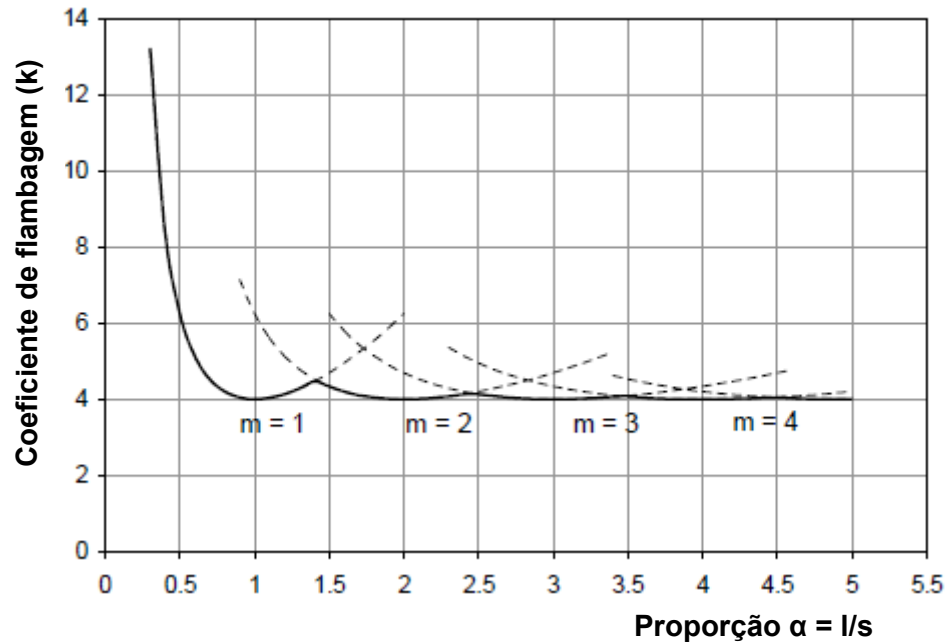


Figura 32 – Coeficiente de flambagem *versus* proporção $\alpha = l/s$ [45]

Na Figura 32, o coeficiente de flambagem está representado em função da razão de aspecto para uma placa simplesmente apoiada submetida à compressão uniforme na direção longitudinal. Uma vez que a tensão crítica de flambagem da placa é diretamente proporcional ao coeficiente de flambagem, aquela apresenta valores mínimos para magnitudes de comprimento que são múltiplos inteiros da largura, pois neste caso, os respectivos coeficientes de flambagem serão mínimos. Tal fato pode ser explicado observando-se a função do campo de deslocamentos para esta condição de carregamento e condições de contorno. Para placas em que o comprimento é múltiplo inteiro da largura, as funções senoidais que compõem a função do campo de deslocamentos têm a possibilidade de atingir seus valores máximos no domínio da placa. Portanto, em algum ponto da placa as funções senoidais atingirão seus valores máximos simultaneamente, maximizando em consequência, a amplitude do deslocamento fora do plano da placa. Quanto maiores os deslocamentos fora do plano da placa, maiores serão os efeitos de segunda ordem. Desta forma, as tensões de membrana somam-se às tensões oriundas da flexão da placa diminuindo-se a resistência de flambagem.

Observando-se a equação (4), pode-se perceber que a tensão de flambagem elástica de uma placa depende de três fatores, ou seja, da determinação das propriedades mecânicas da placa que por sua vez dependem do material de que é constituída $\left(\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\right)$, do inverso da esbeltez $\left(\frac{t}{s}\right)$ que depende da geometria da placa e da determinação dos coeficientes de flambagem (k) das placas entre enrijecedores que dependem de aspectos como a distribuição de tensões ao longo das faces das placas, das condições de contorno e da sua razão de aspecto.

A Sociedade Classificadora *American Bureau of Shipping* na sua Norma ABS – *Buckling and ultimate strength assessment for offshore structures* [1], apresenta as formulações para a determinação dos coeficientes de flambagem elástica de placas. Deve-se atentar para o fato de que cada tipo de solicitação individual ao longo das arestas das placas dará origem a um coeficiente de flambagem diferente. Desta forma, haverá um coeficiente de flambagem para a solicitação de cisalhamento puro – equação (5), outro para a solicitação normal na direção longitudinal da placa – equação (6), e finalmente um para a solicitação normal ao longo da direção transversal da placa – equação (7).

$$k_s = \left[4 \left(\frac{s}{l} \right)^2 + 5.34 \right] C_1 \quad (5)$$

$C_1 = 1.1$ - Para enrijecedores de painel tipo tê ou cantoneira;

$C_1 = 1.0$ - Para enrijecedores de painel tipo barra chata ou bulbo.

$$k_s = C_1 \begin{cases} \frac{8.4}{\kappa + 1.1} \text{ para } 0 \leq \kappa \leq 1 \\ 7.6 - 6.4\kappa + 10\kappa^2 \text{ para } -1 \leq \kappa < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$k_s = C_2 \begin{cases} \left[1.0875 \left(1 + \frac{1}{\alpha^2} \right)^2 - 18 \frac{1}{\alpha^2} \right] (1 + \kappa) + 24 \frac{1}{\alpha^2} & \text{para } \kappa < \frac{1}{3} \text{ e } 1 \leq \alpha \leq 2 \\ \left[1.0875 \left(1 + \frac{1}{\alpha^2} \right)^2 - 9 \frac{1}{\alpha} \right] (1 + \kappa) + 12 \frac{1}{\alpha} & \text{para } \kappa < \frac{1}{3} \text{ e } \alpha > 2 \\ \left(1 + \frac{1}{\alpha^2} \right)^2 (1.675 - 0.675\kappa) & \text{para } \kappa \geq \frac{1}{3} \end{cases} \quad (7)$$

Onde:

$C_2 = 1.2$ - Para enrijecedores de painel tipo tê ou cantoneira;

$C_2 = 1.1$ - Para enrijecedores de painel tipo barra chata ou bulbo;

α – Razão de aspecto $\left(\frac{l}{s}\right)$ da placa;

$\kappa = \frac{\sigma_{imin}}{\sigma_{imax}}$ - Razão entre as tensões normais nas extremidades da face da placa, como pode ser observado na Figura 33;

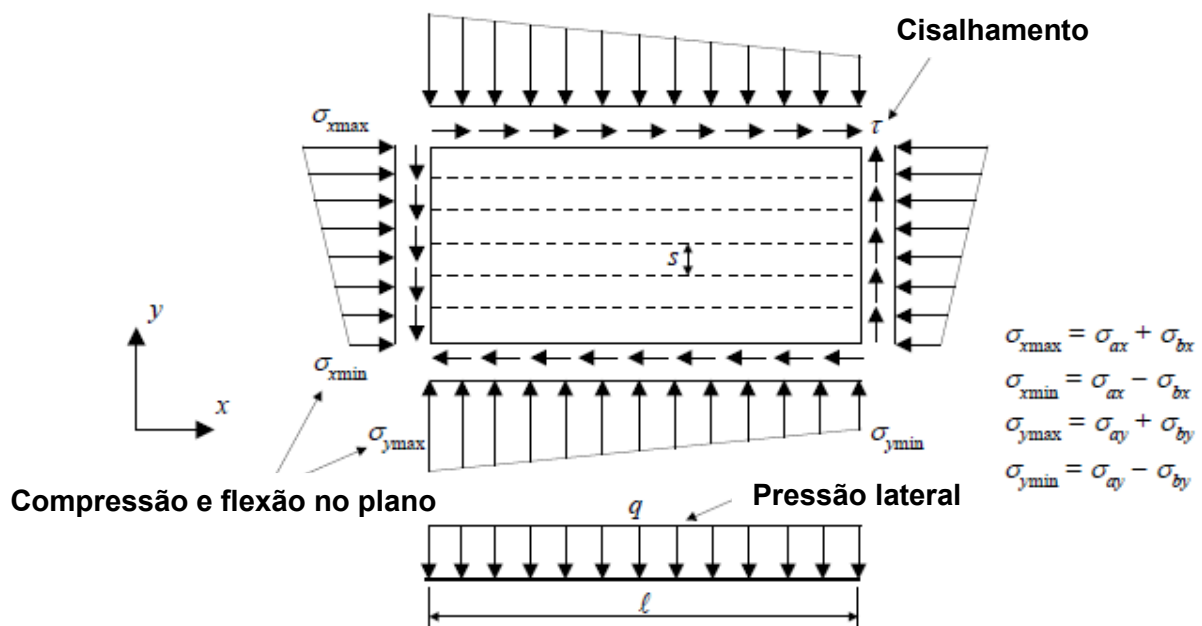


Figura 33 – Carregamentos solicitantes em placas e painéis enrijecidos [1] ¹

σ_{ax} – Tensão normal na direção longitudinal da placa devido a esforços de membrana;

σ_{ay} – Tensão normal na direção transversal da placa devido a esforços de membrana;

σ_{bx} – Tensão normal na direção longitudinal da placa devido a esforços de flexão no plano;

σ_{by} – Tensão normal na direção transversal da placa devido a esforços de flexão no plano;

τ – Tensão de cisalhamento nas faces laterais da placa;

q – Pressão atuante na direção perpendicular da placa;

¹ Nota: Se a tensão normal uniforme σ_{ax} ou σ_{ay} for de tração ao invés de compressão, de forma conservadora, pode-se adotar o seu valor como sendo zero.

2.2.2. Correção devido à plasticidade

Para placas com esbeltez reduzida, a equação (4) pode apresentar como resultado, um valor para a tensão de flambagem elástica muito maior do que a tensão de escoamento nominal do material. Tal resultado, pelo menos para o aço carbono convencional, não condiz muito com a natureza física do problema de flambagem de placas entre enrijecedores. Vários são os métodos existentes para se levar em consideração a correção da tensão de flambagem elástica devido aos efeitos da plasticidade. Uma técnica conveniente para a modificação da tensão de flambagem elástica devido à plasticidade é o método ϕ , onde a tensão crítica de flambagem elastoplástica é dada pela equação (8) [45]:

$$\sigma_{cr} = \phi \sigma_0 \quad (8)$$

Onde:

ϕ – Função empírica relacionada à esbeltez da placa;

σ_0 – Tensão de escoamento do aço.

Diferentes parâmetros podem ser utilizados para a obtenção da função ϕ , podendo-se destacar a esbeltez não dimensional definida pela equação (9) [45]:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\sigma_0}{\sigma_E}} \quad (9)$$

A ideia geral para a correção da tensão de flambagem elástica devido aos efeitos da plasticidade e a respectiva obtenção da tensão crítica de flambagem, pode ser matematicamente representada pelas equações (10) e (11). As equações (17) e (18) ilustram as tendências da tensão crítica de flambagem em função da tensão de flambagem elástica:

$$\sigma_{cr} \rightarrow \sigma_0 \quad \text{quando} \quad \sigma_E \rightarrow \infty \quad (10)$$

$$\sigma_{cr} \rightarrow \sigma_E \quad \text{quando} \quad \sigma_E \ll \sigma_0 \quad (11)$$

Desta forma, a tensão crítica de flambagem converge para um resultado razoável tanto para placas compactas quanto para as placas esbeltas. A resolução da tensão crítica de flambagem pode ser dada pela equação (12):

$$\sigma_{cr} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{1 + \lambda^4}} \Rightarrow \phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda^4}} \quad (12)$$

Uma representação alternativa da função ϕ , é dada pela formulação proposta por Johnson-Ostenfeld [1], visualizada nas equações (13) e (16), para os casos de cisalhamento puro e solicitação normal na direção longitudinal ou transversal da placa respectivamente.

$$\phi = \left[1 - P_r(1 - P_r) \frac{\tau_0}{\tau_E} \right] \quad (13)$$

P_r – Limite linear elástico proporcional da estrutura que pode ser adotado como 0.6 para o aço carbono;

$$\tau_0 = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} - \text{Resistência ao cisalhamento da placa entre enrijecedores}; \quad (14)$$

$$\tau_E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{s} \right)^2 k_s - \text{Tensão de flambagem elástica por cisalhamento}; \quad (15)$$

k_s – Coeficiente de flambagem para cisalhamento puro.

$$\phi = \left[1 - P_r(1 - P_r) \frac{\sigma_0}{\sigma_{Ei}} \right] \quad (16)$$

σ_{Ei} – Tensão normal de flambagem elástica na direção longitudinal (σ_{Ex}) ou transversal (σ_{Ey}) da placa.

A tensão crítica de flambagem para cisalhamento puro para uma placa entre enrijecedores, de acordo com o ABS [1], é dada pela equação (17). Nesta equação pode ser observada a utilização da função ϕ para a modificação da tensão de flambagem elástica devido à plasticidade.

$$\tau_c = \begin{cases} \tau_E & \text{para } \tau_E \leq P_r \tau_0 \\ \tau_0 \left[1 - P_r(1 - P_r) \frac{\tau_0}{\tau_E} \right] & \text{para } \tau_E > P_r \tau_0 \end{cases} \quad (17)$$

A tensão crítica de flambagem σ_{Ci} (σ_{Cx} ou σ_{Cy}) para solicitação de compressão uniaxial e de flexão no plano, para uma placa entre enrijecedores, de acordo com o ABS [1], é dada pela equação (18). Tal equação, utiliza a função ϕ para a modificação da tensão de flambagem elástica devido à plasticidade.

$$\sigma_{Ci} = \begin{cases} \sigma_{Ei} & \text{para } \sigma_{Ei} \leq P_r \sigma_0 \\ \sigma_0 \left[1 - P_r(1 - P_r) \frac{\sigma_0}{\sigma_{Ei}} \right] & \text{para } \sigma_{Ei} > P_r \sigma_0 \end{cases} \quad (18)$$

No caso de um carregamento combinado, como exibido na Figura 34, o procedimento exibido acima para a determinação das tensões críticas de flambagem individuais pode ser utilizado, desde que uma tensão solicitante equivalente e uma tensão crítica de flambagem equivalente sejam definidas, para se levar em consideração a interação entre as diferentes componentes de tensão. A ideia é que o fator de utilização para a tensão equivalente seja igual ao fator de utilização para o carregamento combinado. Esta condição é convenientemente expressa pela fórmula de interação exibida na equação (19) [45]:

$$\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{Ce}} \right)^c = \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{Cx}} \right)^c + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{Cy}} \right)^c + \left(\frac{\tau}{\tau_c} \right)^c \quad (19)$$

Onde σ_{Cx} , σ_{Cy} e τ_c , são as tensões críticas de flambagem quando a componente de tensão correspondente atua isoladamente na placa, e σ_{Ce} é a tensão crítica de flambagem equivalente correspondente à tensão equivalente. Para a determinação da tensão equivalente, é utilizada a tensão de von Mises atuante na placa, cuja formulação está exibida em (20):

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} \quad (20)$$

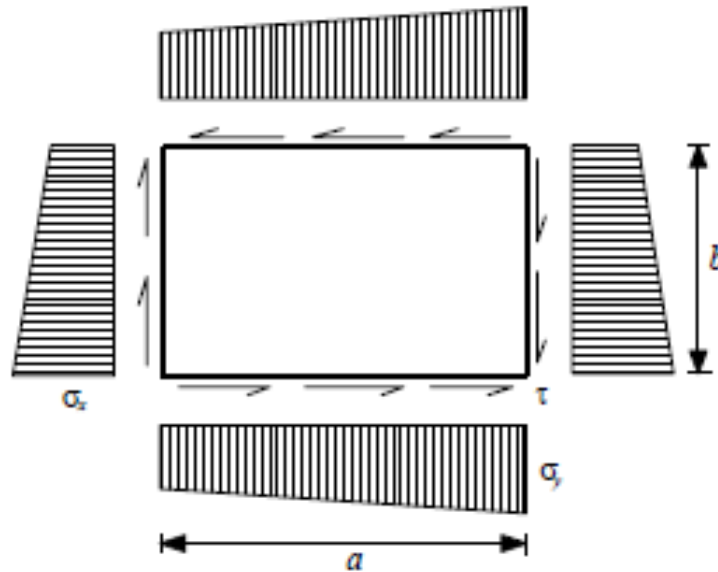


Figura 34 – Carregamento combinado [45]

A esbeltez não-dimensional equivalente a ser utilizada para se levar em consideração os efeitos da plasticidade, pode desta forma, ser expressa como exibido em (21):

$$\bar{\lambda}_e^2 = \frac{\sigma_0}{\sigma_{Ce}} = \frac{\sigma_0}{\sigma_e} \left[\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{Cx}} \right)^c + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{Cy}} \right)^c + \left(\frac{\tau}{\tau_c} \right)^c \right]^{\frac{1}{c}} \quad (21)$$

O expoente c depende da razão de aspecto da placa. Placas quadradas tendem a ser mais sensíveis ao carregamento combinado do que placas com razão de aspecto superiores à unidade. Esta maior sensibilidade deve-se ao fato de que para compressão biaxial, os modos de flambagem nas direções ortogonais da placa coincidem. Desta forma, uma interação linear geralmente é adotada para placas quadradas enquanto uma interação elíptica é utilizada para placas longas. A Sociedade Classificadora DNV na sua norma *Classification Note 30.1* [48], especifica para placas longas a relação exibida em (22):

$$c = 2 - \frac{1}{a/b} \quad \text{Para} \quad \frac{a}{b} > 1 \quad (22)$$

2.2.3. Avaliação da resistência à flambagem de uma placa entre enrijecedores

O ABS [1] utiliza a equação (23) para a avaliação do estado limite de flambagem de uma placa entre enrijecedores:

$$\left(\frac{\sigma_{x \max}}{\eta \sigma_{cx}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\eta \sigma_{cy}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\eta \tau_c}\right)^2 \leq 1 \quad (23)$$

Onde:

$\sigma_{x \max}$ – Máxima tensão de compressão na direção longitudinal da placa;

$\sigma_{y \max}$ – Máxima tensão de compressão na direção transversal da placa;

τ – Tensão de cisalhamento nas arestas da placa;

σ_{cx} – Tensão crítica de flambagem na direção longitudinal da placa, calculada pela equação (18);

σ_{cy} – Tensão crítica de flambagem na direção transversal da placa, calculada pela equação (18);

τ_c – Tensão crítica de flambagem para cisalhamento puro nas arestas da placa, calculada pela equação (17);

η – Máximo fator de utilização de resistência admissível.

Placas esbeltas conseguem suportar carregamentos substancialmente maiores do que aqueles previstos pela teoria elástica desde que os enrijecedores apresentem rigidez torcional suficiente para que as placas entre eles se mantenham planas na direção transversal, junto à interface enrijecedor-placa. Como consequência de grandes deformações transversais, tensões de membrana desenvolvem-se e tendem a estabilizar as placas entre enrijecedores. Neste estágio, a distribuição de tensões ao longo da direção transversal do painel não é mais uniforme e cresce na direção dos enrijecedores. De acordo com o método da largura efetiva, com observações experimentais e soluções pelo método dos elementos finitos, a carga última é obtida quando a tensão normal na direção longitudinal aproxima-se da tensão de escoamento do material [45]. O método da largura efetiva é um modelo que se baseia no comportamento de uma placa perfeita após à redução de rigidez axial devido à flambagem da placa entre enrijecedores. A largura original (s) da placa entre

enrijecedores é substituída por uma largura efetiva (s_e). A equação (24) foi proposta por Faulkner [47] para placas simplesmente apoiadas, onde se presume que os enrijecedores longitudinais tenham rigidez torcional suficiente para que as placas entre eles permaneçam planas na interface enrijecedor-placa.

$$\frac{s_e}{s} = \begin{cases} \frac{2}{\beta} - \frac{1}{\beta^2} & \text{para } \beta > 1 \\ 1 & \text{para } \beta \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

Onde o parâmetro de esbeltez da placa é dado por (25):

$$\beta = \frac{s}{t} \sqrt{\frac{\sigma_0}{E}} \quad (25)$$

A Figura 35 ilustra a distribuição de tensão normal na direção longitudinal do painel, bem como, o conceito de largura efetiva do conjunto enrijecedor-placa.

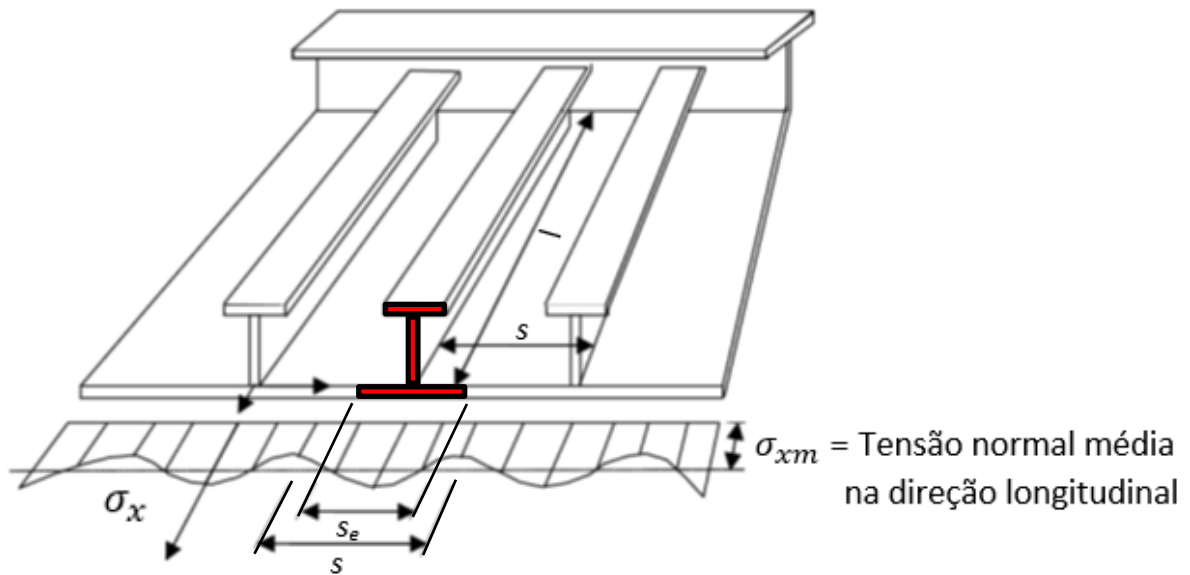


Figura 35 – Distribuição de tensão em um painel comprimido longitudinalmente [45]

A formulação proposta por Faulkner (24) [47], não leva em consideração o campo de tensão residual presente nas placas. Para se considerar simultaneamente o efeito das imperfeições geométricas iniciais, bem como as tensões residuais

presentes nas placas dos painéis enrijecidos, a Sociedade Classificadora DNV em sua norma *Classification Note* 30.1 [48], adota a seguinte expressão simplificada (26):

$$\frac{s_e}{s} = \begin{cases} \frac{1.8}{\beta} - \frac{0.8}{\beta^2} & \text{para } \beta > 1 \\ 1 & \text{para } \beta \leq 1 \end{cases} \quad (26)$$

A formulação da largura efetiva proposta por Faulkner (24) [47], prediz uma considerável reserva de resistência na pós-flambagem para placas com grande esbeltez, devido a associação destas placas com suas larguras efetivas e seus respectivos enrijecedores. Contudo, esta capacidade de carga adicional se reduz consideravelmente se as tensões residuais são levadas em consideração.

A resistência pós-flambagem normalmente não é considerada no projeto de painéis enrijecidos de navios e estruturas *offshore*. Todavia, na análise de resistência do conjunto enrijecedor-placa, o conceito de largura efetiva das placas dos painéis enrijecidos é utilizado.

2.3. Avaliação da carga última de uma placa entre enrijecedores

O ABS [1], utiliza a seguinte formulação (27) para o cálculo da resistência última de uma placa entre enrijecedores, submetida à tensões normais e cisalhantes simultâneas no plano:

$$\left(\frac{\sigma_{x \max}}{\eta \sigma_{Ux}} \right)^2 - \varphi \left(\frac{\sigma_{x \max}}{\eta \sigma_{Ux}} \right) \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\eta \sigma_{Uy}} \right) + \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\eta \sigma_{Uy}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\eta \tau_U} \right)^2 \leq 1 \quad (27)$$

Onde:

$\sigma_{x \max}$ – Máxima tensão de compressão na direção longitudinal da placa;

$\sigma_{y \max}$ – Máxima tensão de compressão na direção transversal da placa;

τ – Tensão de cisalhamento nas arestas da placa;

$$\varphi = 1.0 - \frac{\beta}{2} - \text{Coeficiente que reflete a interação entre as tensões normais longitudinais e transversais (valores negativos são aceitos);} \quad (28)$$

$$\sigma_{Ux} = C_x \sigma_0 \geq \sigma_{C_x} - \text{Resistência última em relação à tensão normal longitudinal da placa;} \quad (29)$$

$$C_x = \begin{cases} \frac{2}{\beta} - \frac{1}{\beta^2} & \text{para } \beta > 1 \\ 1 & \text{para } \beta \leq 1 \end{cases} \quad (30)$$

$$\sigma_{Uy} = C_y \sigma_0 \geq \sigma_{C_y} - \text{Resistência última em relação à tensão normal transversal da placa;} \quad (31)$$

$$C_y = C_x \frac{s}{l} + 0.1 \left(1 - \frac{s}{l}\right) \left(1 + \frac{1}{\beta^2}\right)^2 \leq 1 \quad (32)$$

$$\tau_U = \tau_C + \frac{0.5(\sigma_0 - \sqrt{3}\tau_C)}{(1 + \alpha + \alpha^2)^{1/2}} \geq \tau_C - \text{Resistência última em relação à tensão cisalhante nas arestas da placa;} \quad (33)$$

σ_{Cx} – Tensão crítica de flambagem na direção longitudinal da placa, obtida pela equação (18) com $i = x$;

σ_{Cy} – Tensão crítica de flambagem na direção transversal da placa, obtida pela equação (18) com $i = y$;

τ_C – Tensão crítica de flambagem para cisalhamento puro, obtida pela equação (17);

$$\beta = \frac{s}{t} \sqrt{\frac{\sigma_0}{E}} - \text{Parâmetro de esbeltez da placa;} \quad (34)$$

E – Módulo de elasticidade;

l – Comprimento da placa entre enrijecedores;

s – Largura da placa entre enrijecedores;

t – Espessura da placa entre enrijecedores;

σ_0 – Tensão de escoamento do aço da placa entre enrijecedores;

η – Máximo fator de utilização de resistência admissível.

2.4. Avaliação do estado limite de flambagem de viga-coluna

A determinação da largura efetiva das placas entre enrijecedores é de grande importância no cálculo da resistência de painéis enrijecidos, pois constitui um dos

parâmetros necessários para a verificação do estado limite de flambagem de viga-coluna. A título de ilustração, o ABS [1] calcula o estado limite de flambagem de viga-coluna da seguinte forma (35):

$$\frac{\sigma_a}{\eta\sigma_{CA}\left(\frac{A_e}{A}\right)} + \frac{C_m\sigma_b}{\eta\sigma_0\left[1 - \frac{\sigma_a}{(\eta\sigma_{E(C)})}\right]} \leq 1 \quad (35)$$

Onde:

$$\sigma_a = \frac{P}{A} - \text{Tensão de compressão nominal calculada;} \quad (36)$$

P – Carga total de compressão no enrijecedor e sua respectiva placa colaborante total entre enrijecedores;

$$\sigma_{CA} = \begin{cases} \sigma_{E(C)} & \text{para } \sigma_{E(C)} \leq P_r \sigma_0 \\ \sigma_0 \left[1 - P_r(1 - P_r) \frac{\sigma_0}{\sigma_{E(C)}} \right] & \text{para } \sigma_{E(C)} > P_r \sigma_0 \end{cases} \quad (37)$$

P_r – Limite linear elástico proporcional da estrutura que pode ser adotado como 0.6 para o aço carbono;

$$\sigma_{E(C)} = \frac{\pi^2 E r_e^2}{l^2} - \text{Tensão de flambagem de Euler;} \quad (38)$$

$$A = A_s + st - \text{Área total da seção transversal (enrijecedor e chapa colaborante total);} \quad (39)$$

A_s – Área da seção transversal do enrijecedor, excluindo-se a chapa colaborante;

$$A_e = A_s + s_e t - \text{Área da seção transversal efetiva;} \quad (40)$$

s_e – Largura efetiva da placa colaborante;

$$s_e = s - \text{Quando o estado limite de flambagem da placa entre enrijecedores não é excedido;} \quad (41)$$

$$s_e = C_x C_y C_{xy} s - \text{Quando o estado limite de flambagem da placa entre enrijecedores é excedido;} \quad (42)$$

$$C_x = \begin{cases} \frac{2}{\beta} - \frac{1}{\beta^2} & \text{para } \beta > 1 \\ 1 & \text{para } \beta \leq 1 \end{cases} \quad (43)$$

$$C_y = 0.5\varphi \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\sigma_{Uy}} \right) + \sqrt{1 - (1 - 0.25\varphi^2) \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\sigma_{Uy}} \right)^2} \quad (44)$$

Uma condição limite para C_y é que a carga transversal atuante deve ser menor do que a resistência transversal última da placa entre enrijecedores. A verificação de flambagem dos enrijecedores não deve ser realizada até que as chapas colaborantes satisfaçam o critério de resistência última.

$\sigma_{y \max}$ – Máxima tensão de compressão na direção transversal da placa;

$$\sigma_{Uy} = C_y \sigma_0 \geq \sigma_{c_y} \text{ – Resistência última em relação à tensão normal transversal da placa;} \quad (45)$$

$$C_{xy} = \sqrt{1 - \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^2} \quad (46)$$

$$\varphi = 1 - \frac{\beta}{2} \quad (47)$$

$$\beta = \frac{s}{t} \sqrt{\frac{\sigma_0}{E}} \quad (48)$$

$$r_e = \sqrt{\frac{I_e}{A_e}} \text{ – Raio de giração da área } A_e; \quad (49)$$

I_e – Momento de inércia do enrijecedor e respectiva placa colaborante associada s_e ;

E – Módulo de elasticidade do aço;

σ_0 – Tensão de escoamento do enrijecedor. Se a diferença entre as tensões de escoamento do enrijecedor e da placa colaborante for considerável, a tensão de escoamento resultante da ponderação das resistências dos respectivos materiais com suas respectivas áreas deve ser utilizada;

$$\sigma_b = \frac{M}{SM_w} \text{ – Tensão normal devido à flexão;} \quad (50)$$

M – Máximo momento fletor resultante de cargas normais ao plano da placa entre enrijecedores. Para o caso particular de uma pressão uniformemente distribuída e considerando-se condições de engastamento perfeito para as extremidades do enrijecedor, $M = \frac{qsl^2}{12}$;

C_m – Coeficiente de ajuste do momento fletor nas extremidades do enrijecedor que pode ser tomado como 0,75;

q – Pressão lateral para a região considerada;

s – Largura da placa entre enrijecedores;

l – Vão livre do enrijecedor. Pode ser tomado como exibido na Figura 36;

SM_w – Módulo resistente efetivo do conjunto enrijecedor-flange, levando-se em consideração a largura efetiva s_w , determinada de acordo com a Figura 37;

s_w – Largura efetiva determinada de acordo com a Figura 37;

η – Máximo fator de utilização de resistência admissível.

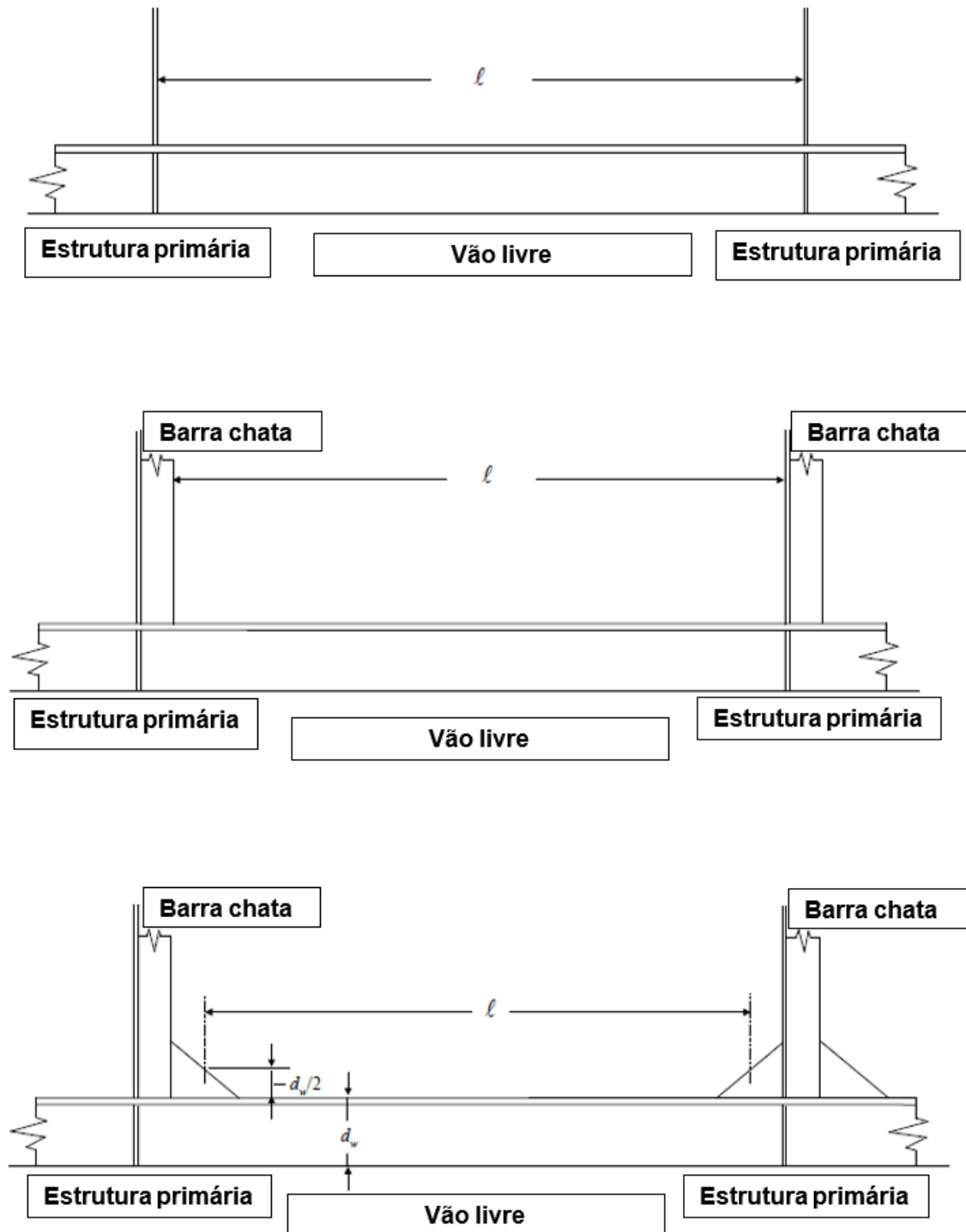
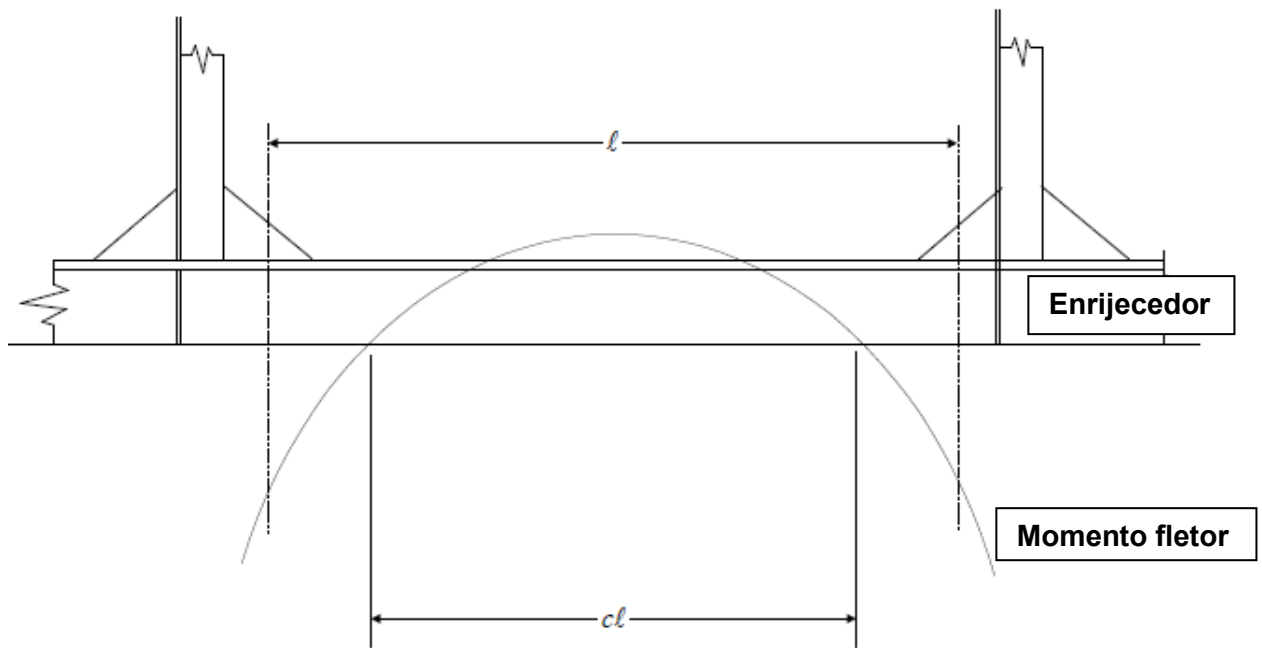


Figura 36 – Vãos livres a serem considerados para o enrijecedor [1]



$c\ell/s$	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5 e maior
s_w/s	0.58	0.73	0.83	0.90	0.95	0.98	1.0

Figura 37 – Largura efetiva s_w [1]

De uma forma geral, verifica-se a flambagem da placa entre enrijecedores conforme a equação (23). Se o resultado de tal equação for menor do que a unidade, significa dizer que a placa não apresenta flambagem local e portanto, a largura colaborante para a verificação do estado limite de flambagem de viga-coluna é o próprio espaçamento entre enrijecedores. Contudo, se o resultado da equação (23) for maior do que a unidade, significa que houve flambagem local da placa entre enrijecedores e a largura colaborante para a verificação do estado limite de flambagem de viga-coluna é menor que o espaçamento entre enrijecedores. Neste caso, a largura efetiva pode ser calculada conforme as equações (24), (26) ou (42) propostas respectivamente por Faulkner [47], DNV [48] e ABS [1].

Conforme mencionado anteriormente, mesmo após a flambagem local, as placas entre enrijecedores ainda podem apresentar elevada reserva de resistência, dependendo das condições de contorno. Tal reserva de resistência pode ser levada em consideração na avaliação da carga última dos painéis enrijecidos, permitindo-se que as placas entre enrijecedores deformem-se no regime pós-flambagem. Neste

caso, a resistência última da placa entre enrijecedores é dada pela equação (27), se forem seguidas as orientações do ABS [1]. O cálculo da resistência última da placa entre enrijecedores tem grande aplicação para a avaliação da sobrevivência de estruturas *offshore* que apresentam diminuição das espessuras originais de seus elementos devido aos efeitos da corrosão. Para tais estruturas, quando o critério de verificação da flambagem local da placa entre enrijecedores não é atendido, apela-se ao critério da resistência última da placa entre enrijecedores de forma a postergar o reparo ou a substituição dos elementos degradados.

Além dos estados-limites de flambagem local da placa entre enrijecedores, resistência última da placa entre enrijecedores e flambagem de viga-coluna, outros critérios de dimensionamento precisam ser verificados quando da avaliação da resistência de painéis enrijecidos. Tais critérios incluem a verificação da flambagem local da alma e da mesa dos enrijecedores, critérios de resistência devido à aplicação de pressão perpendicular ao plano da placa do painel enrijecido, interação entre flexão e torção dos enrijecedores e flambagem global do painel enrijecido como um todo. Estes critérios adicionais de verificação não serão objeto do presente trabalho que se ocupará tão somente da avaliação da resistência última da placa entre enrijecedores para painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável do tipo austenítico.

Futuros trabalhos de pesquisa poderão investigar se os critérios de dimensionamento supracitados que não estão contemplados no presente trabalho, podem ser usados para o dimensionamento de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável, uma vez que foram originalmente concebidos para a avaliação de painéis enrijecidos fabricados em aço carbono.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

Para estruturas do tipo naval/*offshore*, de acordo com a Sociedade Classificadora ABS [49], as características geométricas mais recorrentes de painéis enrijecidos estão exibidas na Tabela 2. Estas características geométricas são definidas da seguinte forma:

- proporção ($\alpha = l/s$) – é a razão entre a altura do painel enrijecido (l) e o espaçamento entre enrijecedores (s);
- esbeltez – é a razão entre o espaçamento entre enrijecedores (s) e a espessura da placa enrijecida (t).

Tabela 2 – Características geométricas de painéis enrijecidos [49]

Tipo de Plataforma	Proporção ($\alpha = l/s$)		Esbeltez (s/t)	
	Média	Coefficiente de variação	Média	Coefficiente de variação
TLP	2.5	0.28	41	0.22
Spar	2.8	0.12	39	0.24
Semisubmersível	4.0	0.20	44	0.30
FPSO	4.7	0.16	46	0.25

Desta forma, de modo a se representar nos ensaios de laboratório, as características geométricas mais recorrentes para estruturas do tipo naval/*offshore*, as seguintes configurações de modelos reduzidos foram propostas para dois painéis com geometrias distintas, denominados Painel 1 e Painel 2 (Figura 38 e Figura 39, respectivamente). Para a obtenção dos diferentes valores de razão de aspecto e esbeltez, representativos dos diferentes tipos de plataforma de petróleo, apenas a distância entre enrijecedores e o comprimento de cada painel foram alterados. A espessura das chapas e a geometria dos enrijecedores tipo cantoneira foram mantidas constantes.

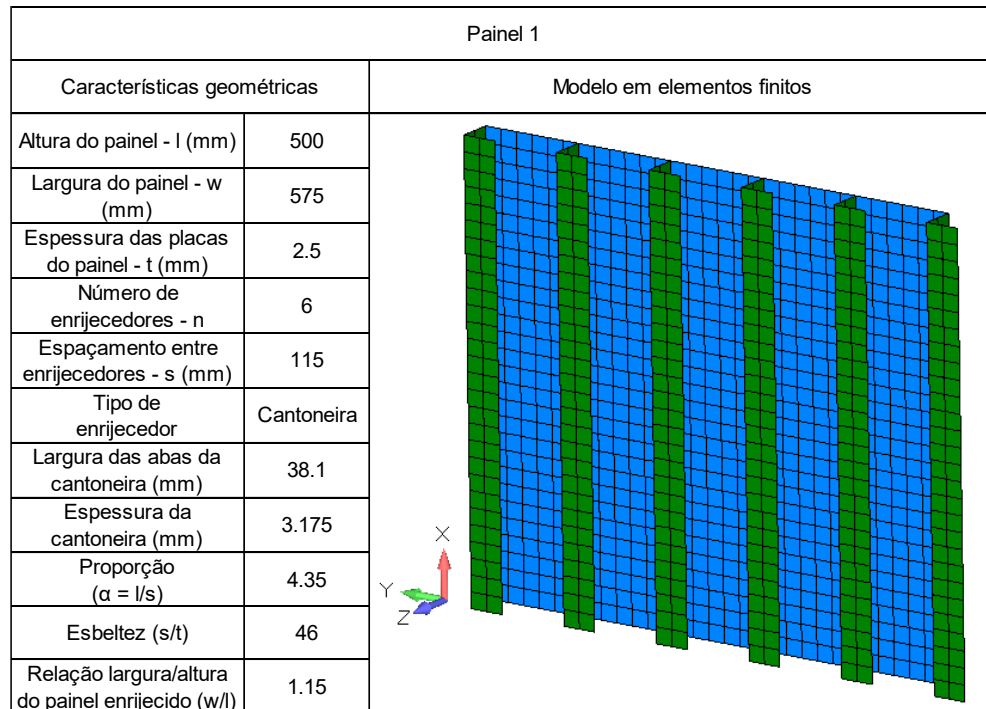


Figura 38 – Características geométricas – Painel 1

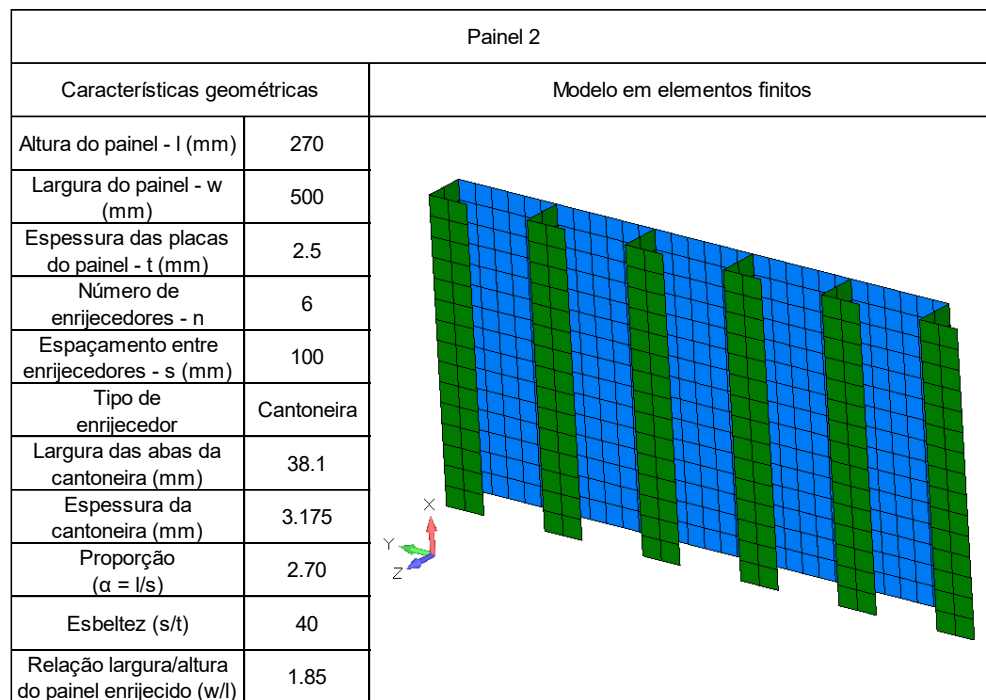


Figura 39 – Características geométricas – Painel 2

Tanto o Painel 1 quanto o Painel 2 foram fabricados em aço inoxidável austenítico 304 com cantoneiras de abas iguais sendo utilizadas como enrijecedores. Foram adotados valores de razão de aspecto (α) de 4.35 e 2.70 com esbeltez (s/t) de 46 e 40 para o Painel 1 e o Painel 2, respectivamente.

As características geométricas dos painéis 1 e 2 também tiveram por objetivo, adequar-se aos equipamentos disponíveis no LEC - Laboratório de Engenharia Civil da UERJ para a realização dos ensaios, conforme pode ser observado na Figura 40.



Figura 40 – Prensa hidráulica Lousenhausenwerk disponível para os ensaios

Os painéis 1 e 2 confeccionados em aço inoxidável austenítico 304 podem ser visualizados na Figura 41 e Figura 42, respectivamente, antes da soldagem das placas da base e do topo usadas para a aplicação de carga.

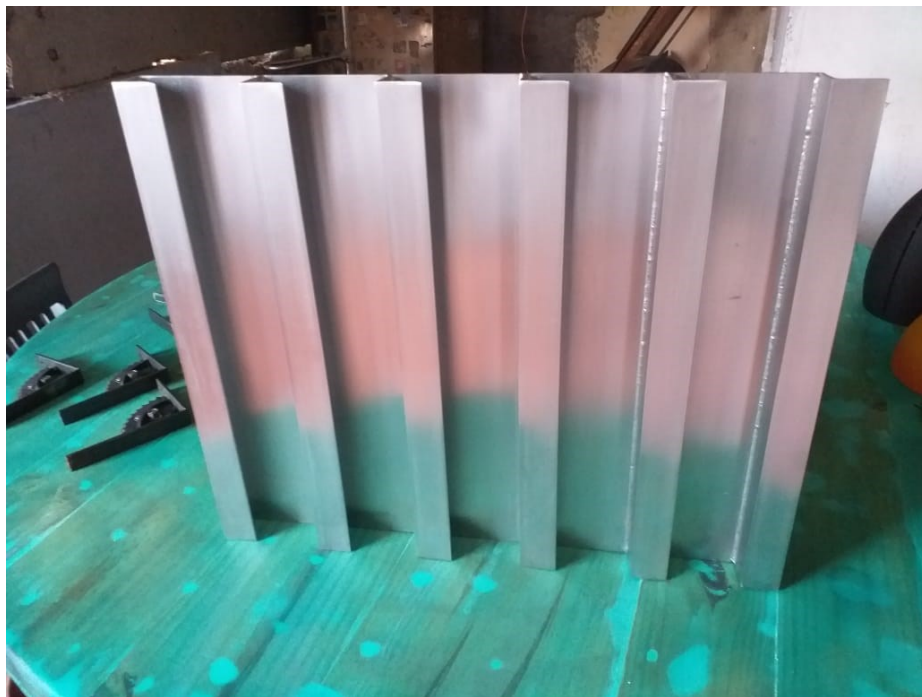


Figura 41 – Pannel 1

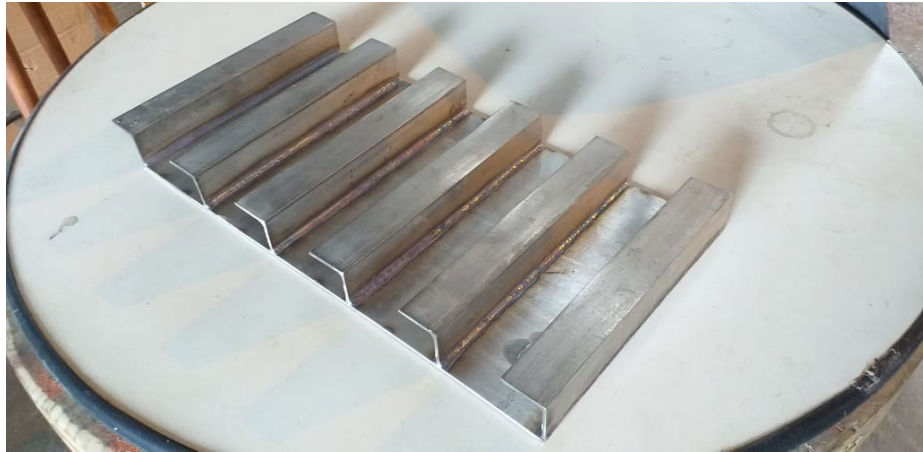


Figura 42 – PAINEL 2

O presente trabalho de pesquisa não possui o objetivo de apresentar um exaustivo estudo de ensaios experimentais, seja pelo tempo gasto para fabricar, caracterizar os materiais de cada protótipo de painel enrijecido e ensaiar à compressão, seja pelo grande dispêndio dos recursos financeiros envolvidos.

No entanto, o PAINEL 1 e o PAINEL 2 foram ensaiados para servir de base à calibração dos modelos numéricos que serão utilizados na avaliação da resistência de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável, submetidos à compressão axial uniforme.

3.2. Caracterização dos materiais à tração

Os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas de amostras em aço carbono e aço inoxidável têm como objetivo a obtenção de parâmetros, tais como, módulo de elasticidade, tensão de escoamento, deformação no escoamento, tensão máxima, deformação na tensão máxima, tensão na ruptura e deformação na ruptura. Tais parâmetros são fundamentais para a fase de projeto de estruturas metálicas.

O projeto de um componente mecânico ou equipamento industrial requer conhecimento das propriedades dos materiais disponíveis. Durante a seleção de um tipo de material para o projeto são avaliadas as suas propriedades mecânicas e seu comportamento [50].

A determinação das propriedades mecânicas por meio do ensaio à tração é realizada por meio de ensaios normalizados. Para os ensaios apresentados neste trabalho, foram utilizados os preceitos da NBR 6892-1 [51].

No ensaio de tração submete-se um corpo de prova a um esforço, que tende a alongá-lo ou até mesmo esticá-lo até a sua ruptura. Os esforços ou cargas aplicadas ao mesmo são medidas na própria máquina de ensaio. Geralmente, este ensaio é realizado utilizando-se um corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados, ou, dependendo da finalidade do ensaio, suas informações possam ser usadas tecnicamente [52].

Para a obtenção do limite de escoamento do aço inoxidável, convencionou-se traçar uma linha reta paralela à porção elástica da curva tensão *versus* deformação, a partir de uma pré-deformação de 0.002. O ponto de encontro da linha paralela com a curva obtida no ensaio à tração, representa o limite de escoamento convencional de 0.2% [50], conforme apresentado na Figura 43.

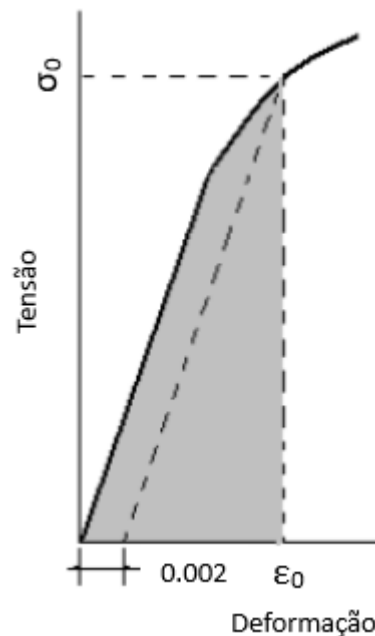


Figura 43 – Diagrama tensão x deformação [50]

Para a caracterização dos materiais constituintes das chapas e das cantoneiras dos painéis enrijecidos deste trabalho, dois corpos-de-prova para as chapas e mais dois corpos-de-prova para as cantoneiras foram ensaiados à tração para se obter o diagrama tensão-deformação para os respectivos materiais. A Figura 44 apresenta os corpos-de-prova que foram caracterizados.



Figura 44 – Corpos-de-prova antes do ensaio de tração

A geometria dos corpos-de-prova para os ensaios de caracterização à tração pode ser visualizada na Figura 45:

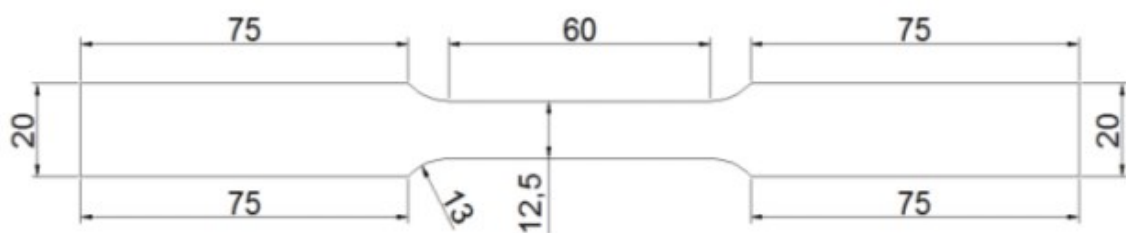


Figura 45 – Geometria dos corpos-de-prova (dimensões em milímetros)

Cabe ressaltar que a configuração geométrica dos corpos-de-prova foi obtida através de corte à jato de água de forma a se minimizar os efeitos de tensões residuais.

Na Figura 46, pode ser verificada a marcação de ranhuras realizadas na superfície dos corpos-de-prova a fim de facilitar a visualização do alongamento final sofrido pelos mesmos após a ruptura. As ranhuras foram marcadas com espaçamento de 10 mm.



Figura 46 – Marcação de ranhuras na superfície dos corpos-de-prova

As propriedades mecânicas das placas e das cantoneiras foram caracterizadas sob testes de tração considerando-se a direção paralela de laminação das amostras. Os ensaios de tração foram realizados utilizando-se a máquina INSTRON 3382 enquanto a velocidade do carregamento seguiu as recomendações de Huang and Young [53]. Uma taxa de carregamento de 0.05 mm/min foi utilizada até que os corpos-de-prova atingissem uma deformação de 0.2%. A partir daí, a taxa de carregamento utilizada foi de 0.8 mm/min. Na Figura 47 observa-se o equipamento INSTRON 3382 utilizado para os ensaios de caracterização à tração dos corpos-de-prova, bem como a ruptura de um corpo-de-prova após o término do ensaio de caracterização à tração.

Após a realização dos ensaios de tração, os diagramas tensão *versus* deformação para os corpos-de-prova da chapa e da cantoneira em aço inoxidável obtidos, podem ser visualizados na Figura 48 e na Figura 49, respectivamente.

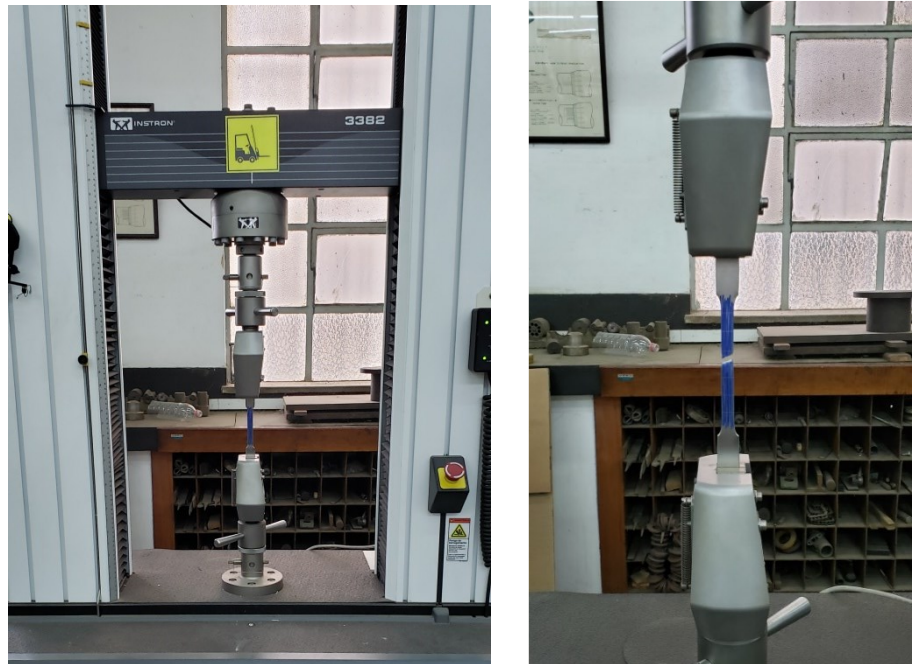


Figura 47 – Equipamento INSTRON 3382 utilizado para os ensaios de tração

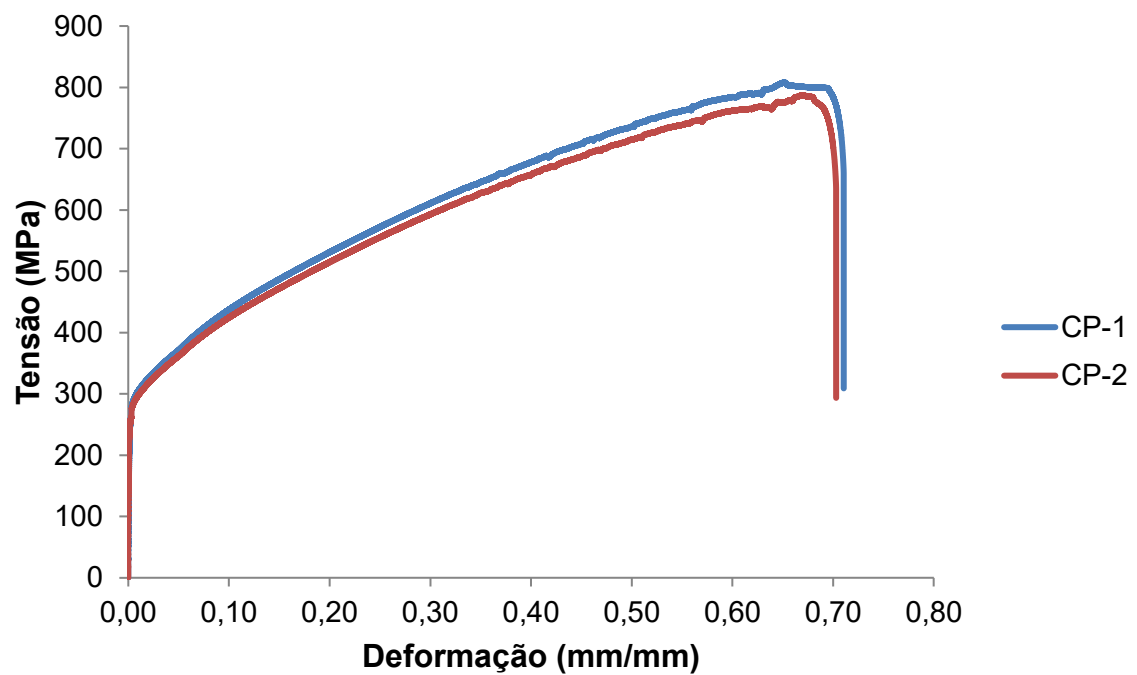


Figura 48 – Diagramas tensão *versus* deformação – chapa

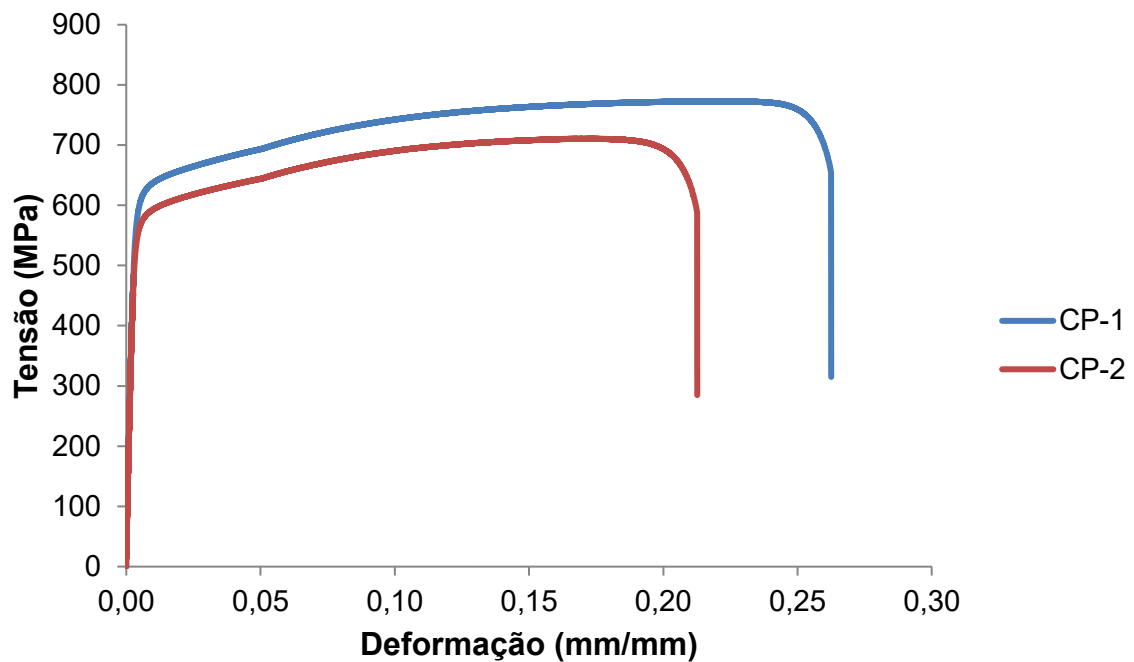


Figura 49 – Diagramas tensão *versus* deformação – cantoneira

Da observação dos diagramas tensão *versus* deformação para os corpos-de-prova da chapa e da cantoneira em aço inoxidável e também pela leitura da Tabela 3, pode-se perceber que as respectivas tensões $\sigma_{0.2\%}$ apresentam uma diferença importante entre si. Os valores obtidos para a tensão $\sigma_{0.2\%}$ para as cantoneiras são superiores aqueles que se esperaria para um aço inoxidável do tipo austenítico. Um comportamento similar para cantoneiras em aço inoxidável austenítico sob ensaios de tração foi observado por Botelho *et al.* [54]. Tais autores realizaram uma profunda caracterização química das cantoneiras em aço inoxidável do tipo austenítico disponíveis no mercado brasileiro utilizando-se a técnica de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) e também observaram o aspecto microestrutural dos materiais por microscopia ótica. Os resultados indicaram que os níveis de Ferro, Níquel, Cromo e Silício estavam dentro dos limites aceitáveis para aços inoxidáveis austeníticos. Adicionalmente, observando-se o aspecto microestrutural dos materiais investigados, Botelho *et al.* [54] concluíram que as partículas negras distribuídas dentro dos grãos eram fases que poderiam ter causado um aumento na resistência mecânica. Contudo, sabe-se que a presença de inclusões individuais e variações no processo de fabricação também podem alterar as propriedades mecânicas dos materiais.

As propriedades mecânicas médias verificadas para as amostras ensaiadas à tração, tanto da chapa quanto da cantoneira, podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas

Propriedades mecânicas	Chapa	Cantoneira
Tipo de aço inoxidável	1.4301 (304)	1.4301 (304)
Módulo de elasticidade (MPa)	203600	201900
Tensão $\sigma_{0,2\%}$ (MPa)	259.9	560.2
Tensão máxima (MPa)	787.6	710.5
Deformação na tensão máxima	0.67	0.21
Deformação na ruptura	0.70	0.24

3.3. Montagem e instrumentação dos ensaios à compressão

Os ensaios de compressão dos painéis enrijecidos confeccionados em aço inoxidável para o desenvolvimento deste trabalho foram realizados no LEC - Laboratório de Engenharia Civil da UERJ. A Figura 50 e a Figura 51 exibem os equipamentos e a instrumentação utilizada para o monitoramento dos ensaios e a aquisição de dados dos mesmos.

Dentre os equipamentos utilizados pode-se citar a prensa hidráulica Lousenhausenwerk, monitores de visualização instantânea de carregamento aplicado, o sistema de aquisição de dados e o computador para armazenamento e processamento dos dados gerados nos ensaios. A instrumentação dos painéis fez uso de LVDTs e extensômetros de resistência elétrica, mais conhecidos pela denominação de *strain gauges*. Os LVDTs são utilizados para a medição de deslocamentos em pontos da estrutura onde estão posicionados. Os *strain gauges* são utilizados para a obtenção de deformações nas regiões onde estão afixados.



Figura 50 – Sistema de aquisição de dados

Duas placas de 20 mm de espessura foram soldadas na parte inferior e superior dos painéis enrijecidos de modo a se obter uma distribuição uniforme de carregamento quando do ensaio à compressão. Os protótipos foram posicionados de tal forma que o centróide dos painéis enrijecidos coincidissem com o centróide do sistema de aplicação de carga, como pode ser observado na Figura 51.

Os ensaios à compressão foram realizados utilizando-se uma máquina Universal Lousenhausenwerk e foi adotada a estratégia de controle de deslocamentos, que é recomendada para ensaios à compressão propensos à falha por instabilidade. Inicialmente, um pré-carregamento de 20 kN foi aplicado aos protótipos para se eliminar eventuais espaçamentos entre os painéis enrijecidos e o sistema de aplicação de carga. A partir daí, o controle de deslocamentos foi utilizado, considerando-se uma velocidade de aplicação de carregamento de 0.003 mm/s até a

carga de falha. A aplicação de carregamento foi interrompida quando uma redução considerável de resistência foi observada, correspondendo à aproximadamente, 80% da carga máxima obtida. A aquisição dos dados provenientes dos ensaios à compressão foi realizada com a utilização do equipamento *National Instruments System*® PXI-1050. Foram gravados os dados dos carregamentos aplicados e os respectivos deslocamentos e deformações durante os ensaios.

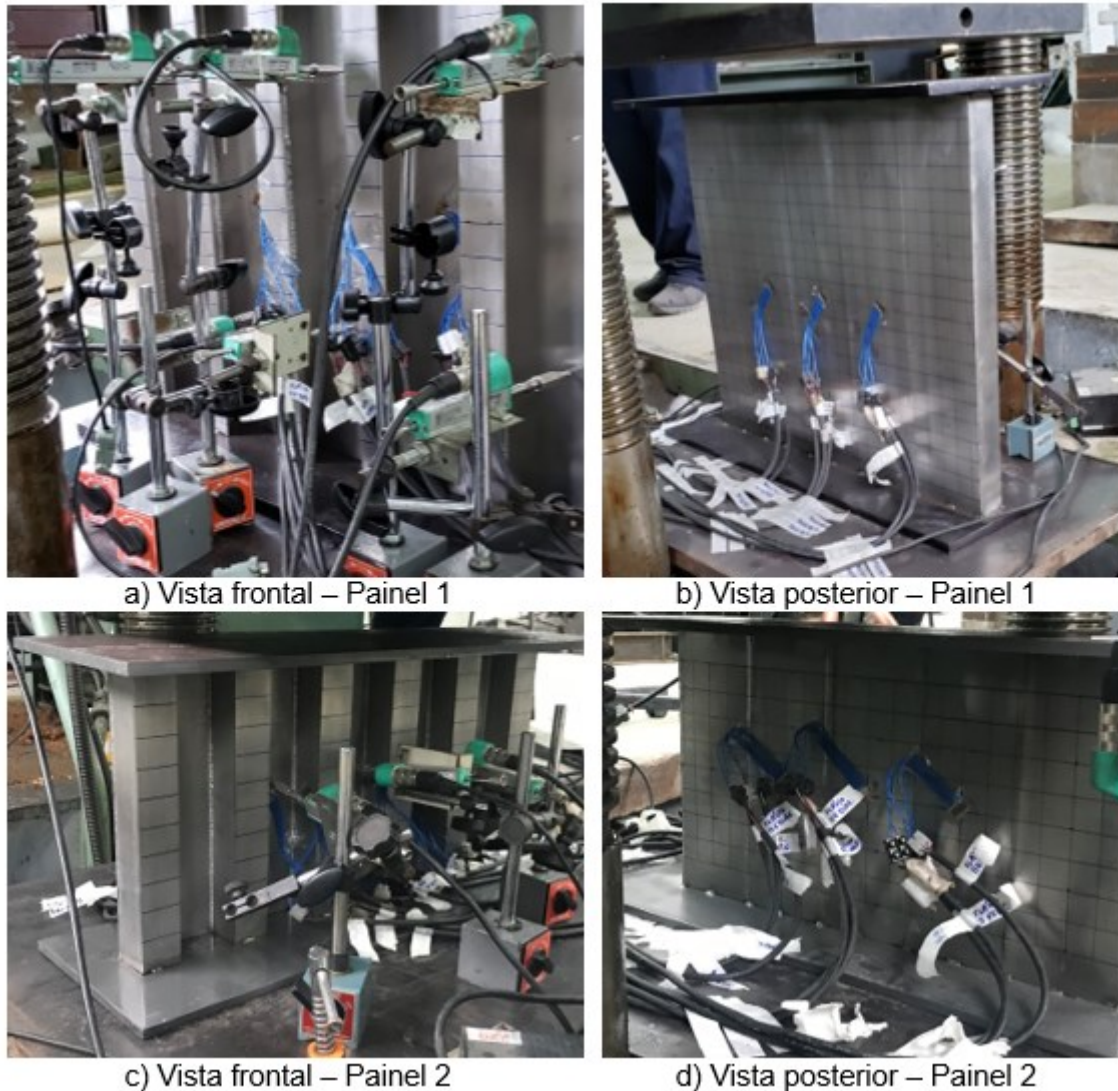


Figura 51 – LVDTs e *strain gauges* – Painel 1 and Painel 2

Para o Painel 1 foram utilizados 3 LVDTs posicionados de forma horizontal a 1/4 da altura do painel e 3 LVDTs posicionados de forma horizontal a 3/4 da altura do painel. Adicionalmente, foram utilizados 2 LVDTs posicionados de forma vertical em pontos diametralmente opostos do ensaio. Vale ressaltar que a rigidez das molas dos LVDTs são desprezíveis e não interferem nos resultados dos deslocamentos medidos.

Foram utilizados ainda, 3 *strain gauges* na face frontal da placa onde foram soldados os enrijecedores tipo cantoneira. Na face posterior da placa foram utilizados 3 *strain gauges*. Finalmente, foi afixado um *strain gauge* nas almas dos dois enrijecedores centrais do Painel 1. Todos os *strain gauges* foram afixados na metade da altura do painel 1. Da Figura 52 até a Figura 56 são exibidos o esquema experimental do Painel 1, bem como as cotas dos LVDTs e *strain gauges* utilizados.

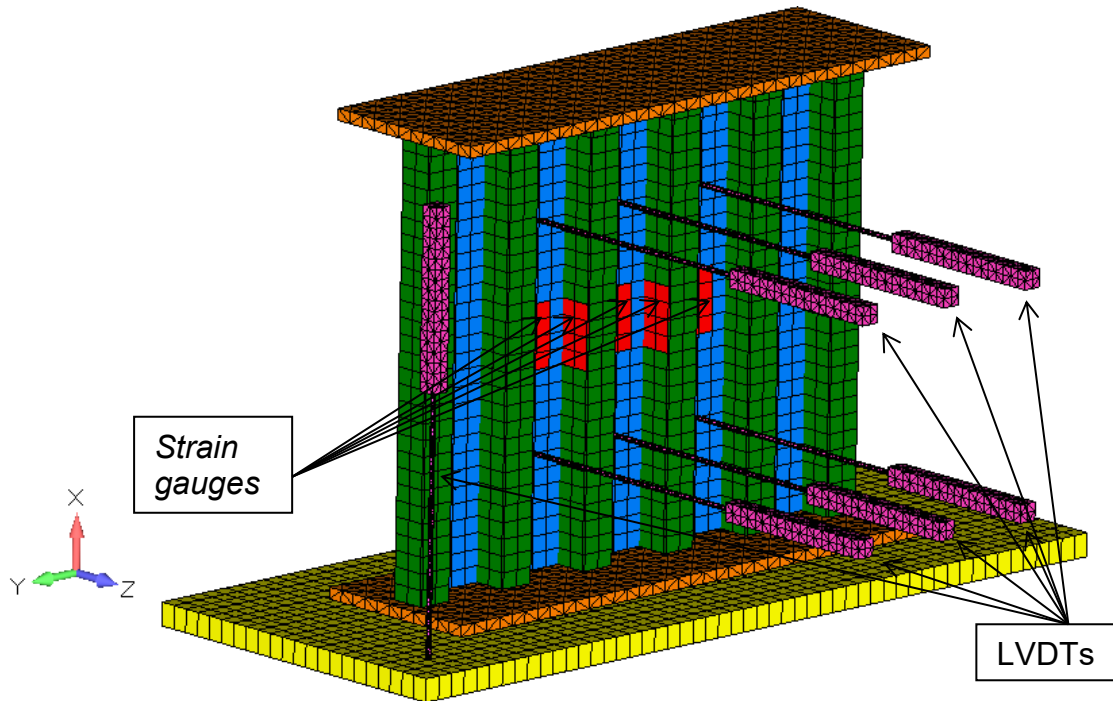


Figura 52 – Esquema experimental – Vista frontal - Painel 1

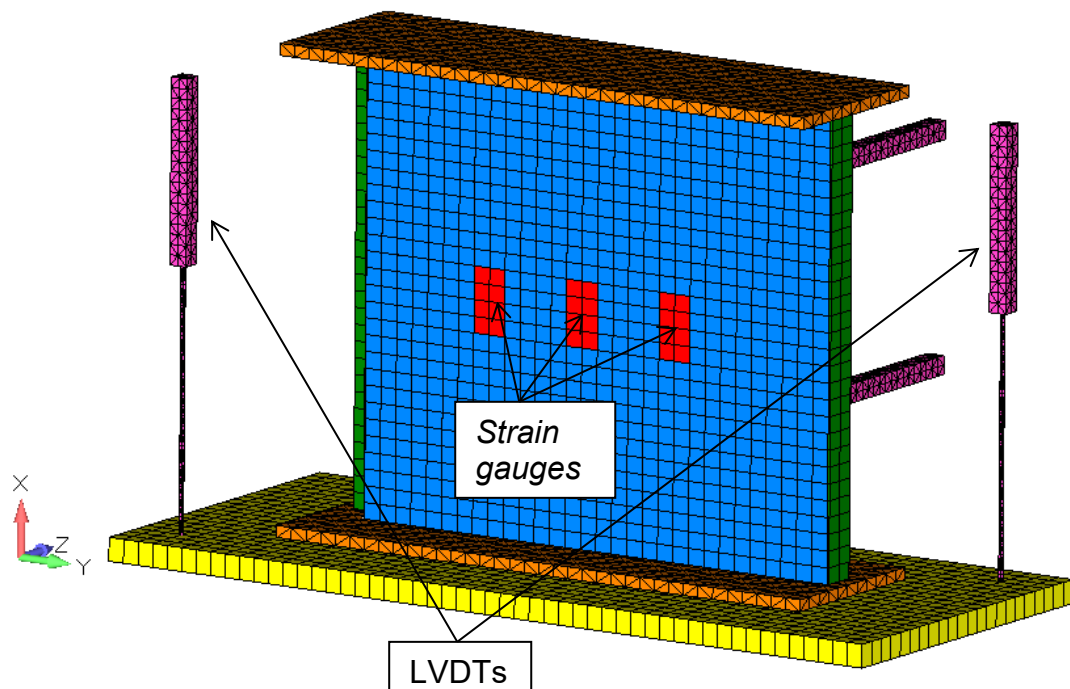


Figura 53 – Esquema experimental – Vista posterior - Painel 1

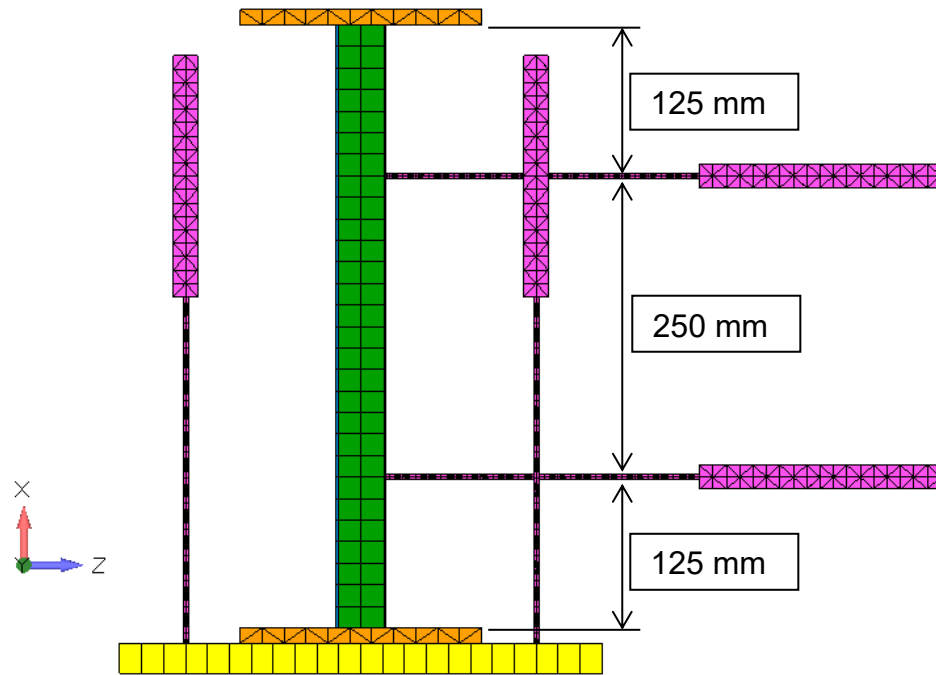


Figura 54 – Cotas dos LVDTs – Vista lateral - Painei 1

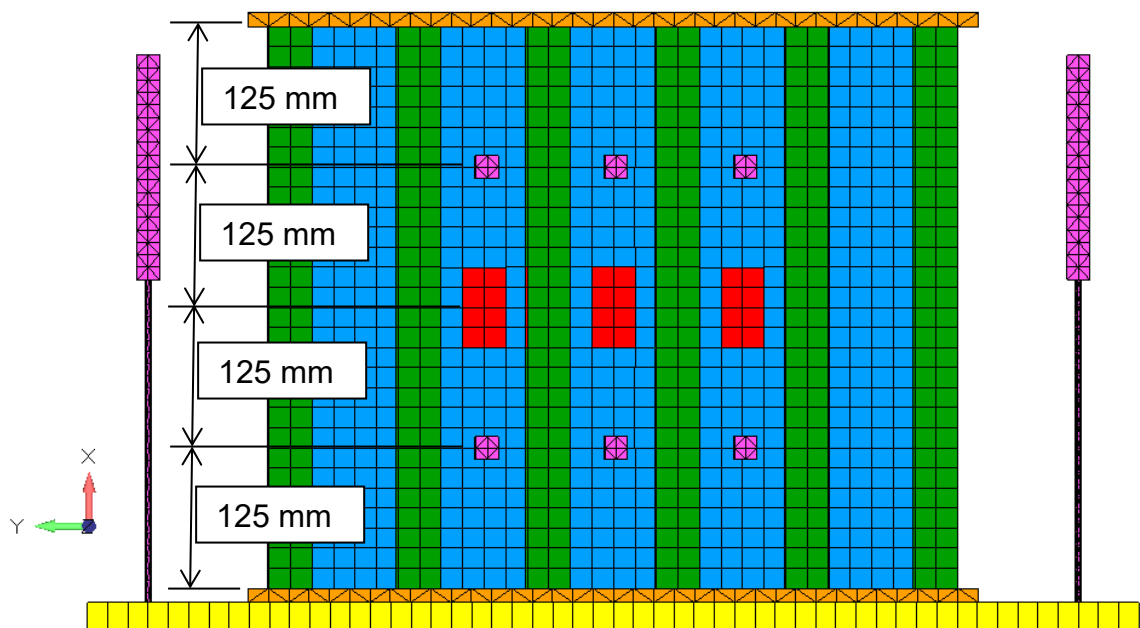


Figura 55 – Cotas dos LVDTs e *strain gauges* – Vista frontal - Painei 1

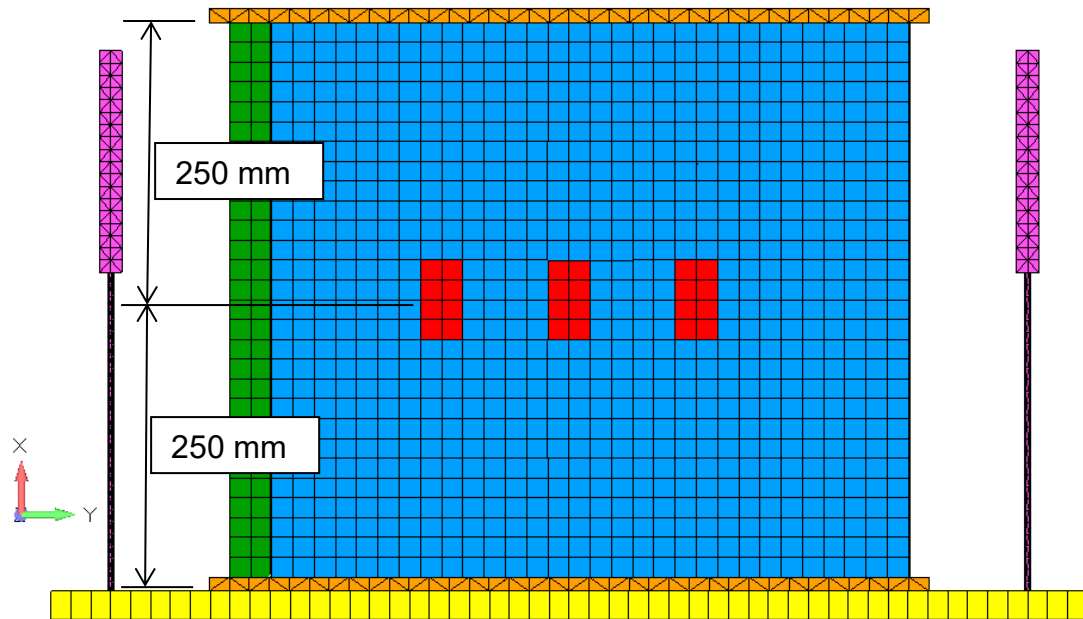


Figura 56 – Cotas dos *strain gauges* – Vista posterior - Paine 1

A Figura 57, exibe um LVDT e os *strain gauges* utilizados para instrumentação dos ensaios à compressão do Paine 1.

Para o Paine 2 foram utilizados 3 LVDTs posicionados de forma horizontal na metade da altura do painel. Adicionalmente, foram utilizados 2 LVDTs posicionados de forma vertical em pontos diametralmente opostos do ensaio. Novamente, vale ressaltar que a rigidez das molas dos LVDTs são desprezíveis e não interferem nos resultados dos deslocamentos medidos. Foram utilizados ainda 3 *strain gauges* na face frontal da placa onde foram soldados os enrijecedores tipo cantoneira. Na face posterior da placa foram utilizados 3 *strain gauges*. Finalmente, foi afixado um *strain gauge* nas almas dos dois enrijecedores centrais do Paine 2. Todos os *strain gauges* foram afixados na metade da altura do Paine 2. A Figura 58 até a Figura 62 exibem o esquema experimental do Paine 2, bem como as cotas dos LVDTs e *strain gauges* utilizados.

A Figura 63 e a Figura 64 exibem os LVDTs e os *strain gauges* utilizados para instrumentação dos ensaios à compressão do Paine 2.



Figura 57 – LVDTs e *strain gauges* – Vista posterior - Painei 1

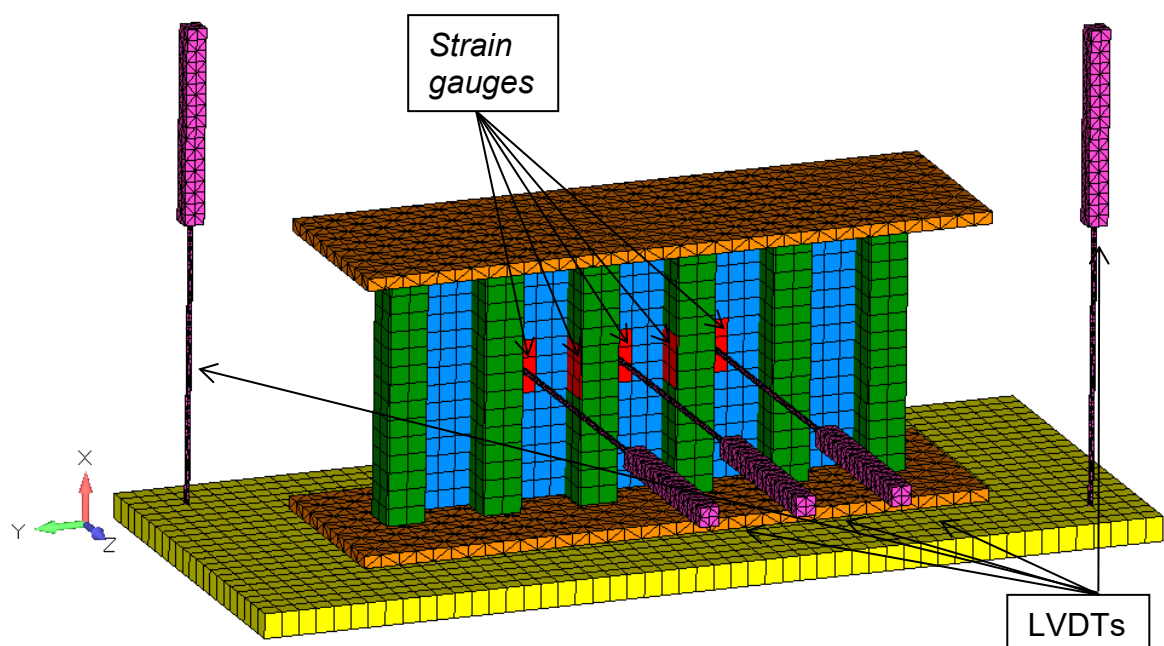


Figura 58 – Esquema experimental – Vista frontal - Painei 2

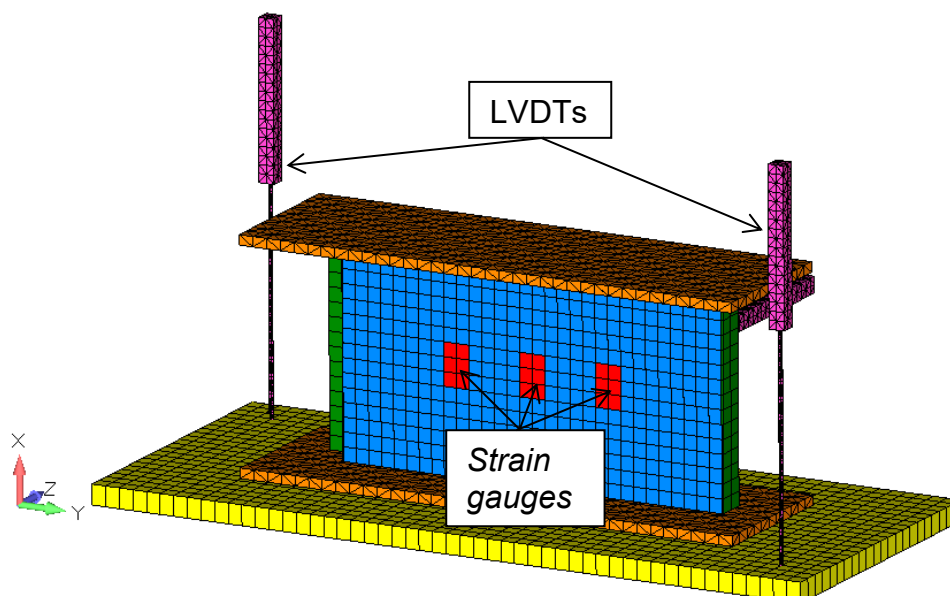


Figura 59 – Esquema experimental – Vista posterior - Painei 2

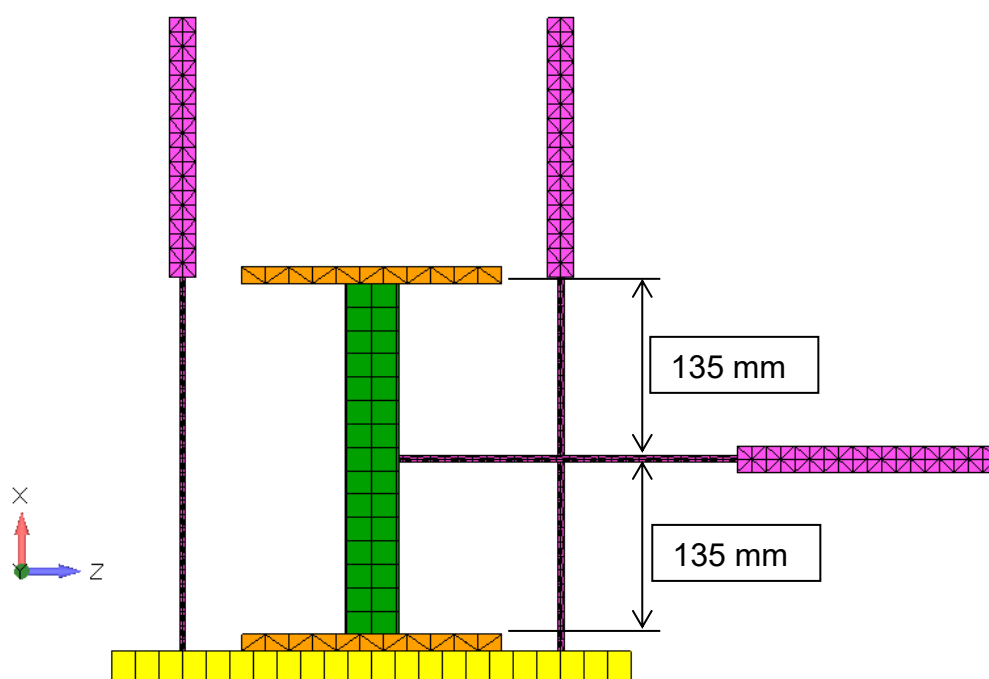


Figura 60 – Cotas dos LVDTs – Vista lateral - Painei 2

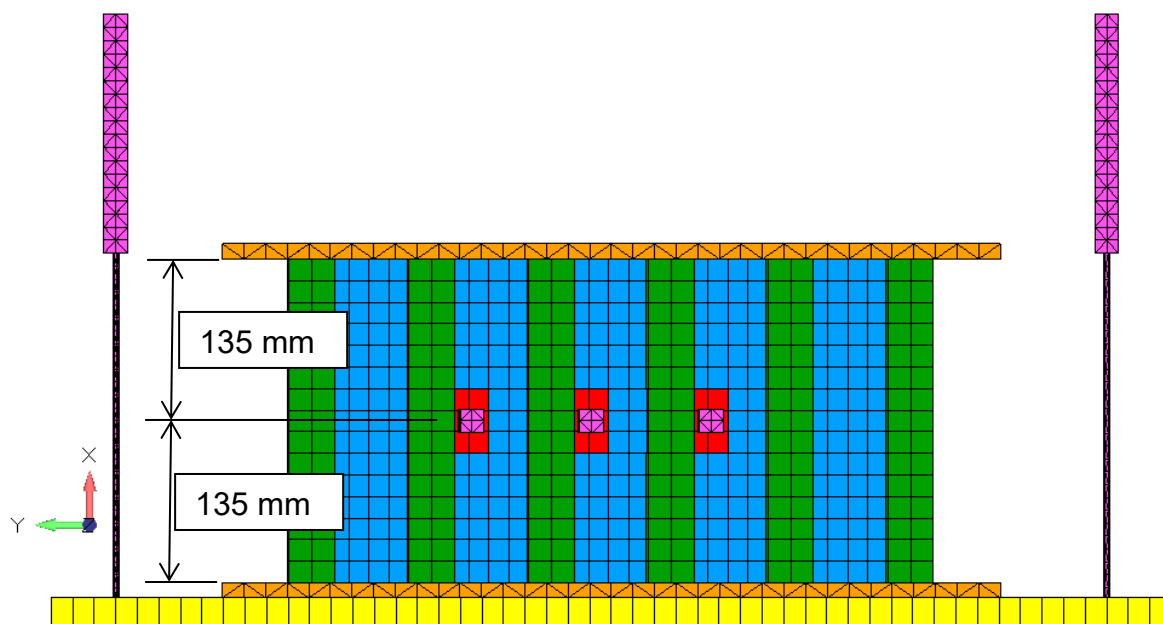


Figura 61 – Cotas dos LVDTs e *strain gauges* – Vista frontal - Painel 2

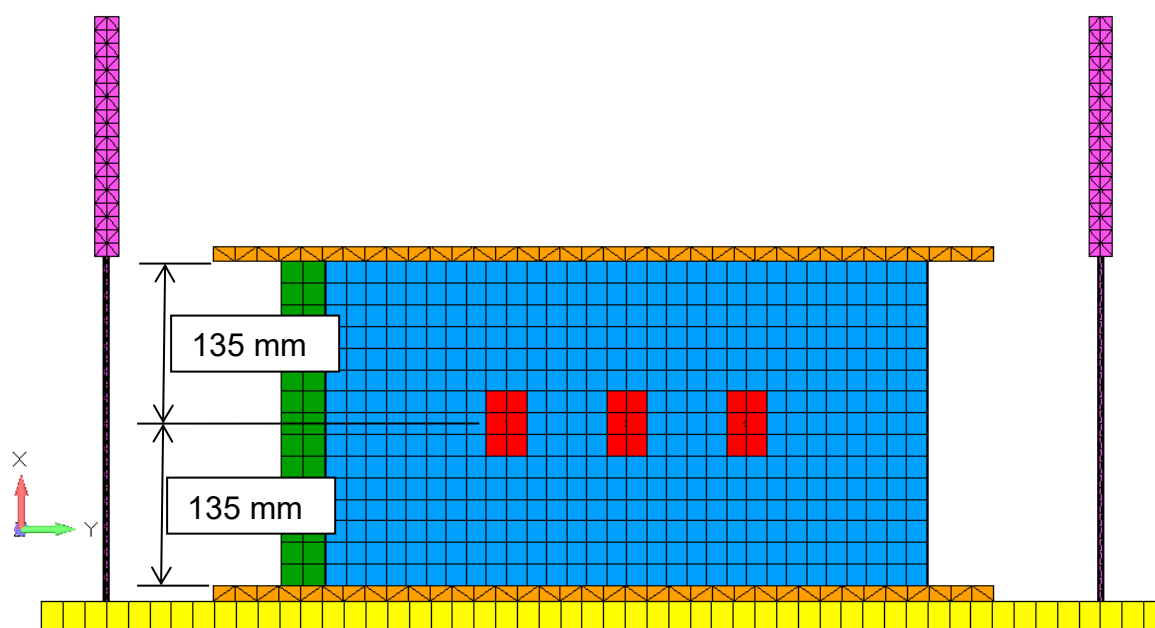


Figura 62 – Cotas dos *strain gauges* – Vista posterior - Painel 2



Figura 63 – LVDTs e *strain gauges* – Vista frontal - Painei 2



Figura 64 – *Strain gauges* – Vista posterior - Painei 2

3.4. Resultados experimentais

Após a realização dos ensaios experimentais à compressão para o Painel 1 e para o Painel 2, foram obtidos os resultados da instrumentação realizada, em termos de deformações e deslocamentos. A calibração dos modelos numéricos, de forma a reproduzir os resultados apresentados pelos modelos experimentais, será apresentada e discutida no capítulo 5 deste trabalho.

A Figura 65 e a Figura 66 exibem os diagramas carga *versus* deformação normal ϵ_x para os *strain gauges* destacados em vermelho e afixados nas faces frontal e posterior da placa entre enrijecedores e na alma de um enrijecedor do Painel 1, respectivamente. Os *strain gauges* fizeram o registro das deformações até cerca de 20000 $\mu\epsilon$, quando atingiram seu limite de funcionamento.

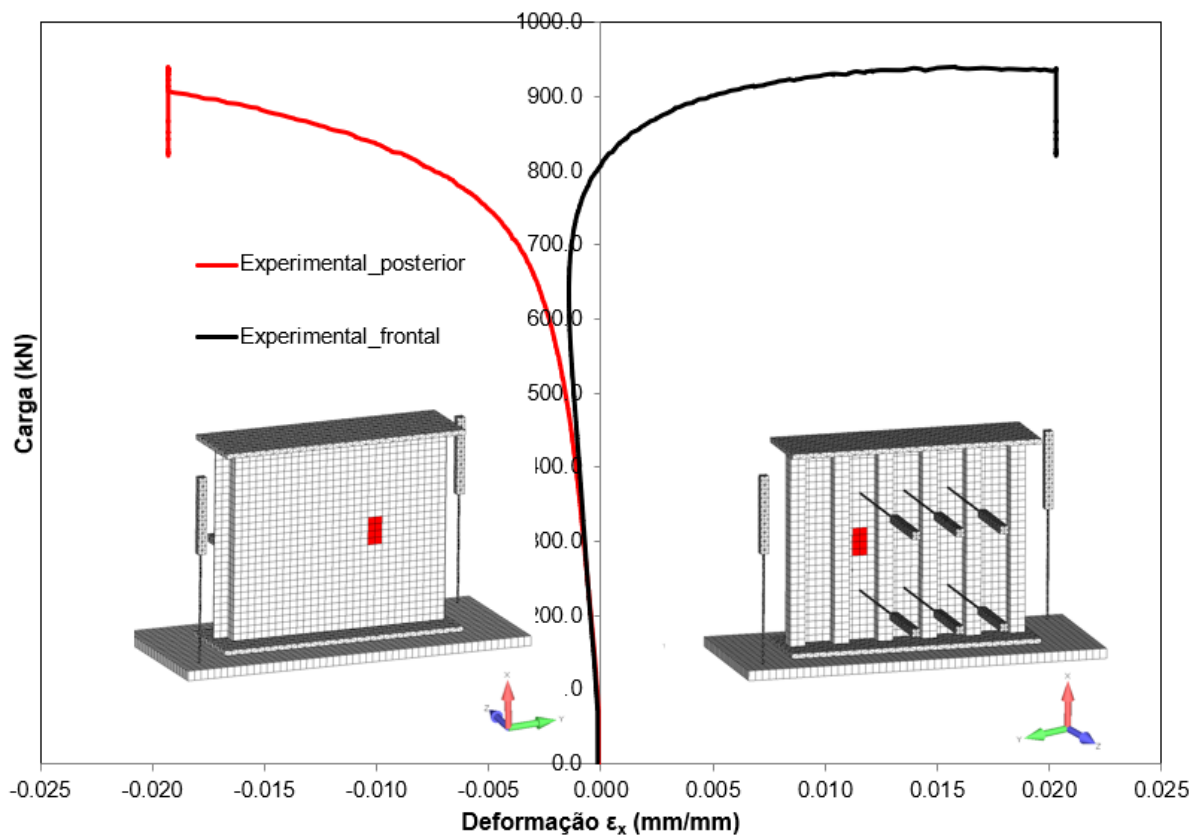


Figura 65 – Diagrama carga *versus* deformação – Placa do Painel 1

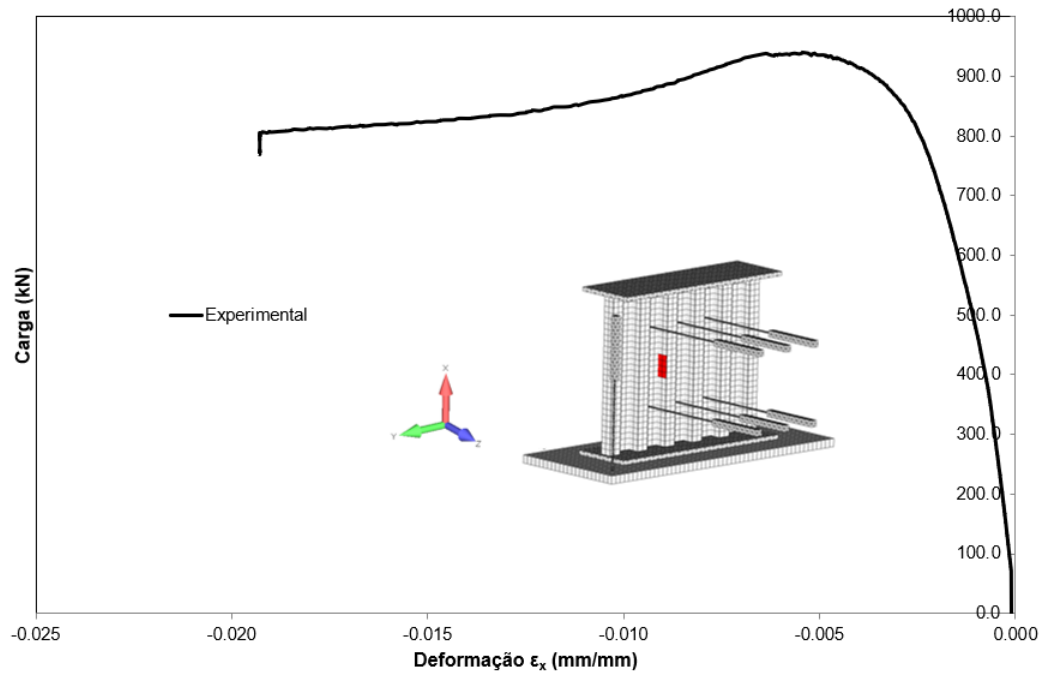


Figura 66 – Diagrama carga *versus* deformação – Enrijecedor do Painel 1

A Figura 67 e a Figura 68 exibem os diagramas carga *versus* deslocamento na direção z, perpendicular ao plano da placa entre enrijecedores, para os LVDTs destacados em vermelho, superior e inferior do Painel 1, respectivamente.

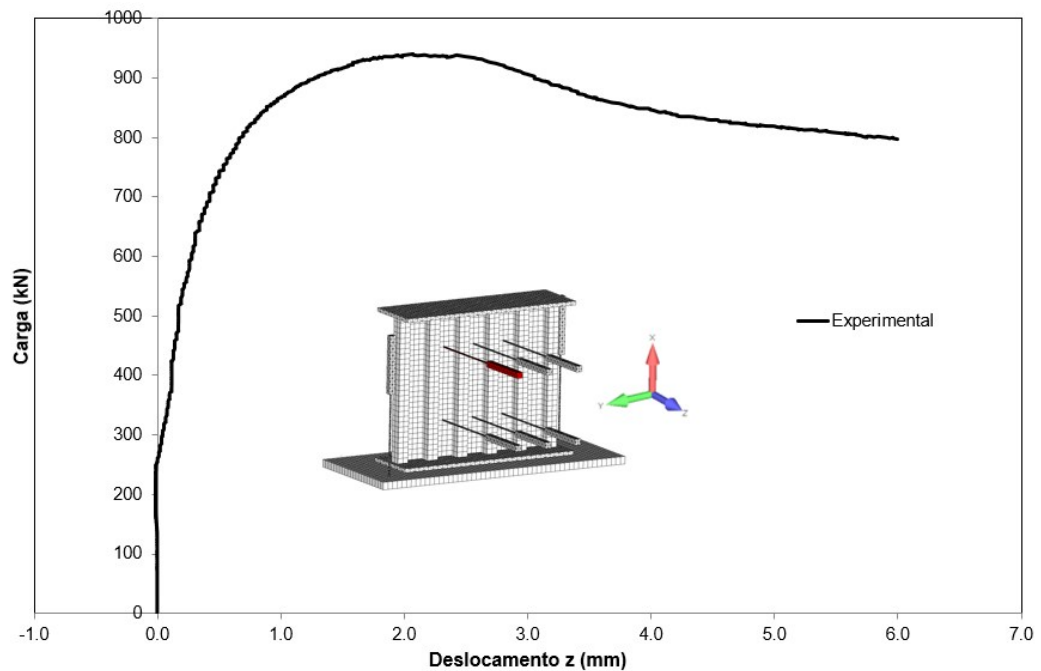


Figura 67 – Diagrama carga *versus* deslocamento – LVDT superior - Painel 1

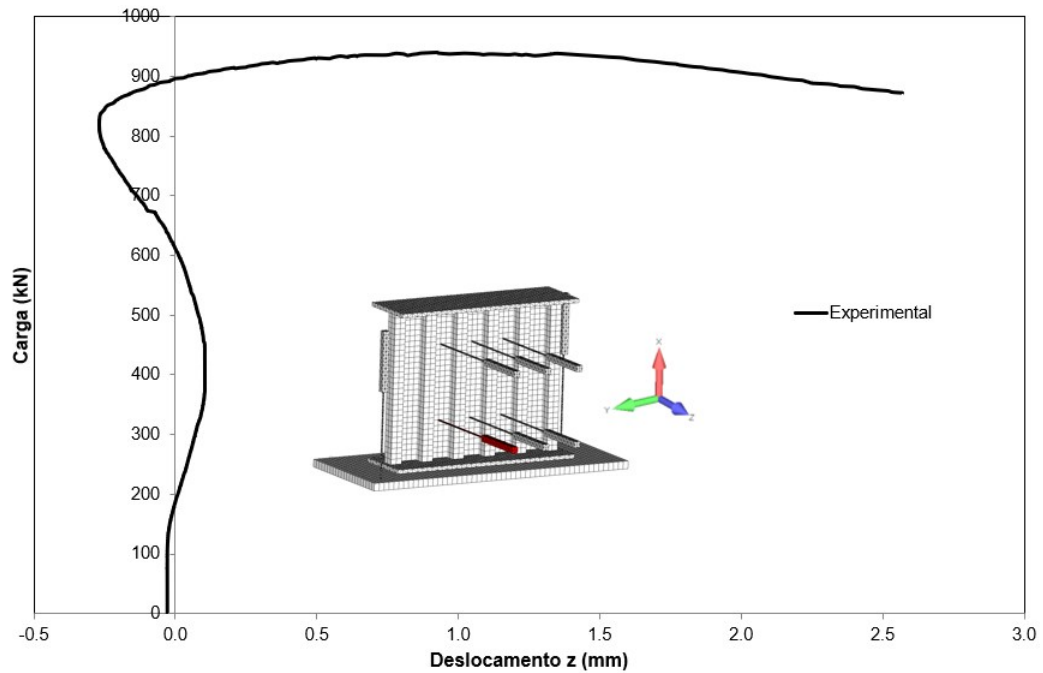


Figura 68 – Diagrama carga *versus* deslocamento – LVDT inferior - Paine 1

A Figura 69 e a Figura 70 exibem os diagramas carga *versus* deformação normal ϵ_x para os *strain gauges* destacados em vermelho e afixados nas faces frontal e posterior da placa entre enrijecedores e na alma de um enrijecedor do Paine 2, respectivamente.

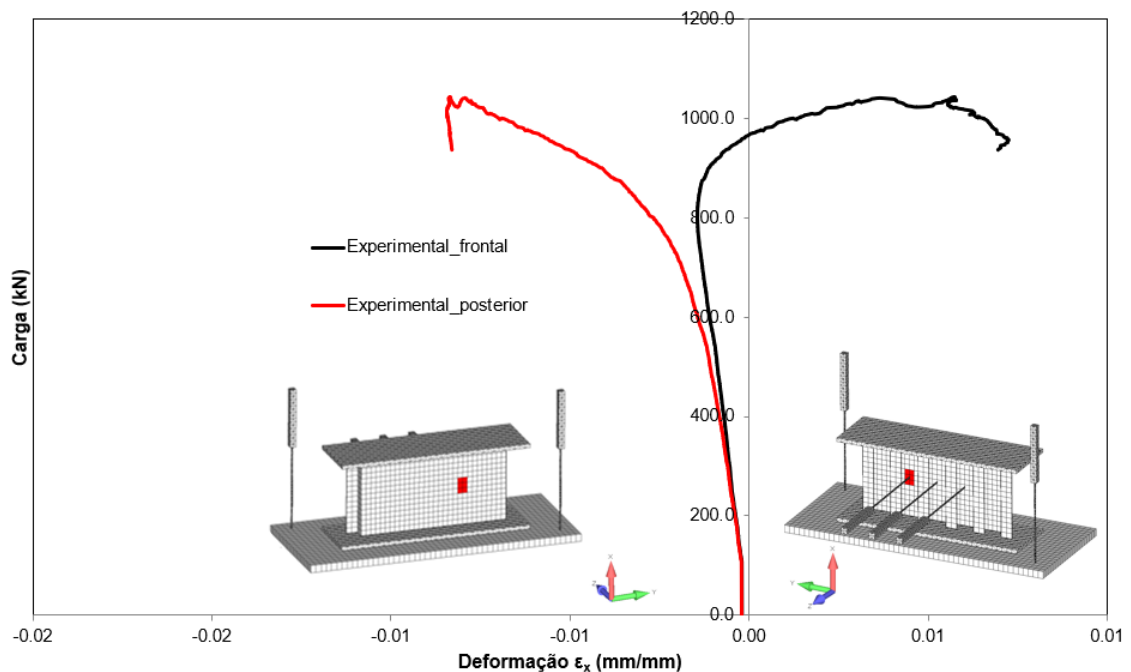


Figura 69 – Diagrama carga *versus* deformação – Placa do Paine 2

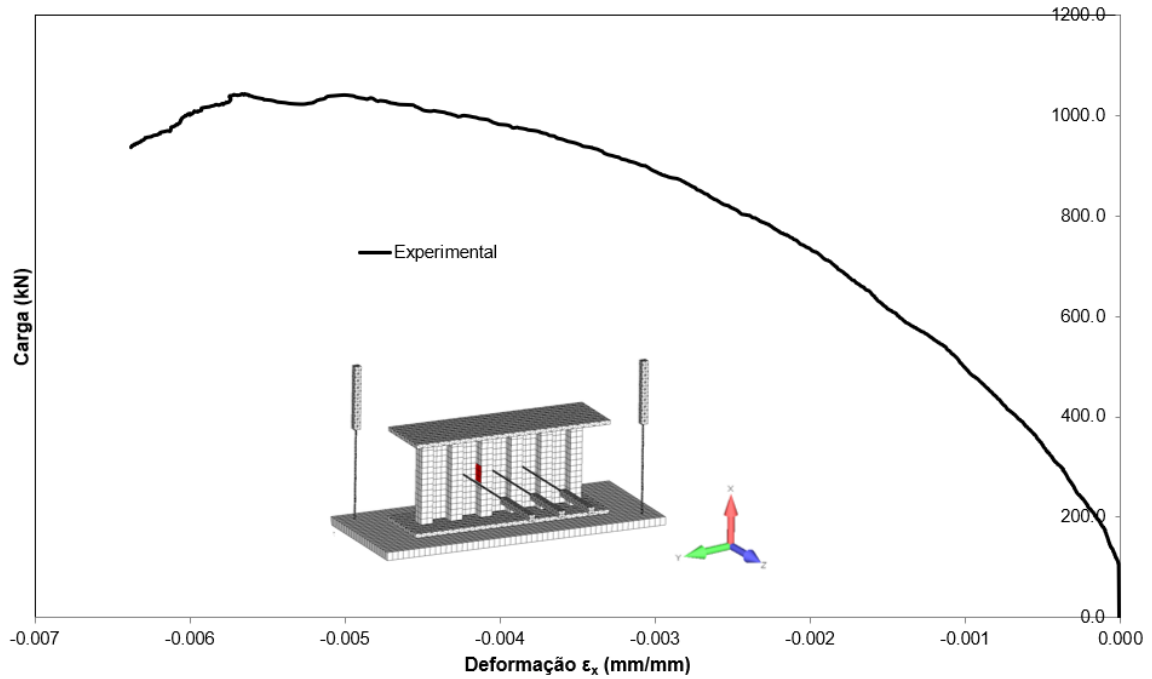


Figura 70 – Diagrama carga *versus* deformação – Enrijecedor do Paine 2

A Figura 71 exibe o diagrama carga *versus* deslocamento na direção z, perpendicular ao plano da placa entre enrijecedores, para um LVDT destacado em vermelho, referente ao Paine 2.

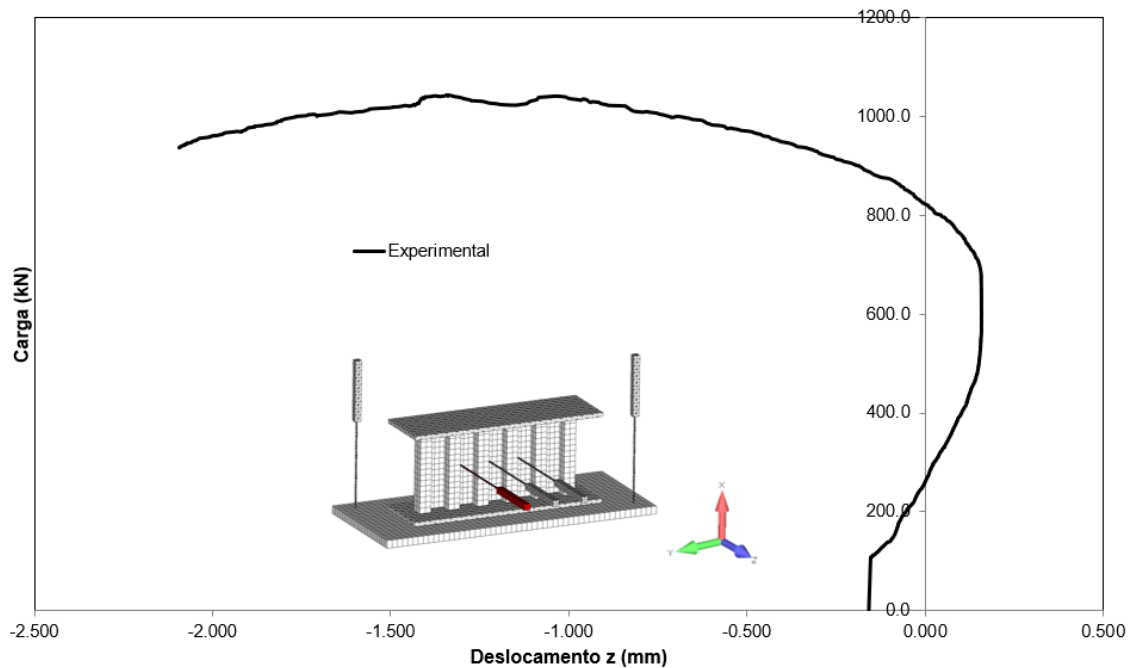


Figura 71 – Diagrama carga *versus* deslocamento – LVDT - Paine 2

A Figura 72 e a Figura 73 apresentam os diagramas carga vertical *versus* deslocamento vertical médio na direção x, para os LVDTs destacados em vermelho, para o Painel 1 e o Painel 2, respectivamente.

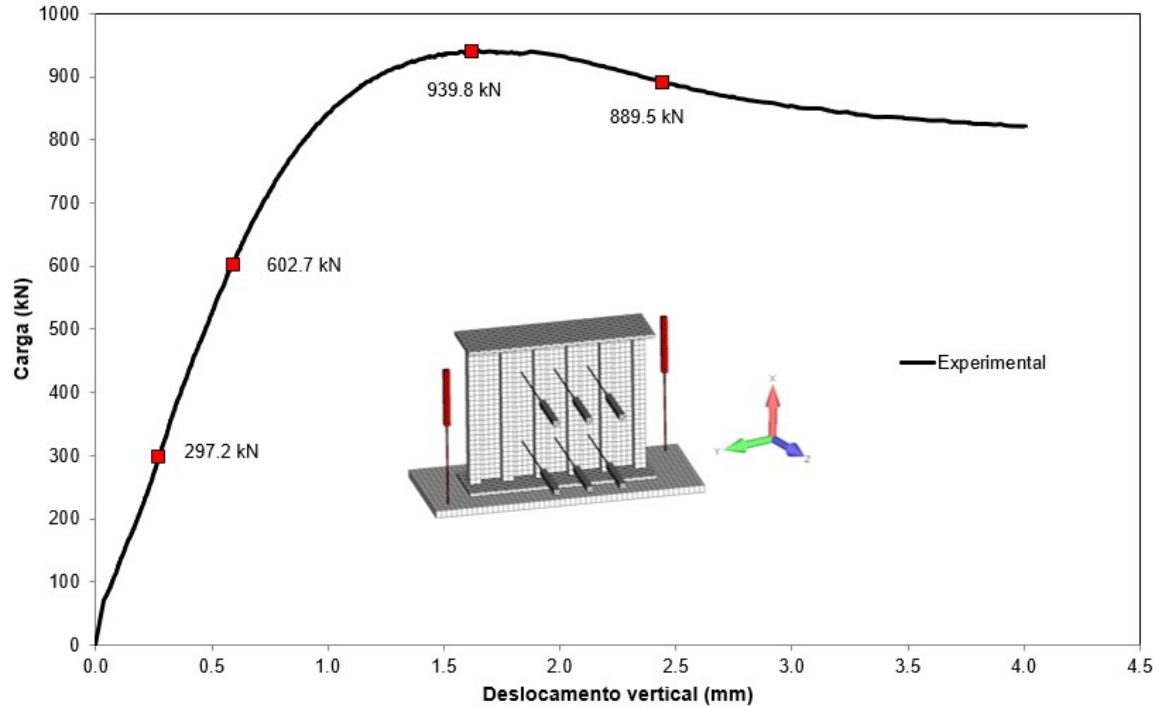


Figura 72 – Diagrama carga *versus* deslocamento - Painel 1

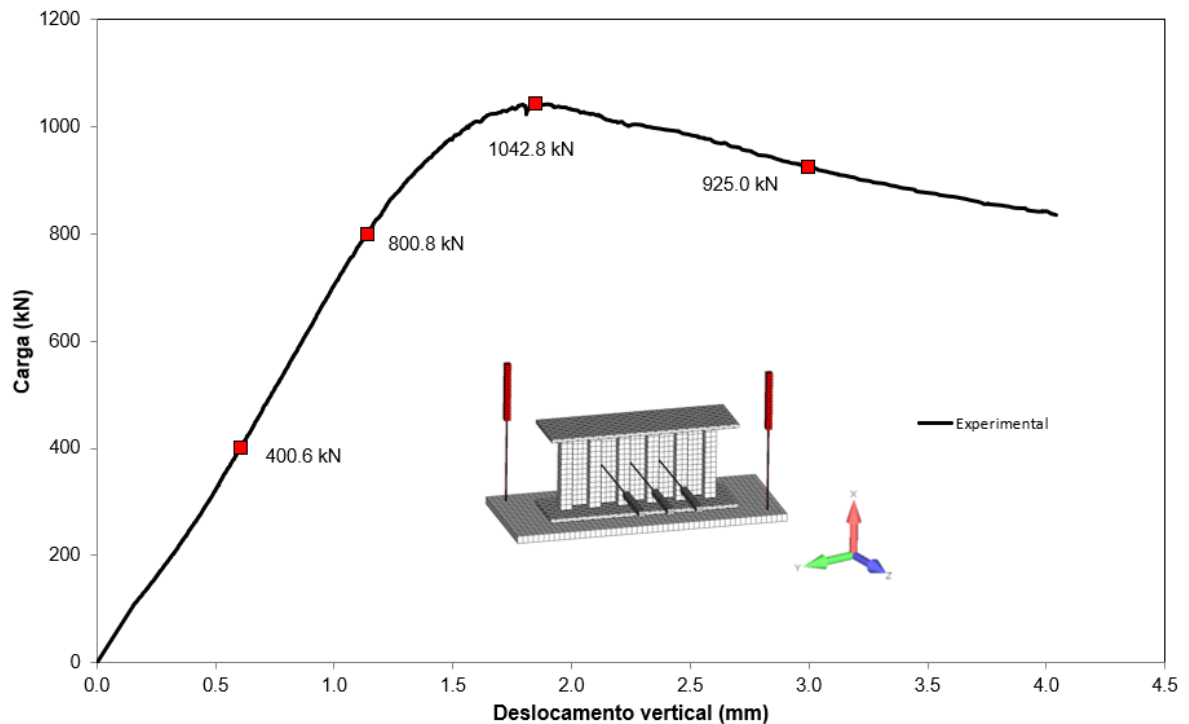


Figura 73 – Diagrama carga *versus* deslocamento - Painel 2

Painel 1 - Experimental



Carga aplicada = 297.2 kN



Carga aplicada = 297.2 kN



Carga aplicada = 602.7 kN



Carga aplicada = 602.7 kN



Carga aplicada = 939.8 kN



Carga aplicada = 939.8 kN



Carga aplicada = 889.5 kN



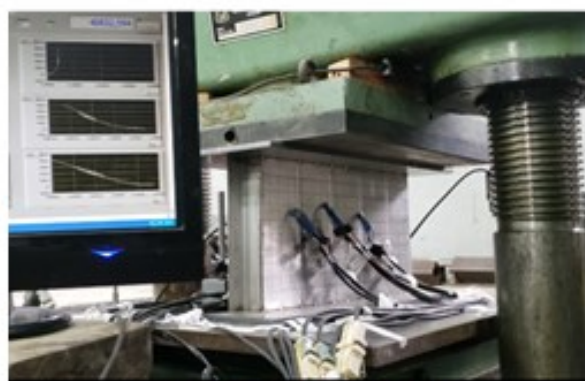
Carga aplicada = 889.5 kN

Figura 74 – Diferentes níveis de carregamento – Experimental - Painel 1

Painel 2 - Experimental



Carga aplicada = 400.6 kN



Carga aplicada = 400.6 kN



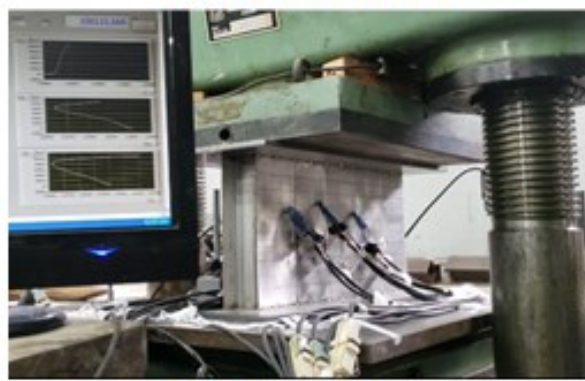
Carga aplicada = 800.8 kN



Carga aplicada = 800.8 kN



Carga aplicada = 1042.8 kN



Carga aplicada = 1042.8 kN



Carga aplicada = 925.0 kN



Carga aplicada = 925.0 kN

Figura 75 – Diferentes níveis de carregamento – Experimental - Painel 2

A Figura 74 e a Figura 75 exibem a configuração deformada dos modelos experimentais para diferentes passos de carregamento aplicados ao Painel 1 e ao Painel 2, respectivamente. Para ambos os painéis, observa-se a ocorrência de flambagem local das placas entre enrijecedores, evidenciada pelo aparecimento de meias-ondas, que precede a resistência última.

4. MODELOS NUMÉRICOS

4.1. Introdução

Para avaliar a influência das imperfeições geométricas na resistência de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável, bem como o seu comportamento no regime pós-flambagem, foram elaborados modelos numéricos em elementos finitos. Dois modelos foram elaborados e denominados respectivamente de Painel 1 e Painel 2. A Figura 38 e a Figura 39 apresentam as configurações geométricas dos modelos. Cabe mencionar que as configurações geométricas para os modelos numéricos apresentam as mesmas características adotadas para os modelos experimentais em escala reduzida descritos no capítulo 4 deste trabalho. Os modelos numéricos desenvolvidos foram calibrados de modo a se reproduzir os resultados experimentais.

Para a elaboração dos modelos em elementos finitos, foi utilizado o *software* Ansys [55]. Este foi utilizado para a parametrização da geometria dos modelos, permitindo uma maior flexibilização da mesma. Desta forma, diferentes conformações geométricas puderam ser obtidas rapidamente apenas com a mudança de valores atribuídos às variáveis programadas previamente por meio da interface do *software* Ansys [55] denominada APDL (*Ansys Parametric Design Language*).

Após a etapa de construção da geometria dos painéis enrijecidos, houve a atribuição de materiais às placas e cantoneiras, geração de malhas, condições de contorno, aplicação de carregamentos e a posterior análise estrutural de cada um dos painéis. Todas estas etapas foram realizadas com a utilização do *software* Ansys [55]. Após a conclusão das etapas mencionadas anteriormente, os modelos dos painéis enrijecidos foram exportados para o *software* Femap/NX Nastran [56], onde foi realizado todo o pós-processamento da análise estrutural.

4.2. Tipo de elemento, malha de elementos finitos e material

Os modelos foram compostos por elementos do tipo SHELL 181 [55]. Os elementos do tipo casca foram utilizados para modelar as placas e os enrijecedores. Tais elementos apresentam quatro nós e seis graus de liberdade por nó, sendo três graus de liberdade de translação e três graus de liberdade de rotação.

Após um estudo de convergência de resultados, no qual foram testados diferentes tamanhos de malha para os modelos elaborados, adotou-se uma malha de elementos finitos da ordem de 20.0 mm, gerando modelos com 1442 nós e 1362 elementos para o Painel 1. Para o Painel 2, foram gerados modelos com malha de elementos finitos da ordem de 20.0 mm, com 762 nós e 698 elementos.

A fim de se reproduzir as mesmas condições de contorno verificadas nos ensaios experimentais, as extremidades inferior e superior dos painéis enrijecidos tiveram seus graus de liberdade de translação e rotação restritos. Foram aplicados deslocamentos prescritos nos graus de liberdade de translação vertical no topo dos painéis enrijecidos.

O aço inoxidável austenítico 304 foi representado nos modelos numéricos pela curva tensão *versus* deformação nominal, de acordo com os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo 4 do presente trabalho, ou seja, conforme a Figura 48 e a Figura 49. A curva tensão *versus* deformação nominal foi utilizada pois não são esperadas magnitudes de deformações tais que justifiquem a utilização da curva verdadeira. A lei constitutiva do material em aço inoxidável austenítico foi representada nos modelos numéricos pela utilização do comando “MISO” – multilinear isotrópico, presente na biblioteca de definição de materiais do *software* Ansys [55].

Para se avaliar a carga última, bem como o seu comportamento global, deslocamentos prescritos foram aplicados na face superior dos painéis enrijecidos, de forma monotônica na direção global X (UX). A análise não linear foi realizada com a utilização de um método incremental-iterativo baseado no algoritmo de Newton-Raphson, considerando-se não linearidade física e geométrica. A não linearidade geométrica foi incluída nos modelos considerando-se grandes deslocamentos e deformações pela utilização do algoritmo de Lagrange atualizado. O aspecto geral dos modelos em elementos finitos para o Painel 1 e o Painel 2 pode ser visualizado na Figura 76.

Antes da avaliação da resistência última dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável, imperfeições geométricas globais e locais foram introduzidas nos modelos numéricos, conforme explicado em detalhes na seção a seguir. Tais imperfeições geométricas exercem forte influência no decréscimo da carga última e no campo de deslocamentos e deformações dos painéis enrijecidos quando se comparam estes resultados com painéis sem imperfeições geométricas iniciais.

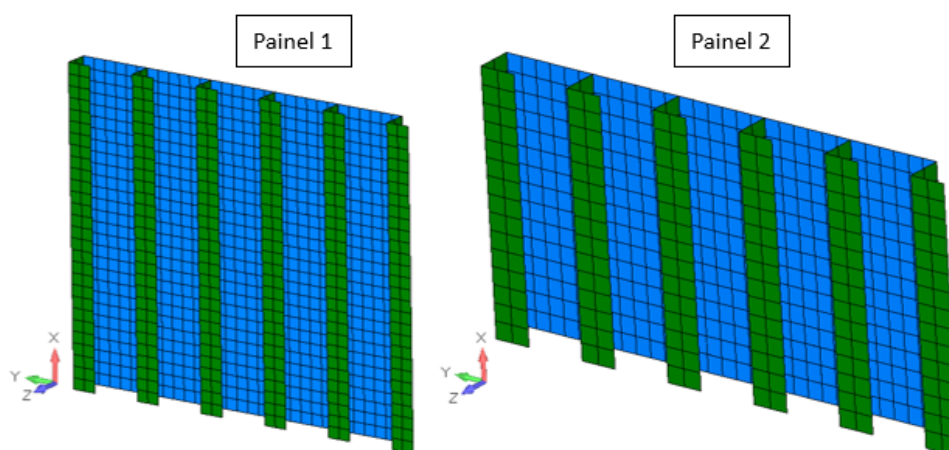


Figura 76 – Modelos em elementos finitos dos painéis enrijecidos

4.3. Imperfeições iniciais

Conforme mencionado anteriormente, o comportamento estrutural dos painéis enrijecidos é fortemente influenciado pela presença das imperfeições geométricas iniciais oriundas dos processos de fabricação. Desta forma, a fim de se avaliar a resposta global dos painéis investigados, dois diferentes tipos de imperfeições foram considerados nos modelos em elementos finitos: local e global. É importante mencionar que as imperfeições iniciais dos modelos experimentais não foram medidas devido à limitações de laboratório. Tais limitações incluem a impossibilidade de medição das imperfeições geométricas iniciais no domínio do painel enrijecido como um todo, ou seja, na placa e também nos enrijecedores. Neste caso, foi inicialmente adotado o valor de imperfeição inicial global indicado pela norma DNV-OS-C401 [57]. No referido código de projeto, a máxima imperfeição geométrica global na fase de construção é de 0.15% do vão do painel enrijecido. A Figura 77 ilustra a imperfeição geométrica global aplicada na região central do painel enrijecido. Por outro lado, a imperfeição geométrica local máxima, conforme a norma DNV-OS-C401 [57], corresponde a 0.5% do espaçamento entre dois enrijecedores paralelos consecutivos, como também pode ser visualizado na Figura 77.

As imperfeições geométricas globais foram implementadas nos modelos numéricos pela aplicação de deslocamentos prescritos nos enrijecedores, na altura da região central dos painéis enrijecidos. O grau de liberdade na direção de aplicação dos deslocamentos prescritos foi restrito à translação. O topo e a base dos modelos em elementos finitos dos painéis enrijecidos foram considerados engastados. A Figura

78 abaixo, exhibe as condições de contorno consideradas nos modelos para a aplicação das imperfeições geométricas globais.

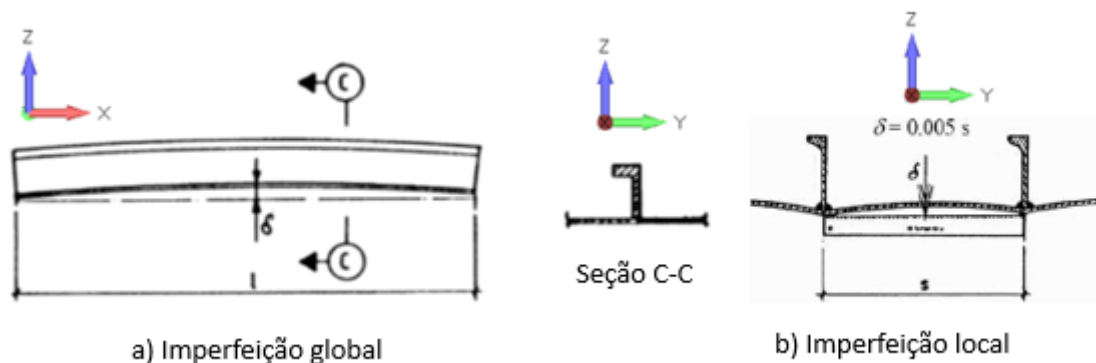


Figura 77 – Imperfeições geométricas global e local [57]

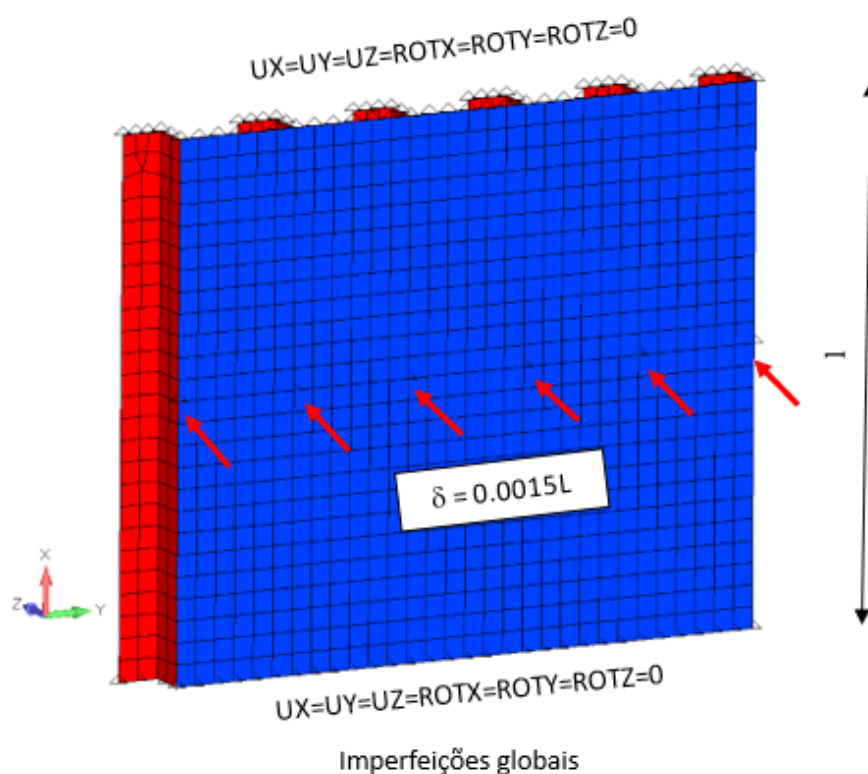


Figura 78 – Condições de contorno - Imperfeições geométricas globais

Adicionalmente, imperfeições geométricas locais foram aplicadas às placas entre enrijecedores. Para tanto, uma análise de estabilidade elástica foi realizada para a determinação do modo de flambagem com amplitude máxima unitária, que foi

posteriormente escalado para a obtenção do nível de imperfeição geométrica desejado no modelo numérico. Assim, por exemplo, para a obtenção de uma imperfeição geométrica de 0.5% da largura entre enrijecedores de placas para o Painel 1, escalou-se o campo de deslocamentos por um fator de 575×10^{-3} . A Figura 79, ilustra o campo de deslocamentos obtido pela análise de flambagem elástica utilizando-se o *software* Nastran [56]. Cabe ressaltar que, para a introdução das imperfeições geométricas locais nos modelos em elementos finitos, adotou-se o campo de deslocamentos produzido pelo primeiro modo de flambagem (autovetor) dos painéis enrijecidos.

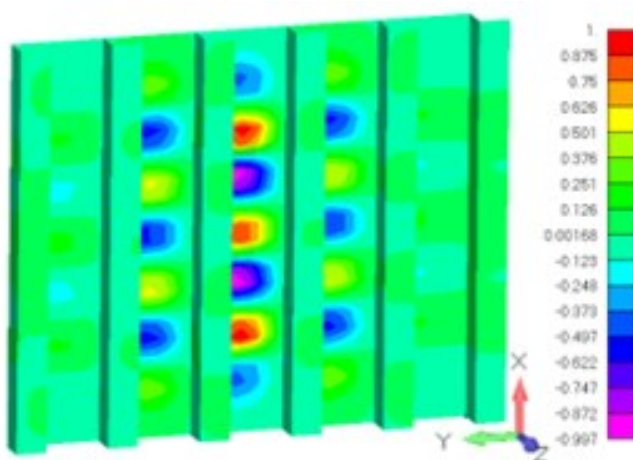


Figura 79 – Campo de deslocamentos obtido pela análise de flambagem elástica

Para a aplicação das imperfeições geométricas locais, bem como para a obtenção da carga última dos painéis enrijecidos, o topo e a base dos modelos em elementos finitos foram considerados engastados, à semelhança das condições de contorno para a aplicação das imperfeições geométricas globais. A diferença entre as condições de contorno para a aplicação das imperfeições geométricas globais e locais verifica-se na região central dos painéis enrijecidos. Para a aplicação das imperfeições geométricas locais e também para a obtenção da carga última dos painéis enrijecidos, a região central dos modelos em elementos finitos está livre para transladar, enquanto o topo e a base dos modelos permanecem engastados. Já para a aplicação das imperfeições geométricas globais, os enrijecedores na altura da região central dos painéis enrijecidos, tiveram o grau de liberdade na direção de aplicação dos deslocamentos prescritos, restrito à translação.

Cabe ressaltar, que a aplicação das imperfeições geométricas locais se dá após a aplicação das imperfeições geométricas globais, ou seja, a partir da condição deformada global, aplica-se a deformação local, de forma tal, que o modelo numérico resultante apresente um campo de deformações composto simultaneamente por deformações globais e locais.

4.4. Comparação dos resultados experimentais e numéricos

Uma vasta avaliação da influência das imperfeições globais e locais foi realizada para os painéis enrijecidos dos modelos numéricos para se calibrar os resultados em termos de carga última e deformação dos modelos experimentais em escala reduzida investigados neste trabalho. Tal análise de sensibilidade das imperfeições foi conduzida para se avaliar se as máximas imperfeições geométricas recomendadas pela norma DNV-OS-C401 [57], para o aço carbono, aplicar-se-iam ao aço inoxidável austenítico 304. Diferentes combinações de imperfeições iniciais foram consideradas. Para as imperfeições globais, foram estudados valores variando de $l/500$ a $l/1000$ correspondendo a valores de δ de $0.002\ l$ até $0.001\ l$. Para as imperfeições locais, valores de $0.005\ s$ até $0.01\ s$ foram avaliados. Os diagramas da Figura 80 e da Figura 81, exibem dois tipos de rótulos para os modelos numéricos em sua descrição. O primeiro rótulo refere-se à magnitude da imperfeição global aplicada ao modelo numérico, enquanto o segundo rótulo indica a imperfeição local. Desta forma, por exemplo, para o diagrama $l/1000 - 0.005\ s$ que trata do Painel 1, foi aplicada uma imperfeição global de $0.5\ mm$ ($500/1000$) e uma imperfeição local de $0.575\ mm$ (0.005×115) no modelo em elementos finitos. Os resultados obtidos para o Painel 1 em termos de carga vertical *versus* deslocamento vertical estão apresentados na Figura 80.

Conforme pode ser observado na Figura 80, os diferentes modelos de imperfeições geométricas iniciais provocaram pequenas mudanças na magnitude da carga última do painel enrijecido, mesmo quando foi adotada uma condição de contorno rotulada para o modelo numérico. A Figura 81 exhibe o melhor ajuste em termos de carga vertical *versus* deslocamento vertical entre os modelos numérico e experimental para o Painel 1.

Da observação dos diagramas da Figura 80 e da Figura 81, pode-se concluir que o conjunto de imperfeições que foram introduzidas nos modelos numéricos e que

mais assemelharam-se ao resultado experimental do Paine1 1, foi o de denominação $L/1000 - 0.005 \text{ s}$, ou seja, imperfeição global de $L/1000$ e local de 0.005 s .

Neste caso, a magnitude da carga última do modelo experimental do Paine1 1 foi de 941.1 kN , enquanto o respectivo modelo numérico apresentou carga última de 936.8 kN . Por outro lado, para o Paine1 2, a magnitude das cargas últimas experimental e numérica foi de 1043.2 kN e 1059.6 kN respectivamente, como pode ser observado na Figura 82.

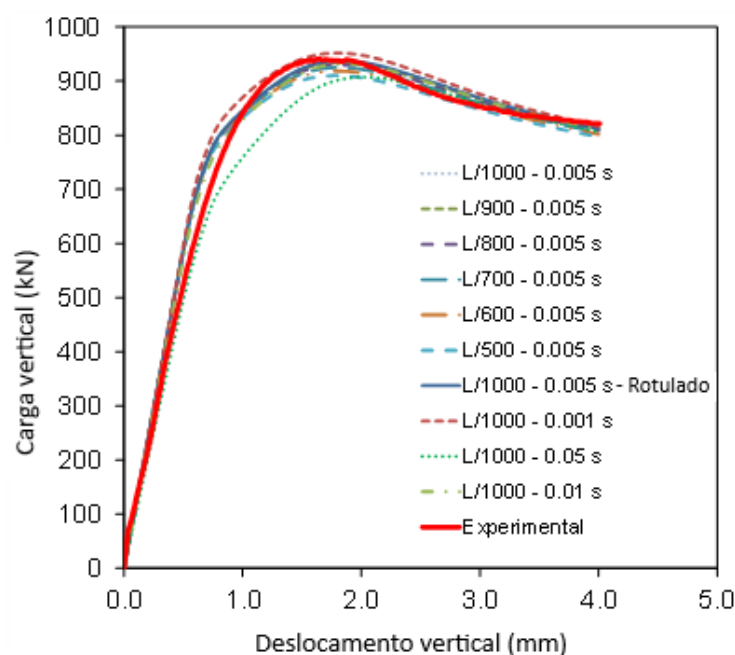


Figura 80 – Análise de sensibilidade das imperfeições geométricas iniciais – Paine1 1

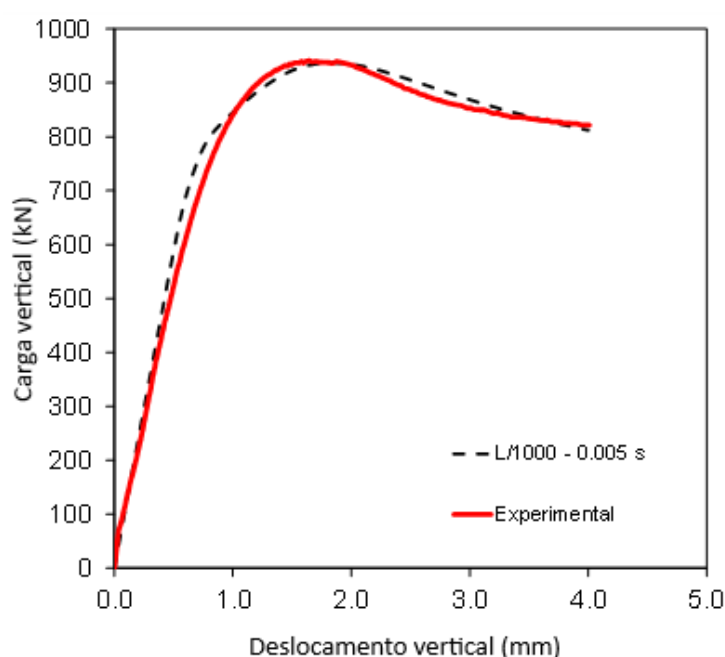


Figura 81 – Melhor modelo de imperfeições iniciais – Paine1 1

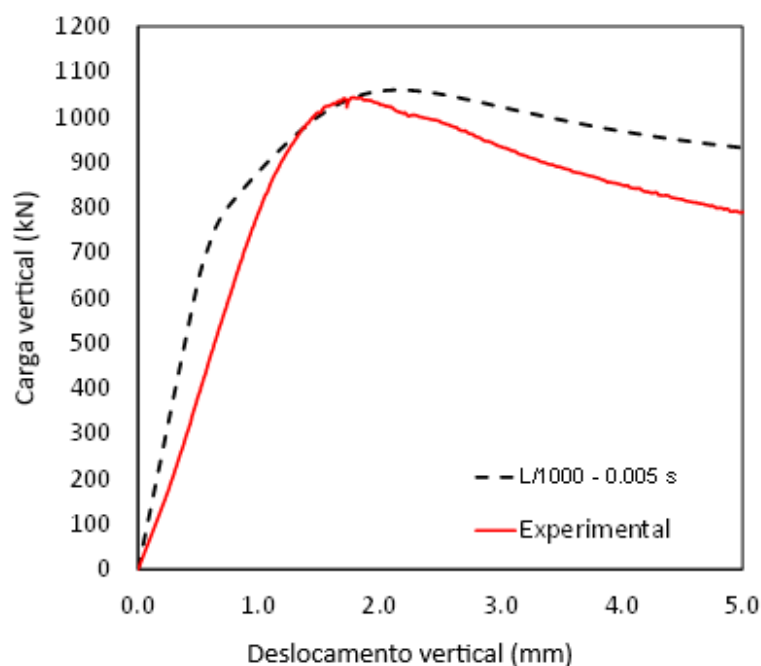


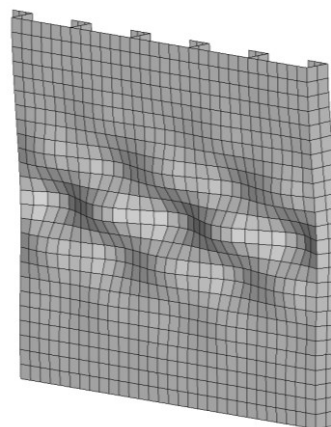
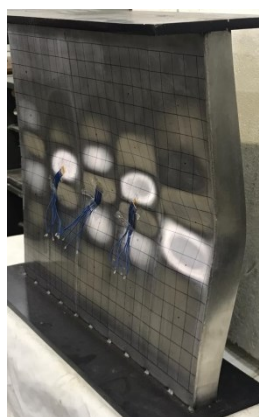
Figura 82 – Curvas carga vertical *versus* deslocamento vertical – Painel 2

Analisando a Figura 82, a rigidez inicial das curvas apresentou alguma diferença causada por pequenas rotações observadas na placa superior da prensa hidráulica. Contudo, quando se comparam as cargas últimas dos modelos experimental e numérico, uma boa concordância foi obtida. A Tabela 4 resume os resultados obtidos, apresentando a razão entre as cargas últimas numéricas e experimentais.

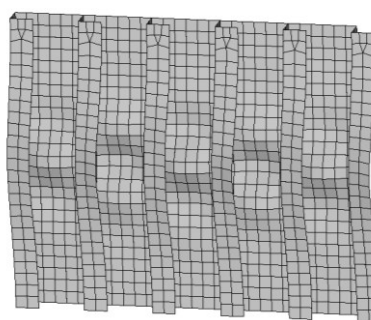
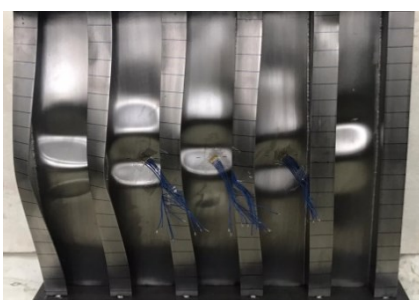
Tabela 4 – Comparação da carga última numérica x experimental

Painel enrijecido	Carga última experimental (kN)	Carga última numérica (kN)	$P_{u,num}/P_{u,exp}$
Painel 1	941.1	936.8	0.995
Painel 2	1043.2	1059.6	1.016

A Figura 83 e a Figura 84 exibem as deformadas experimentais e numéricas para os painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável apresentados neste trabalho. No que diz respeito às deformadas locais, os painéis apresentaram flambagem local das placas entre enrijecedores que precederam a flambagem global dos painéis enrijecidos. Pode ainda ser observado que os modelos numéricos foram capazes de reproduzir o comportamento dos modelos experimentais em termos de deformadas local e global.

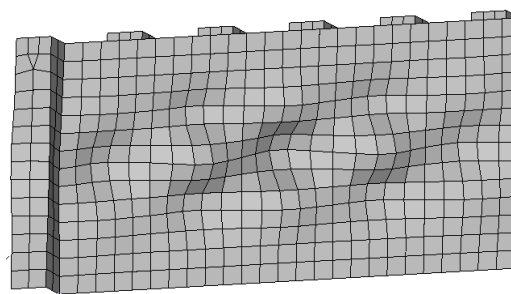
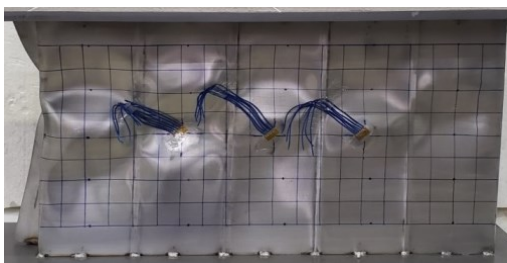


a) Vista posterior

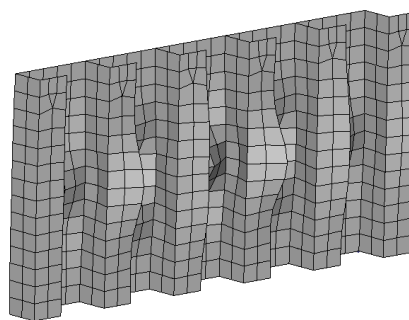


b) Vista frontal

Figura 83 – Deformadas experimental e numérica – Painel 1



a) Vista posterior



b) Vista frontal

Figura 84 – Deformadas experimental e numérica – Painel 2

Nesta parte do trabalho de pesquisa, os resultados experimentais apresentados na seção 4.4, são comparados aos respectivos resultados numéricos obtidos pelo método dos elementos finitos para o Painei 1 e para o Painei 2.

A Figura 85 e a Figura 86 exibem os diagramas carga *versus* deformação normal ϵ_x para os *strain gauges* destacados em vermelho e afixados nas faces frontal e posterior da placa entre enrijecedores e na alma de um enrijecedor do Painei 1, respectivamente. Pode ser observada grande concordância entre as cargas aplicadas e as deformações apresentadas pelos modelos experimental e numérico do Painei 1. Os *strain gauges* fizeram o registro das deformações até cerca de 20000 $\mu\epsilon$, quando atingiram seu limite de funcionamento.

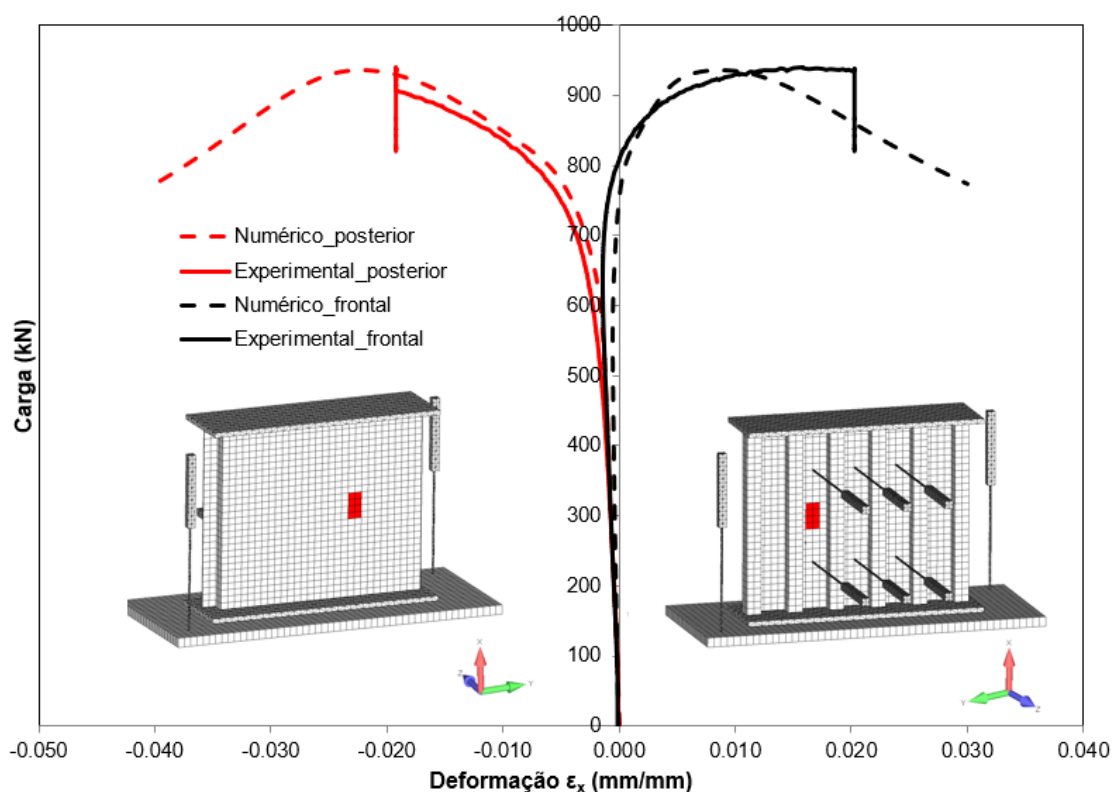


Figura 85 – Comparação carga *versus* deformação – Placa do Painei 1

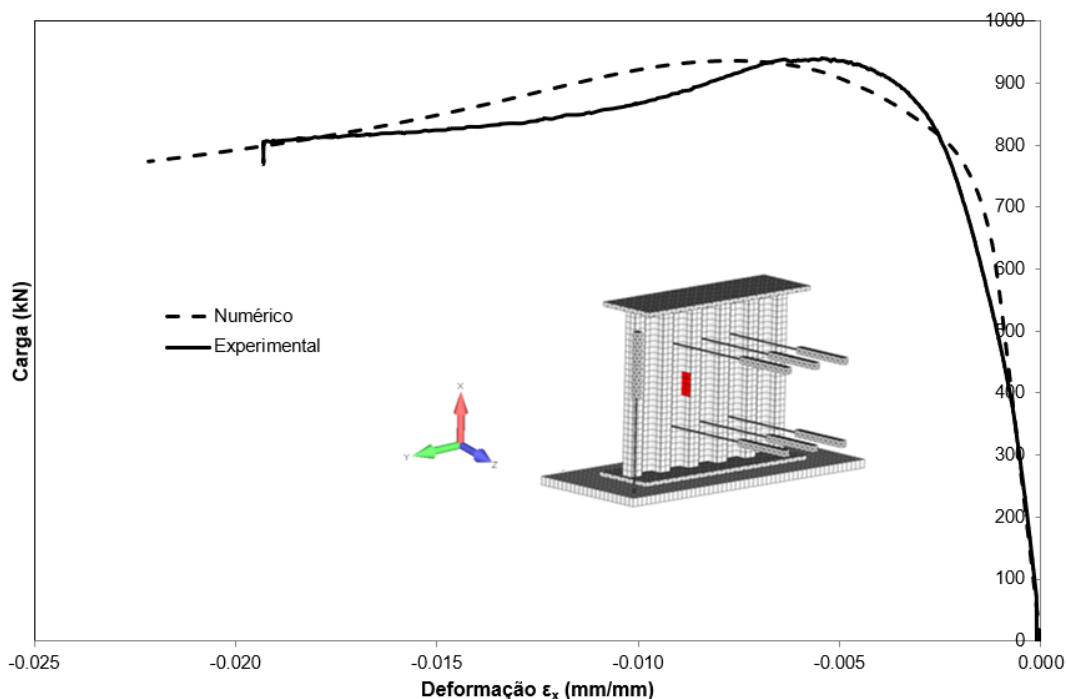


Figura 86 – Comparação carga *versus* deformação – Enrijecedor do Painel 1

A Figura 87 e a Figura 88 exibem os diagramas carga *versus* deslocamento na direção z, perpendicular ao plano da placa entre enrijecedores, para os LVDTs destacados em vermelho, superior e inferior do Painel 1, respectivamente. Pode ser observada grande concordância entre as cargas aplicadas e os deslocamentos apresentados pelos modelos experimental e numérico do Painel 1.

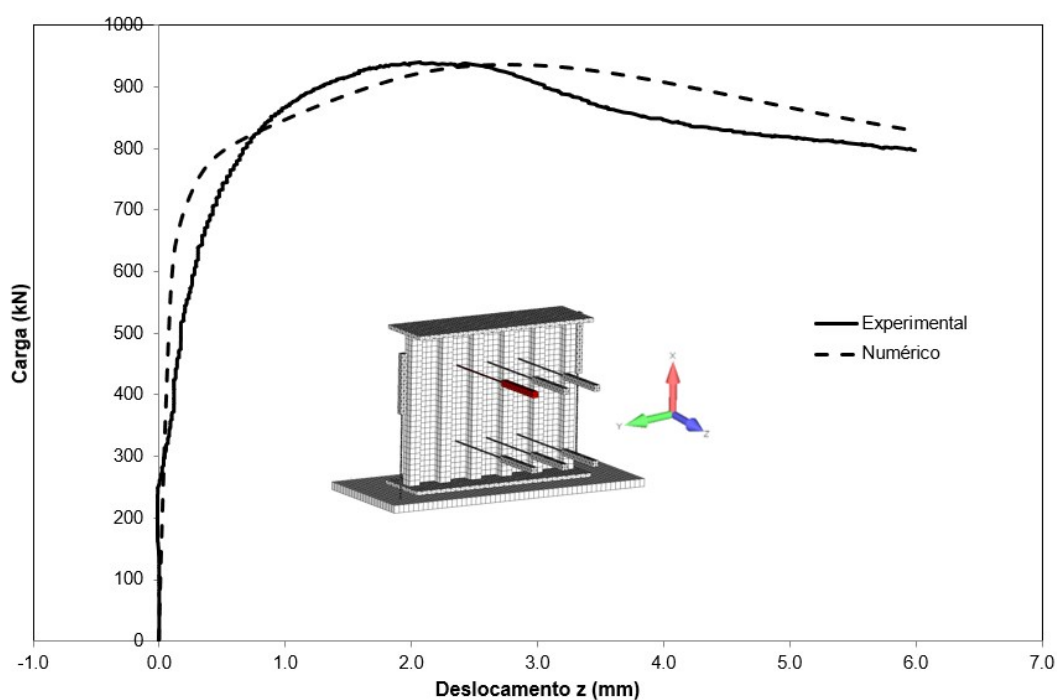


Figura 87 – Comparação carga *versus* deslocamento – LVDT superior - Painel 1

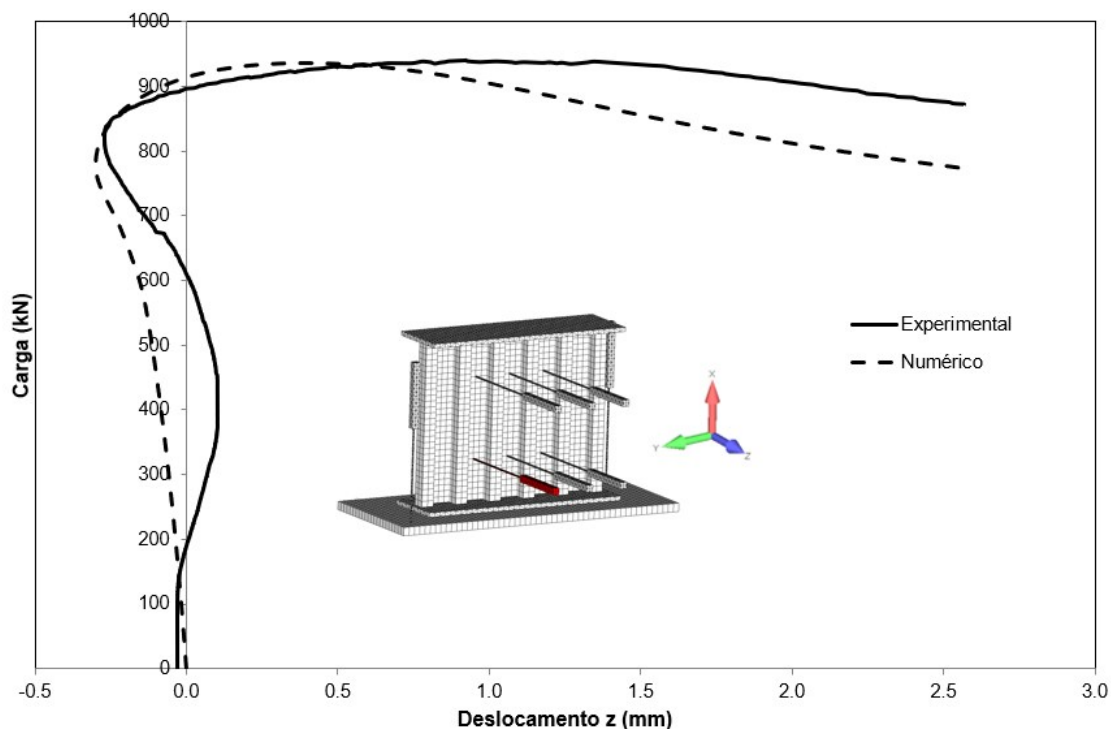


Figura 88 – Comparação carga *versus* deslocamento – LVDT inferior - Paine 1

A Figura 89 e a Figura 90 exibem os diagramas carga *versus* deformação normal ϵ_x para os *strain gauges* destacados em vermelho e afixados nas faces frontal e posterior da placa entre enrijecedores e na alma de um enrijecedor do Paine 2, respectivamente. Pode ser observada boa concordância entre as cargas aplicadas e as deformações apresentadas pelos modelos experimental e numérico do Paine 2.

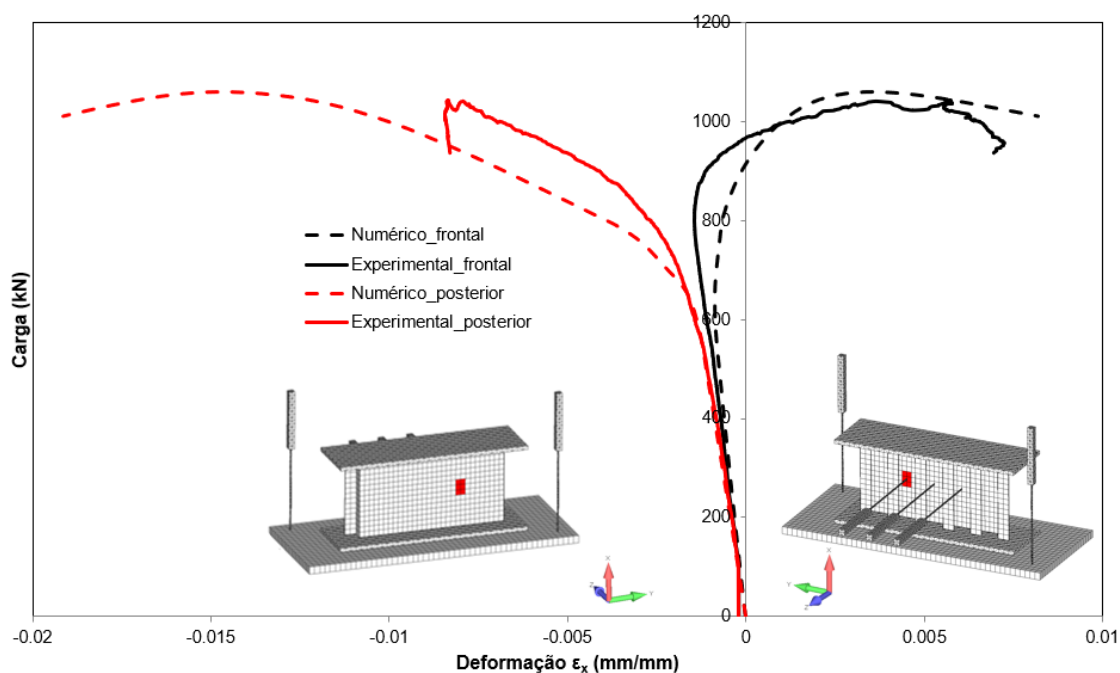


Figura 89 – Comparação carga *versus* deformação – Placa do Paine 2

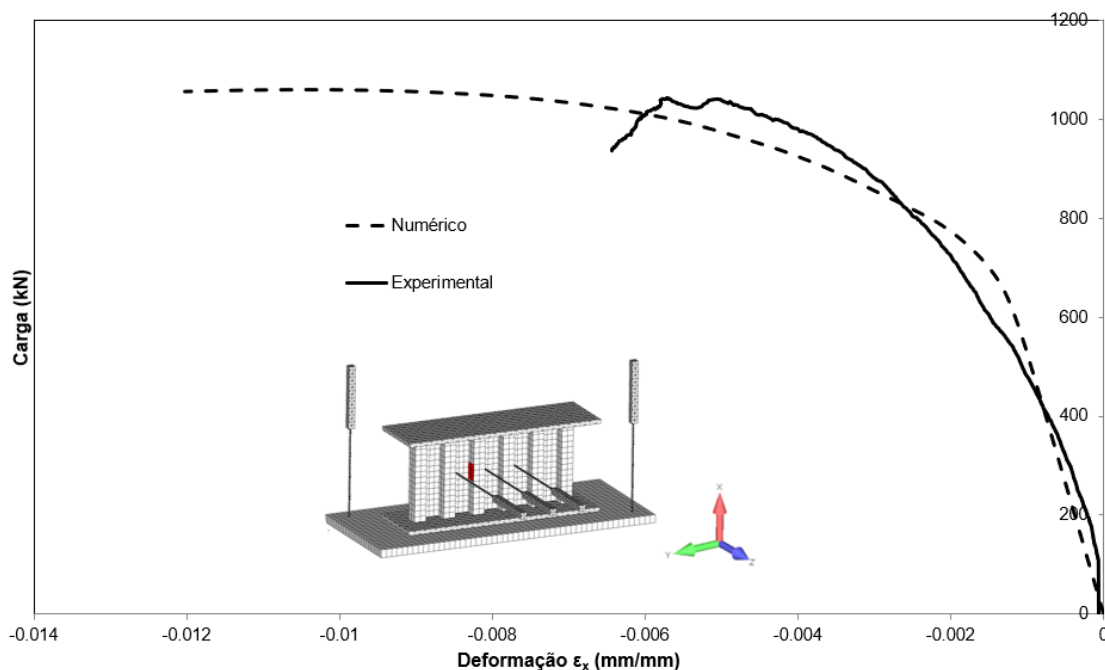


Figura 90 – Comparação carga *versus* deformação – Enrijecedor do Painel 2

A Figura 91 exibe os diagramas carga *versus* deslocamento na direção z, perpendicular ao plano da placa entre enrijecedores, para um LVDT destacado em vermelho, referente ao Painel 2. Pode ser observada boa concordância entre as cargas aplicadas e os deslocamentos apresentados pelos modelos experimental e numérico do Painel 2. Os diagramas experimental e numérico guardam paralelismo de forma entre si e apresentam-se defasados em cerca de 0.2 mm na região correspondente a uma carga aplicada de cerca de 800 kN. Vale ressaltar, que pequenas diferenças no campo de imperfeições iniciais, entre os modelos experimental e numérico, podem conduzir a diferentes deformadas, especialmente em modelos elaborados em escala reduzida.

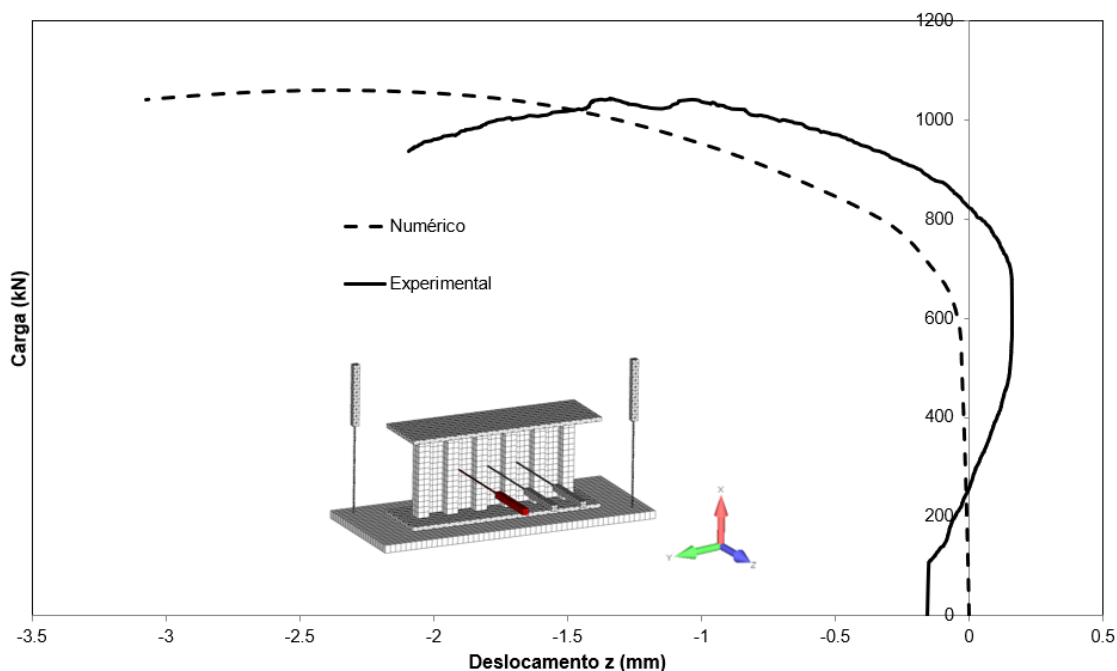


Figura 91 – Comparação carga *versus* deslocamento – LVDT - Painei 2

A Figura 92 e a Figura 93 apresentam o diagrama carga vertical *versus* deslocamento vertical na direção x, para os LVDTs destacados em vermelho, para o Painei 1 e o Painei 2, respectivamente. Pode ser observada boa concordância entre as cargas aplicadas e os deslocamentos apresentados pelos modelos experimental e numérico, tanto do Painei 1 quanto do Painei 2. Em relação ao Painei 2, o modelo numérico apresentou uma maior rigidez inicial quando comparada à rigidez do modelo experimental, principalmente até uma carga aplicada de cerca de 800.0 kN.

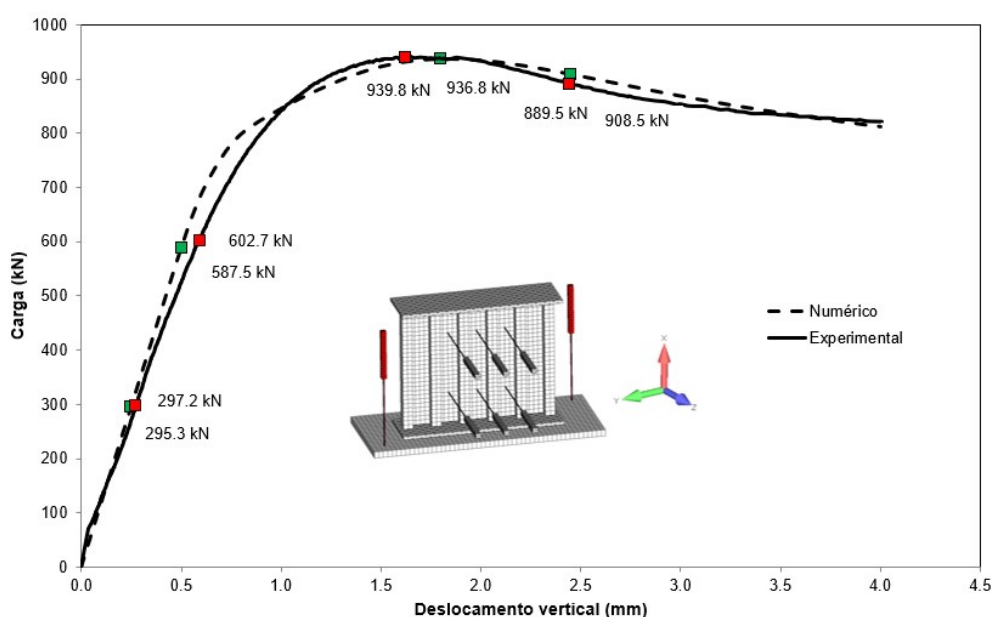


Figura 92 – Comparação carga *versus* deslocamento - Painei 1

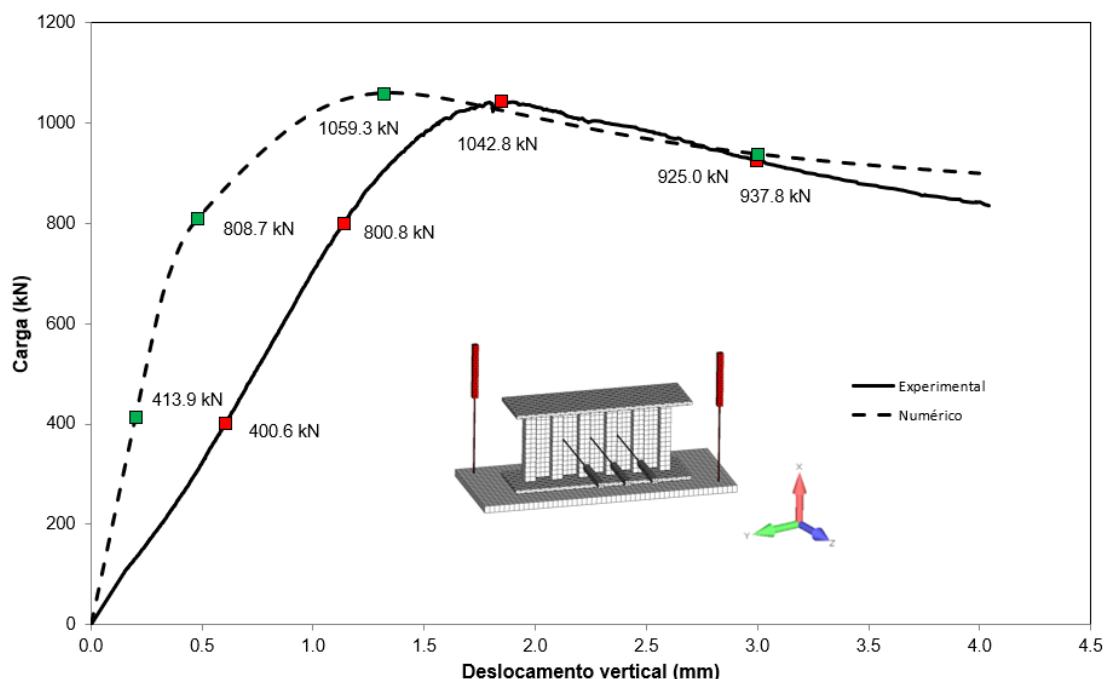


Figura 93 – Comparação carga *versus* deslocamento - Painel 2

A Figura 94 e a Figura 95 exibem a configuração deformada dos modelos numéricos para diferentes passos de carregamento aplicados ao Painel 1 e ao Painel 2, respectivamente. Para ambos os painéis, a exemplo do que ocorreu com os modelos experimentais (Figura 74 e Figura 75), observa-se a ocorrência de flambagem local das placas entre enrijecedores, evidenciada pelo aparecimento de meias-ondas, que precede a resistência última.

Os diagramas carga *versus* deslocamento da Figura 92 e da Figura 93 exibem um modo de falha por flexão, ou seja, não houve um decaimento brusco da resistência após o atingimento da carga última no Painel 1 e no Painel 2, respectivamente. A Figura 30, da fundamentação teórica apresentada no capítulo 3, corrobora esta conclusão. A visualização da Figura 74 e da Figura 75, para os modelos experimentais, e da Figura 94 com a Figura 95, para os modelos numéricos, também permite afirmar que o Painel 1 e o Painel 2 falharam por flexão, uma vez que até o instante de aplicação da carga última em cada painel, não houve flambagem local do flange ou da alma nem flambagem por flexo-torção dos enrijecedores do tipo cantoneira.

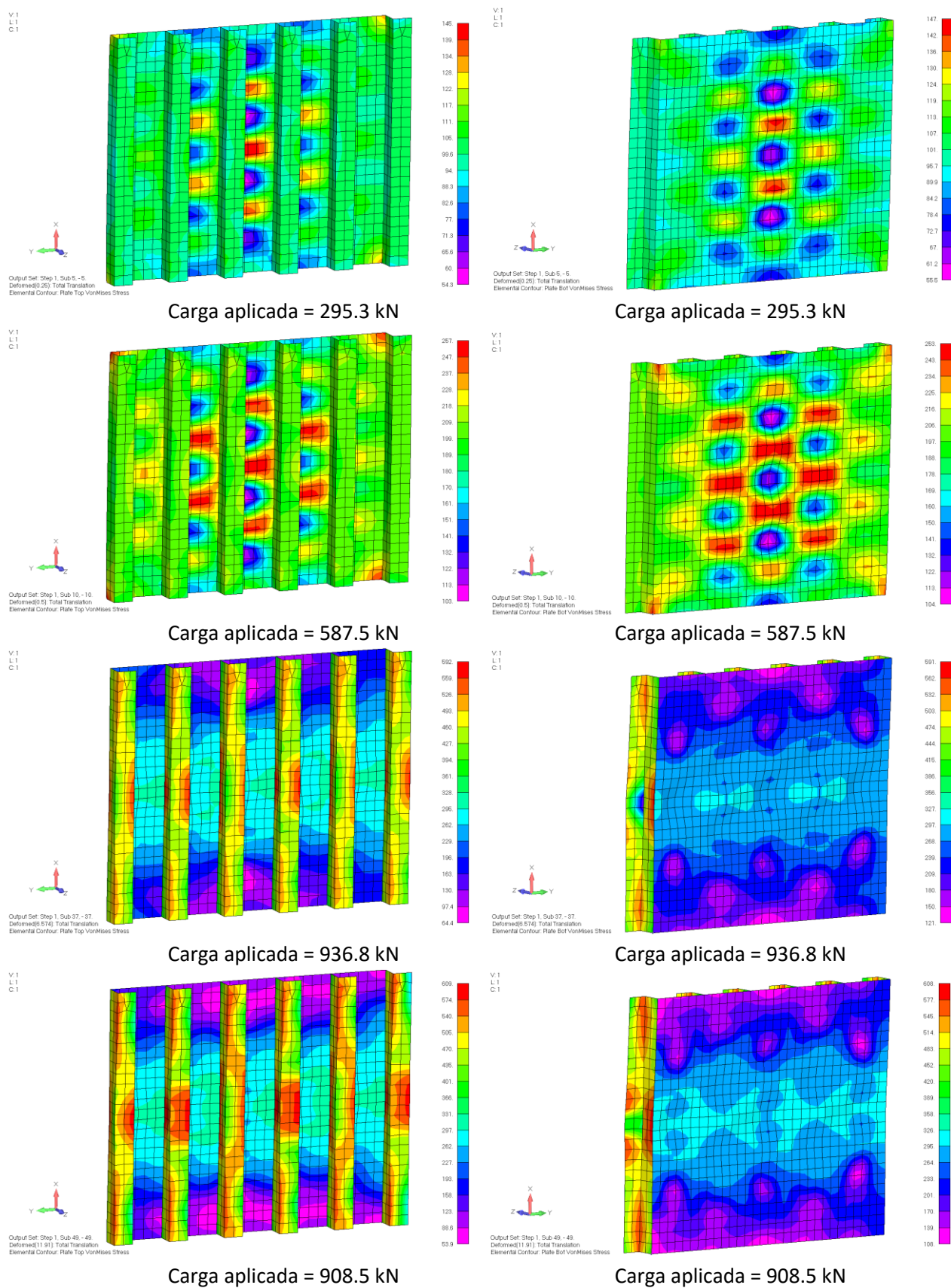


Figura 94 – Diferentes passos de carregamento – Numérico - Paine 1

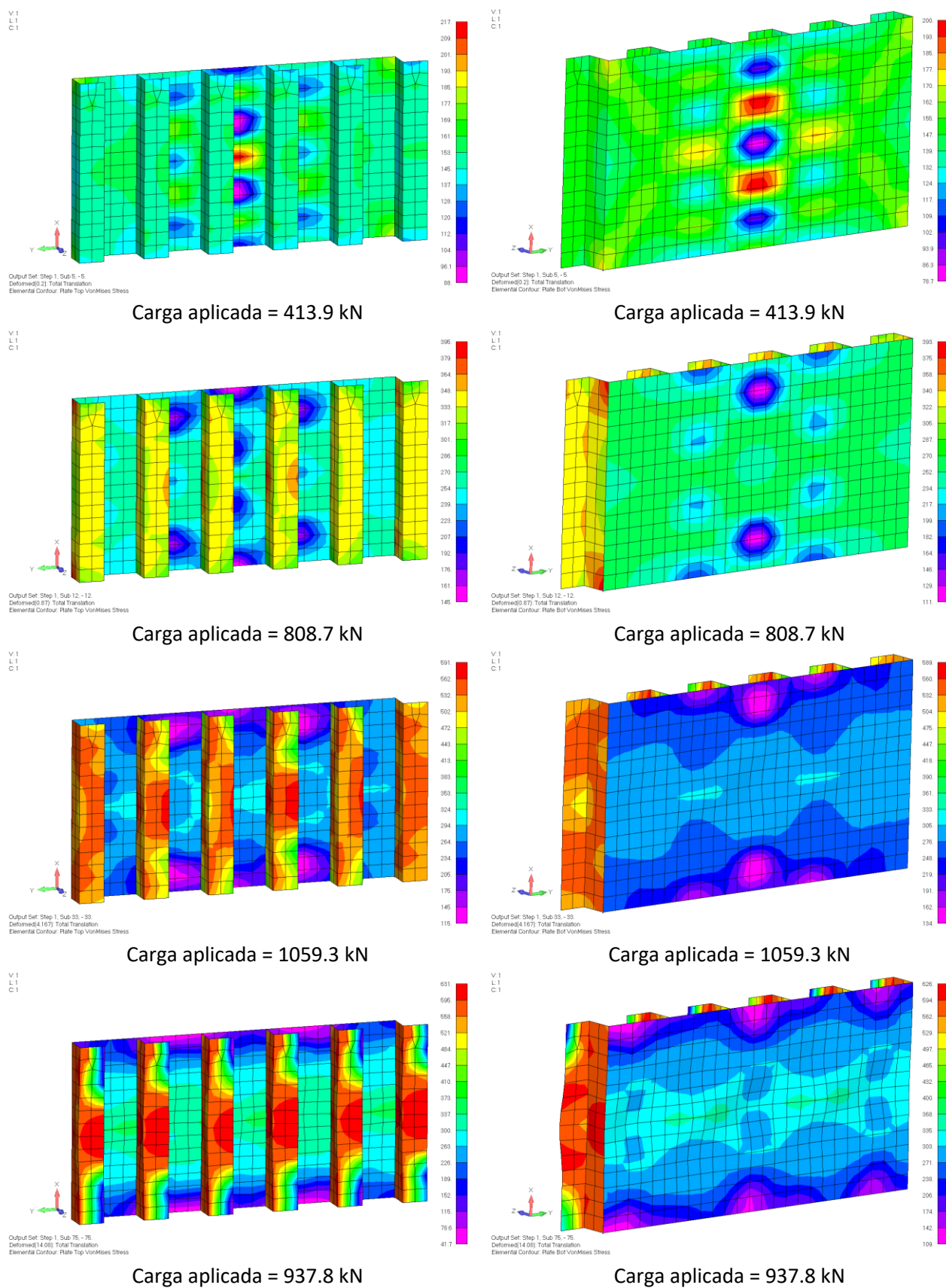


Figura 95 – Diferentes passos de carregamento – Numérico - Paine 2

De uma forma geral, a comparação entre os resultados experimentais apresentados neste capítulo com os respectivos modelos numéricos desenvolvidos, mostrou boa concordância em termos de deformações, deslocamentos e magnitude de carga última.

A calibração dos modelos numéricos, com o objetivo de se reproduzir os resultados experimentais observados, é uma tarefa de grande importância, uma vez que serve de subsídio para a realização de uma análise paramétrica extensa no estudo da resistência dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304. Tal análise paramétrica, é apresentada no capítulo 6 deste trabalho de pesquisa.

5. ANÁLISE PARAMÉTRICA

5.1. Considerações iniciais

Após a calibração dos modelos numéricos desenvolvidos, uma análise paramétrica foi conduzida para se investigar a influência das principais variáveis no comportamento estrutural dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável. As variáveis analisadas neste estudo foram:

- altura do painel enrijecido (l);
- largura do painel enrijecido (w);
- espessura das placas do painel enrijecido (t);
- espaçamento entre enrijecedores (s);
- número de enrijecedores (n);
- tipo de enrijecedor: cantoneira, perfil T e barra chata;
- razão de aspecto ($\alpha = l/s$);
- esbeltez da placa entre enrijecedores (s/t);
- razão largura/altura do painel enrijecido (w/l).

Os valores dos parâmetros utilizados nas análises foram escolhidos de acordo com as características geométricas mais recorrentes de painéis enrijecidos utilizados nas estruturas do tipo naval/*offshore* apresentadas na Tabela 2. Para todos os casos estudados, o material foi considerado o mesmo utilizado na calibração dos modelos numéricos de acordo com os testes de tração cujas curvas tensão-deformação estão exibidas na Figura 48 e na Figura 49 e resumidas na Tabela 3. As imperfeições geométricas locais e globais foram consideradas como sendo 0.005 s e $l/1000$, respectivamente. O Apêndice A exibe as características geométricas dos painéis enrijecidos estudados neste trabalho. Foram analisados 441 painéis enrijecidos cujas características estão resumidas na Tabela 5. No apêndice B estão detalhadas as propriedades geométricas dos enrijecedores dos painéis. Os painéis enrijecidos com cantoneira e perfil T foram projetados de tal forma que a flambagem local das placas entre enrijecedores precedesse a flambagem do conjunto placa-enrijecedor. Desta forma, o momento de inércia do conjunto placa-enrijecedor de cada painel deve ser

maior que o momento de inércia mínimo i_0 apresentado no Apêndice B. A definição do momento de inércia mínimo i_0 , bem como a forma de calculá-lo, está apresentada na norma ABS [1], sendo reproduzida a seguir:

$$i_0 = \frac{st^3}{12(1 - \nu^2)} \gamma_0 \quad (51)$$

Onde:

$$\gamma_0 = (2.6 + 4.0\delta)\alpha^2 + 12.4\alpha - 13.2\sqrt{\alpha};$$

$$\delta = A_s/(st);$$

$$\alpha = l/s - \text{Razão de aspecto};$$

l – Comprimento da placa entre enrijecedores;

s – Largura da placa entre enrijecedores;

t – Espessura da placa entre enrijecedores;

ν – Coeficiente de Poisson;

A_s – Área da seção transversal do enrijecedor, excluindo-se a placa associada.

Tabela 5 – Características dos painéis enrijecidos da análise paramétrica

Modelo	Razão de aspecto (α)	Espessura da placa (t) (mm)	Esbeltez (s/t)	Largura/altura do painel (w/l)	Tipo de enrijecedor	Número de enrijecedores (n)	Altura da alma (d_w) (mm)	Espessura da alma (t_w) (mm)	Largura do flange (b_f) (mm)	Espessura do flange (t_f) (mm)
1 - 21	2.0	19.0 - 50.0	20; 25; 30; 35; 40; 45; 50	2; 4; 6	Cantoneira	5; 9; 13	300	13	90	17
22 - 42	2.5	19.0 - 50.0			Cantoneira	6; 11; 16	300	13	110	17
43 - 63	3.0	17.0 - 37.5			Cantoneira	7; 13; 19	300	13	110	17
64 - 84	3.5	14.0 - 30.0			Cantoneira	8; 15; 22	300	13	110	17
85 - 105	4.0	13.0 - 30.0			Cantoneira	9; 17; 25	300	13	110	17
106 - 126	4.5	11.0 - 27.5			Cantoneira	10; 19; 28	300	13	110	17
127 - 147	5.5	9.0 - 20.0			Cantoneira	12; 23; 34	300	13	110	17
148 - 168	2.0	19.0 - 50.0			Tê	5; 9; 13	300	13	180	17
169 - 189	2.5	19.0 - 50.0			Tê	6; 11; 16	300	13	220	17
190 - 210	3.0	17.0 - 37.5			Tê	7; 13; 19	300	13	220	17
211 - 231	3.5	14.0 - 30.0			Tê	8; 15; 22	300	13	220	17
232 - 252	4.0	13.0 - 30.0			Tê	9; 17; 25	300	13	220	17
253 - 273	4.5	11.0 - 27.5			Tê	10; 19; 28	300	13	220	17
274 - 294	5.5	9.0 - 20.0			Tê	12; 23; 34	300	13	220	17
295 - 315	2.0	19.0 - 50.0			Barra chata	5; 9; 13	150	20	0	0
316 - 336	2.5	19.0 - 50.0			Barra chata	6; 11; 16	150	20	0	0
337 - 357	3.0	17.0 - 37.5			Barra chata	7; 13; 19	150	20	0	0
358 - 378	3.5	14.0 - 30.0			Barra chata	8; 15; 22	150	20	0	0
379 - 399	4.0	13.0 - 30.0			Barra chata	9; 17; 25	150	20	0	0
400 - 420	4.5	11.0 - 27.5			Barra chata	10; 19; 28	150	20	0	0
421 - 441	5.5	9.0 - 20.0			Barra chata	12; 23; 34	150	20	0	0

Os enrijecedores adotados na análise paramétrica atendem à verificação de flambagem local da mesa e da alma conforme as orientações do ABS [1], cujos limites

de esbeltez são mostrados pelas equações (52), (53) e (54), com a ajuda da Figura 96, a seguir:

Esbeltez máxima da mesa para prevenir flambagem local:

$$b_2/t_f \leq 0.4(E/\sigma_o)^{1/2} \quad (52)$$

Esbeltez máxima da alma para prevenir flambagem local (cantoneira e perfil T):

$$d_w/t_w \leq 1.5(E/\sigma_o)^{1/2} \quad (53)$$

Esbeltez máxima da alma para prevenir flambagem local (barra chata):

$$d_w/t_w \leq 0.4(E/\sigma_o)^{1/2} \quad (54)$$

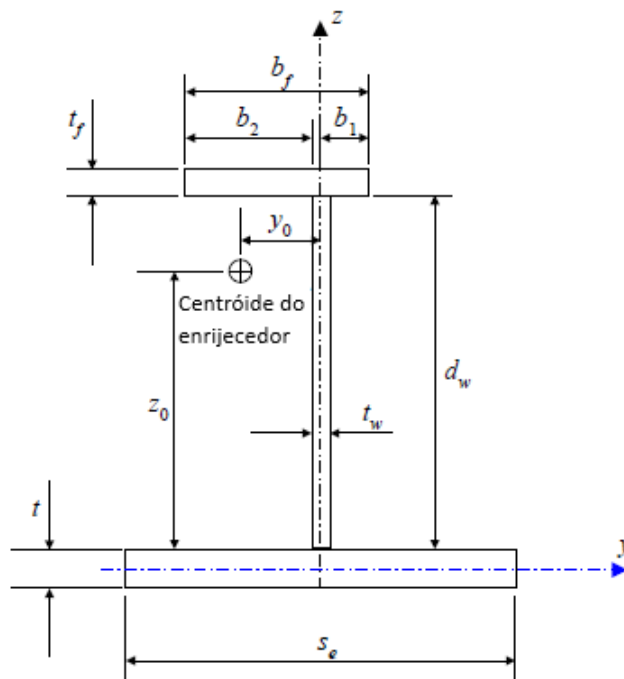


Figura 96 – Geometria detalhada do enrijecedor [1]

Onde:

b_2 – Maior largura do flange em balanço do enrijecedor;

t_f – Espessura do flange do enrijecedor;

d_w – Altura da alma do enrijecedor;

t_w – Espessura da alma do enrijecedor;

E – Módulo de elasticidade;

σ_0 – Tensão de escoamento para o aço carbono ou tensão $\sigma_{0.2\%}$ para o aço inoxidável.

Três tipos de enrijecedores foram utilizados na análise paramétrica dos painéis com material em aço inoxidável austenítico 304: cantoneira, perfil T e barra chata. A Figura 97, a Figura 98 e a Figura 99, apresentam os tipos de enrijecedores estudados.

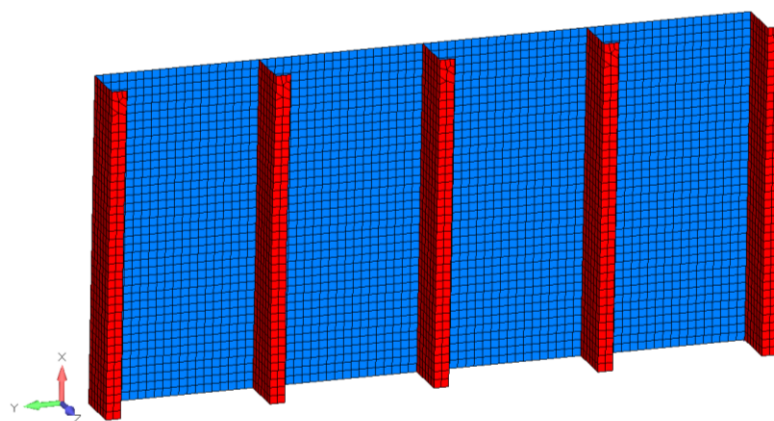


Figura 97 – Pannel com enrijecedor em cantoneira

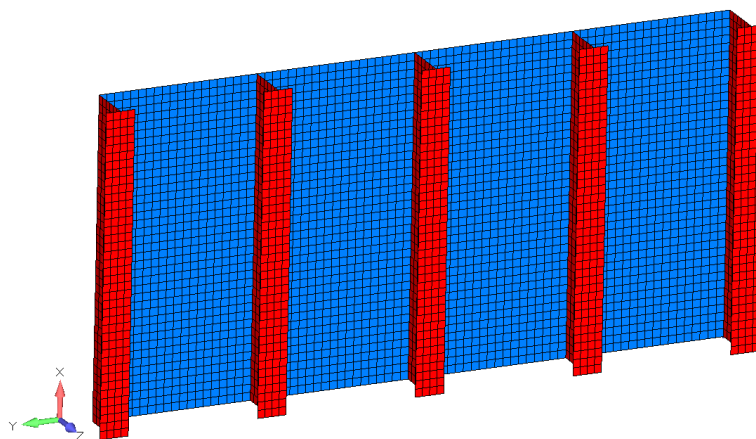


Figura 98 – Pannel com enrijecedor em perfil T

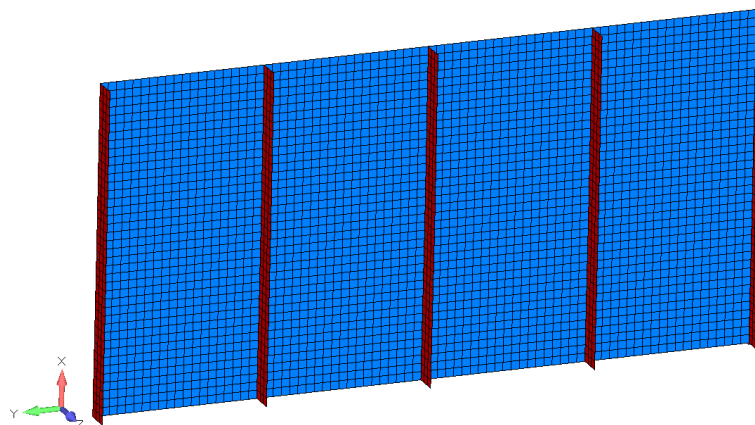


Figura 99 – Painel com enrijecedor em barra chata

5.2. Discussão dos resultados

Nesta seção, são exibidos e comentados os resultados obtidos na análise paramétrica dos painéis enrijecidos, com material em aço inoxidável austenítico 304. Os resultados estão agrupados por tipo de enrijecedor e também pelo parâmetro de esbeltez β , definido conforme a equação (34). Para tanto, dois conjuntos de resultados foram selecionados, correspondendo aos painéis dos modelos numéricos:

- 1, 148 e 295 para parâmetro de esbeltez $\beta < 0.94$;
- 19, 166 e 313 para parâmetro de esbeltez $\beta > 0.94$.

As características geométricas destes painéis podem ser consultadas no Apêndice A e no Apêndice B deste trabalho. Para estes modelos, as curvas carga vertical *versus* deslocamento vertical estão exibidas na Figura 100 e na Figura 101, para valores do parâmetro de esbeltez β menor e maior do que 0.94, respectivamente. A separação dos resultados em função do valor do parâmetro de esbeltez $\beta = 0.94$, será explicada adiante nesta seção, mas está relacionada ao modo de falha dos painéis enrijecidos estudados neste trabalho: plastificação ou flambagem do conjunto placa-enrijecedor.

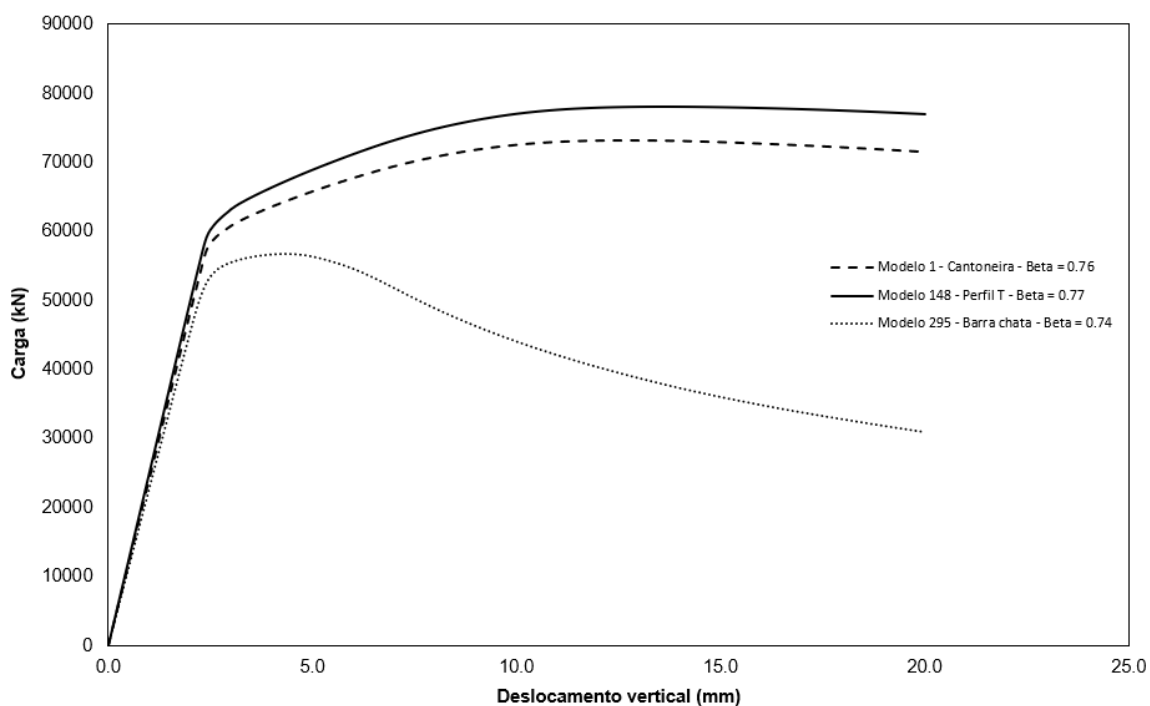


Figura 100 – Curvas carga vertical *versus* deslocamento vertical – $\beta < 0.94$

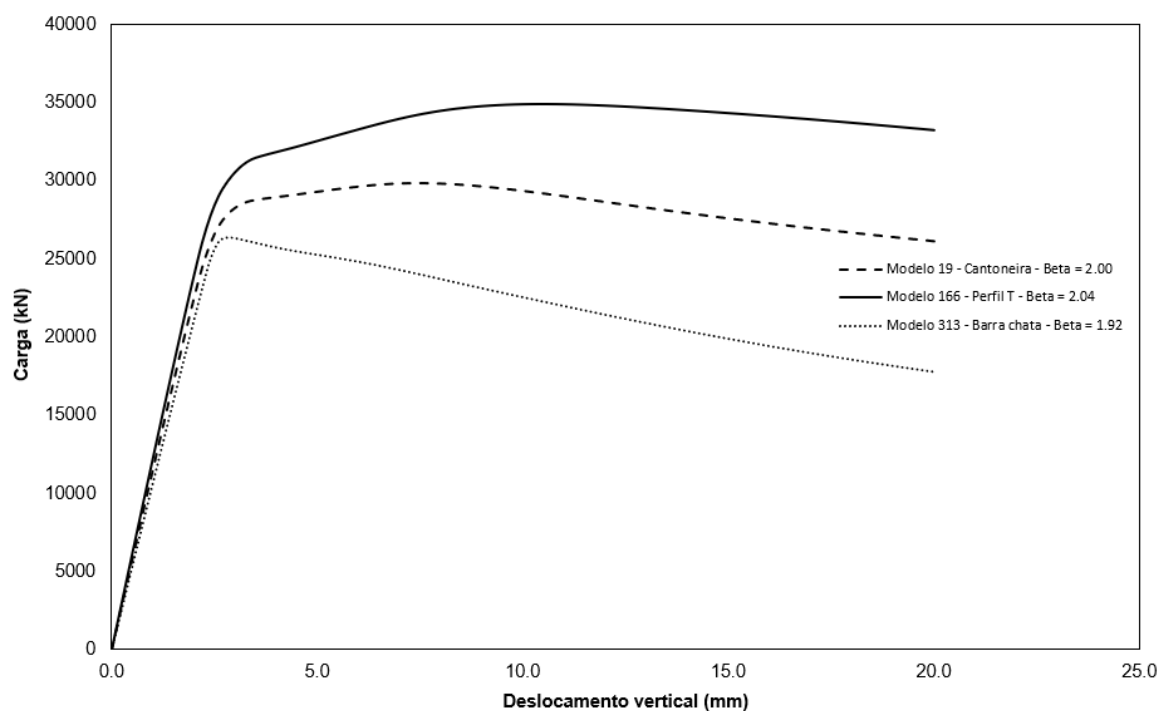


Figura 101 – Curvas carga vertical *versus* deslocamento vertical – $\beta > 0.94$

Pela observação da Figura 100, pode-se concluir que o Modelo 1, enrijecido com cantoneira, e o Modelo 148, enrijecido com perfil T, alcançam a carga máxima de 73230.4 kN e 77983.4 kN, respectivamente. Para o Modelo 295, enrijecido com barra chata, a carga máxima obtida foi de 56674.1 kN. Vale observar, a diferença de forma

para o diagrama carga *versus* deslocamento vertical: para os modelos enrijecidos com cantoneira e perfil T, não se observa diminuição abrupta da resistência após a carga última, enquanto para o modelo enrijecido com barra chata, houve um decréscimo acentuado de resistência. A diferença de magnitude da carga última dos modelos, pode ser explicada pela respectiva inércia do conjunto placa-enrijecedor exibida na Tabela 6. O Modelo 1 e o Modelo 148 apresentam uma inércia (i) do conjunto placa-enrijecedor maior do que a inércia mínima (i_0) preconizada pelo ABS [1], conforme a equação (51). Contudo, para o Modelo 295, a condição de inércia mínima não é satisfeita, fazendo com que o painel enrijecido com barra chata, falhe de forma precoce em relação aos painéis enrijecidos com cantoneira e perfil T. O não atendimento à condição de inércia mínima (i_0), por parte do Modelo 295, implica em baixa rigidez à flexão do conjunto placa-enrijecedor, e portanto, na possibilidade da flambagem do enrijecedor preceder à flambagem da placa entre enrijecedores. Finalmente, analisando-se a Tabela 6, pode-se concluir que a magnitude da carga última de cada modelo está coerente com a respectiva inércia apresentada pelo conjunto placa-enrijecedor.

Tabela 6 – Parâmetros dos painéis enrijecidos – $\beta < 0.94$

Modelo	Momento de inércia (i) (cm^4)	Momento de inércia mínimo i_0 (cm^4)	Parâmetro de esbeltez β	i_0/i	P_u (kN)
1	30364.5	20913.4	0.76	0.69	73230.4
148	44860.1	21473.9	0.77	0.48	77983.4
295	4434.4	20023.3	0.74	4.52	56674.1

Pela observação da Figura 101, pode-se concluir que o Modelo 19, enrijecido com cantoneira, e o Modelo 166, enrijecido com perfil T, alcançam a carga máxima de 29871.9 kN e 34903.7 kN, respectivamente. Para o Modelo 313, enrijecido com barra chata, a carga máxima obtida foi de 26327.9 kN. Os diagramas carga *versus* deslocamento vertical apresentaram similaridade de forma entre si. A diferença de magnitude da carga última dos modelos, pode ser explicada pela respectiva inércia do conjunto placa-enrijecedor exibida na Tabela 7. Todos os modelos apresentam uma inércia (i) do conjunto placa-enrijecedor maior do que a inércia mínima (i_0) preconizada pelo ABS [1], conforme a equação (51). Finalmente, analisando-se a

Tabela 7, pode-se concluir que a magnitude da carga última de cada modelo está coerente com a respectiva inércia apresentada pelo conjunto placa-enrijecedor.

Tabela 7 – Parâmetros dos painéis enrijecidos – $\beta > 0.94$

Modelo	Momento de inércia (i) (cm ⁴)	Momento de inércia mínimo i_0 (cm ⁴)	Parâmetro de esbeltez β	i_0/i	P_u (kN)
19	24544.9	2158.3	2.00	0.09	29871.9
166	36102.8	2266.8	2.04	0.06	34903.7
313	2634.2	1986.0	1.92	0.75	26327.9

A Figura 102 e a Figura 103, exibem a distribuição da tensão de von Mises, na carga máxima, para os modelos com valores do parâmetro de esbeltez β menor e maior do que 0.94, respectivamente. Os modos de falha verificados estão também apresentados e a distribuição da tensão de von Mises está plotada, exibindo em vermelho as regiões com tensão superior a 259.9 MPa. Este valor corresponde à tensão $\sigma_{0.2\%}$ da placa do painel enrijecido (ver Tabela 3).

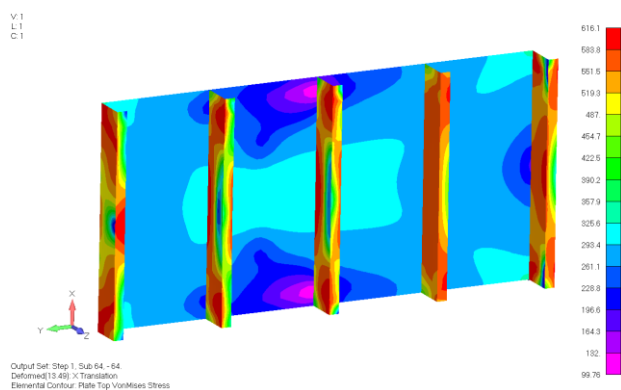
Pela observação dos modelos exibidos na Figura 102, pode-se concluir que a falha dos painéis enrijecidos com cantoneira e perfil T, deu-se por plastificação de uma vasta região da placa entre enrijecedores. Em contraste, o modo de falha da placa enrijecida com barra chata, está associado à flambagem local das placas entre enrijecedores e à flambagem por flexo-torção dos enrijecedores, que pode ser explicado pela falta de rigidez mínima à flexão do conjunto placa-enrijecedor.

No caso da Figura 103, todos os painéis falharam por flambagem do conjunto placa-enrijecedor. Podem ser observadas regiões com plastificação local e também a formação de meias-ondas nas placas entre enrijecedores, evidenciando flambagem. Os enrijecedores apresentam elevada flexo-torção, acompanhando a flambagem das placas entre enrijecedores.

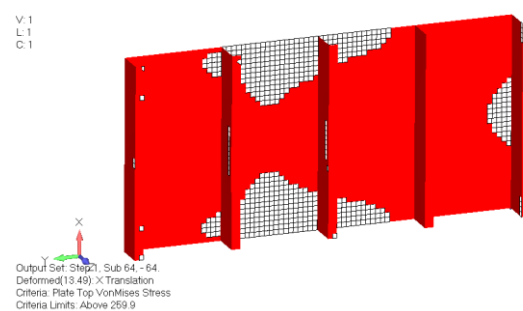
Após a observação dos resultados obtidos pela análise paramétrica realizada neste trabalho, foram identificados dois limites que ajudam a classificar os modos de falha encontrados para os painéis enrijecidos submetidos à compressão: a relação $i_0/i \leq 1.0$ e o parâmetro de esbeltez $\beta \leq 0.94$. Desta forma, se ambos os limites forem atendidos, a falha do painel enrijecido dar-se-á por plastificação do conjunto placa-enrijecedor. Por outro lado, se um ou ambos os limites da relação i_0/i e do parâmetro

de esbeltez β não forem verificados, a falha do painel enrijecido dar-se-á por flambagem do conjunto placa-enrijecedor.

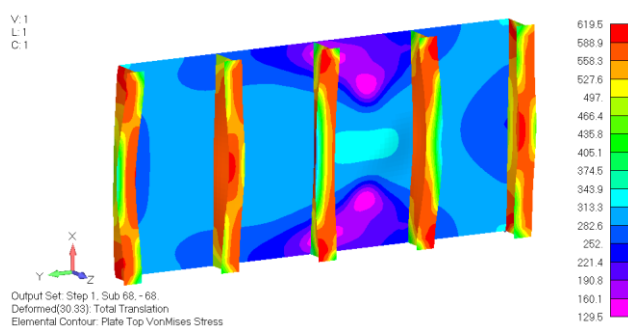
Painéis com parâmetro de esbeltez $\beta < 0.94$



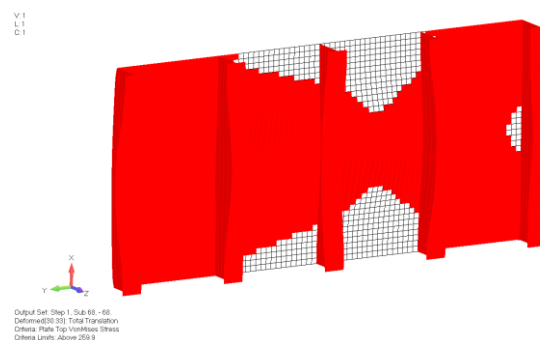
Modelo 1 – Cantoneira - $\beta = 0.76$
Tensão de von Mises (MPa)



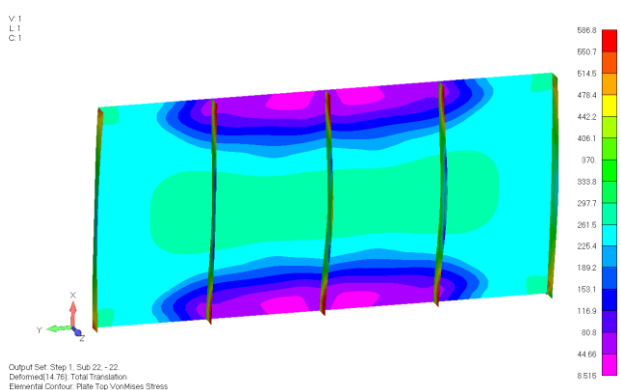
Modelo 1 – Cantoneira - $\beta = 0.76$
Plastificação do conjunto placa-enrijecedor



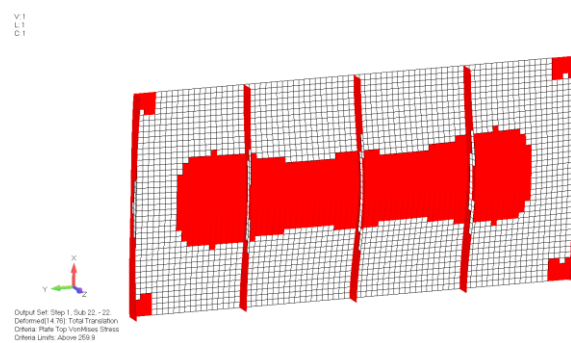
Modelo 148 – Perfil T - $\beta = 0.77$
Tensão de von Mises (MPa)



Modelo 148 – Perfil T - $\beta = 0.77$
Plastificação do conjunto placa-enrijecedor



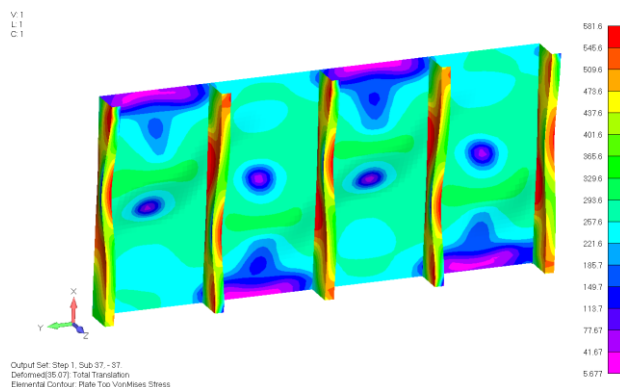
Modelo 295 – Barra chata - $\beta = 0.74$
Tensão de von Mises (MPa)



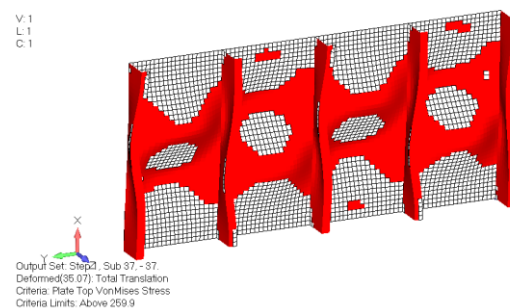
Modelo 295 – Barra chata - $\beta = 0.74$
Flambagem do conjunto placa-enrijecedor

Figura 102 – Distribuição de tensões de von Mises (MPa) – $\beta < 0.94$

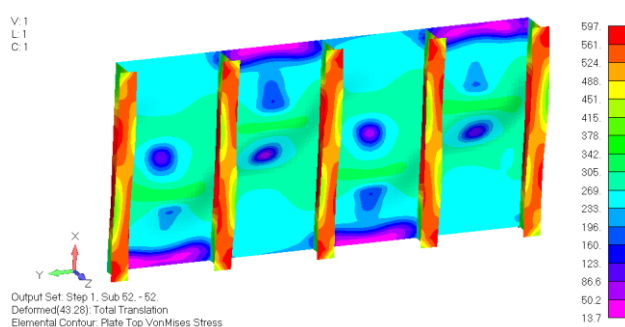
Painéis com parâmetro de esbeltez $\beta > 0.94$



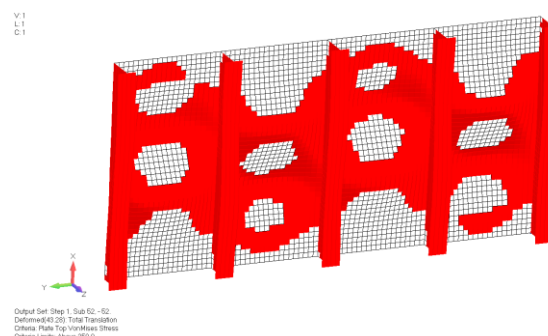
Modelo 19 – Cantoneira - $\beta = 2.00$
Tensão de von Mises (MPa)



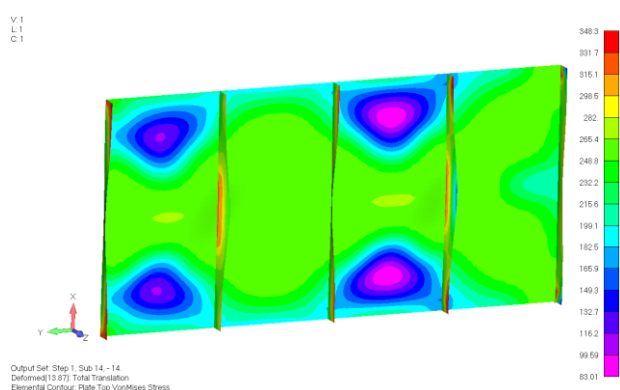
Modelo 19 – Cantoneira - $\beta = 2.00$
Flambagem do conjunto placa-enrijecedor



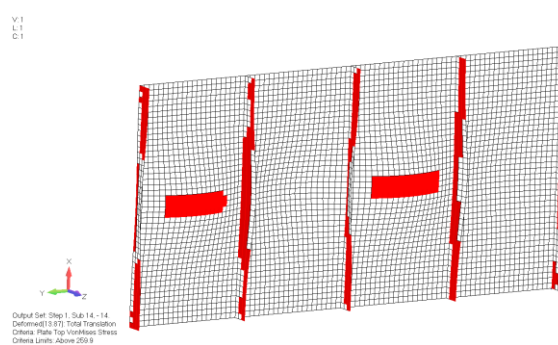
Modelo 166 – Perfil T - $\beta = 2.04$
Tensão de von Mises (MPa)



Modelo 166 – Perfil T - $\beta = 2.04$
Flambagem do conjunto placa-enrijecedor



Modelo 313 – Barra chata - $\beta = 1.92$
Tensão de von Mises (MPa)



Modelo 313 – Barra chata - $\beta = 1.92$
Flambagem do conjunto placa-enrijecedor

Figura 103 – Distribuição de tensões de von Mises (MPa) – $\beta > 0.94$

A Figura 104 exibe as regiões para a classificação dos modos de falha dos painéis enrijecidos, onde:

- PPE – plastificação do conjunto placa-enrijecedor;
- FPE – flambagem do conjunto placa-enrijecedor.

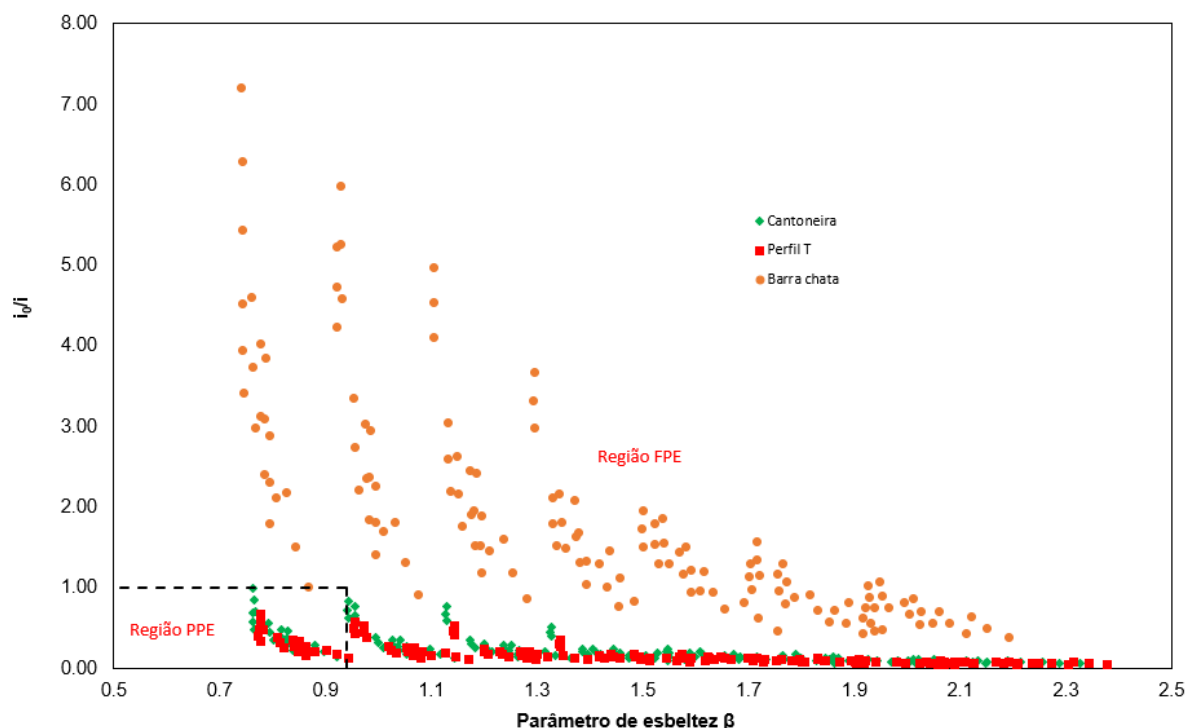


Figura 104 – Classificação dos modos de falha dos painéis enrijecidos

Cabe ressaltar, que o momento de inércia mínimo i_0 preconizado pelo ABS [1], conforme a equação (51), é um parâmetro que foi concebido originalmente para os painéis enrijecidos fabricados em aço carbono. Contudo, foi utilizado neste trabalho como um ponto de partida para o cálculo da inércia mínima do conjunto placa-enrijecedor dos painéis fabricados em aço inoxidável austenítico 304. Certamente, um estudo detalhado e específico da inércia mínima i_0 , dedicado aos painéis fabricados em aço inoxidável, deve ser objeto de pesquisa futura por parte de outros autores.

O Apêndice C exibe os modos de falha para cada um dos 441 modelos de painéis enrijecidos estudados na análise paramétrica realizada neste trabalho, segundo os limites definidos pela relação $i_0/i \leq 1.0$ e do parâmetro de esbeltez $\beta \leq 0.94$.

5.3. Verificações de projeto

Nesta seção, são realizadas as verificações de projeto de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico, conforme as recomendações do ABS [1]. Cabe ressaltar, que tal procedimento foi elaborado para a verificação de painéis enrijecidos fabricados em aço carbono. Desta forma, a verificação utilizando-se o procedimento adotado para os painéis em aço carbono irá esclarecer se tais recomendações aplicam-se ao projeto e dimensionamento de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável. Para tanto, dois painéis enrijecidos foram escolhidos: Painel 1 e Painel 19. As características geométricas destes painéis podem ser consultadas no Apêndice A e no Apêndice B deste trabalho.

No Apêndice G, está realizada, a título de ilustração, a verificação da resistência última da placa 6.1.1 do Modelo 19 deste trabalho, conforme as recomendações do ABS [1]. A equação (27) é resolvida de forma manual e todos os parâmetros para o seu cálculo são apresentados de maneira explícita.

Após a realização das análises estruturais, as tensões normais na direção x e na direção y, assim como as tensões cisalhantes em cada placa, foram extraídas para o passo de carga correspondente à carga última suportada pelo painel enrijecido, como pode ser observado na Tabela 8 e na Tabela 9, para o Painel 1 e o Painel 19, respectivamente.

Tabela 8 – Verificações de projeto das placas individuais – Painel 1

Placa	Comprimento da placa (mm)	Largura da placa (mm)	Espessura da placa (mm)	Tensão normal na direção x (MPa)	Tensão normal na direção y (MPa)	Tensão cisalhante xy (MPa)	Tensão de von Mises (MPa)	Verificação da equação (27)
6..Seção Z 6 (Z = 0)	2000.00	1000.00	50.00	-304.95	-78.44	16.46	275.75	1.39
1..Placa 6.2.1 (X = 1000; Y= 1500)	2000.00	1000.00	50.00	-304.95	-78.44	16.46	275.75	1.39
1..Placa 6.1.1 (X = 1000; Y= 500)	2000.00	1000.00	50.00	-290.11	-38.36	28.59	277.42	1.28
1..Placa 6.4.1 (X = 1000; Y= 3500)	2000.00	1000.00	50.00	-288.19	-32.95	24.70	276.54	1.26
1..Placa 6.3.1 (X = 1000; Y= 2500)	2000.00	1000.00	50.00	-267.88	-63.65	19.59	244.77	1.08

Tabela 9 – Verificações de projeto das placas individuais – Painel 19

Placa	Comprimento da placa (mm)	Largura da placa (mm)	Espessura da placa (mm)	Tensão normal na direção x (MPa)	Tensão normal na direção y (MPa)	Tensão cisalhante xy (MPa)	Tensão de von Mises (MPa)	Verificação da equação (27)
6..Seção Z 6 (Z = 0)	2200.00	1100.00	22.00	-133.46	-8.49	13.33	131.47	0.36
1..Placa 6.1.1 (X = 1100; Y= 550)	2200.00	1100.00	22.00	-133.46	-8.49	13.33	131.47	0.36
1..Placa 6.4.1 (X = 1100; Y= 3850)	2200.00	1100.00	22.00	-132.66	-7.81	14.02	131.20	0.36
1..Placa 6.3.1 (X = 1100; Y= 2750)	2200.00	1100.00	22.00	-131.80	-9.61	13.47	129.39	0.35
1..Placa 6.2.1 (X = 1100; Y= 1650)	2200.00	1100.00	22.00	-131.57	-9.78	13.49	129.10	0.35

De posse da magnitude das tensões atuantes em cada placa, foi feita a verificação da equação (27) [1]. Os parâmetros σ_{Ux} , σ_{Uy} e τ_U foram calculados com as informações de geometria e material do Painel 1 e do Painel 19, conforme a metodologia do ABS [1]. Na Figura 105, estão exibidos os resultados da verificação da equação (27) para cada placa do Modelo 1 e do Modelo 19. Cada cor em uma determinada placa corresponde ao resultado da verificação da equação (27). Por exemplo, para o Painel 1, a primeira placa identificada como 6.1.1 na Tabela 8, exibiu como resultado da verificação da equação (27) o valor de 1.28 (em verde), indicando a falha desta placa. Conforme mencionado anteriormente, a falha da placa 6.1.1 do Painel 1 deu-se por plastificação das placas entre enrijecedores, conforme pode ser visto na Figura 102. Por outro lado, para o Painel 19, todas as placas individuais apresentaram resultado da verificação da equação (27) menor do que a unidade. No caso do Painel 19, a falha foi caracterizada por flambagem local das placas entre enrijecedores e flambagem por flexo-torção dos enrijecedores, conforme exibido na Figura 103.

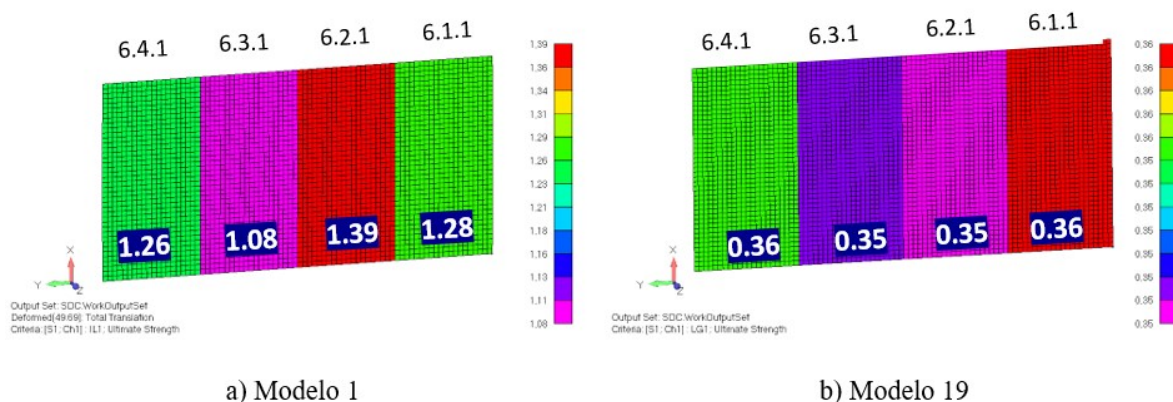


Figura 105 – Interpretação gráfica da equação (27) – Fator de utilização conforme ABS [1]

Pela observação dos resultados apresentados na Tabela 8 e na Tabela 9, pode ser concluído que a previsão da falha dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável utilizando-se as recomendações do ABS [1], que foram desenvolvidas para aço carbono, não apresentou resultados precisos. Se a metodologia do ABS [1] fosse capaz de prever de maneira satisfatória a falha dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304, o resultado da verificação da equação (27) para o estado de tensões correspondente à carga última atuante nos painéis, seria próximo da unidade. De fato, a aplicação das recomendações do ABS [1] conduziu a resultados conservativos para painéis em aço inoxidável com baixo parâmetro de esbeltez β (Modelo 1) e resultados não conservativos para painéis em aço inoxidável com esbeltez elevada (Modelo 19).

A aplicação das recomendações do ABS [1] (equação (27)) na previsão da falha de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável deveria apresentar resultados próximos da unidade uma vez que o máximo fator de utilização de resistência admissível η foi adotado igual a unidade. Portanto, não houve aplicação de fator de segurança nas verificações de projeto para investigar se a formulação da equação (27) do ABS [1] seria capaz de prever de forma razoável a resistência última das placas dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304 sob estado de tensões combinadas.

Uma vez que as recomendações do ABS [1] não foram capazes de prever de forma adequada a falha dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável, alguns ajustes foram propostos para a equação (27) de forma a se obter uma melhor resposta na previsão da resistência última de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304. Desta forma, uma nova curva C_x versus parâmetro de esbeltez β , foi construída a partir dos resultados obtidos da análise paramétrica realizada neste trabalho. Esta curva contempla todos os 441 modelos analisados, bem como os diferentes tipos de enrijecedores estudados: cantoneira, perfil T e barra chata. A Figura 106 mostra a curva proposta C_x versus parâmetro de esbeltez β , para painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304.

Pela observação da Figura 106 e dos modos de falha (Apêndice C) verificados para os painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável, pode-se perceber a existência de um valor do parâmetro de esbeltez $\beta = 0.94$, que delimita os tipos de falha dos painéis. Assim, para $\beta \leq 0.94$, a plastificação do conjunto placa-enrijecedor

foi o modo de falha dominante. Por outro lado, para $\beta > 0.94$, a flambagem do conjunto placa-enrijecedor controlou o dimensionamento.

O Apêndice E deste trabalho exhibe a configuração deformada para os modelos de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304 que foram objeto da análise paramétrica realizada nesta pesquisa, no instante da sua resistência última. Os painéis apresentados neste apêndice exibem uma relação largura/altura igual a dois. Os resultados para os painéis que apresentam relação largura/altura igual a quatro e seis não foram exibidos pois apresentaram configurações deformadas semelhantes aos painéis com relação largura/altura igual a dois. Pela observação das figuras do Apêndice E, em conjunto com a Figura 104 e a Figura 106, pode-se notar que o valor do parâmetro $\beta = 0.94$ constitui-se em uma fronteira para os modos de falha dos painéis com enrijecedores do tipo cantoneira, perfil T e barra chata, ou seja, para $\beta \leq 0.94$ e relação $i_0/i \leq 1.0$, a plastificação do conjunto placa-enrijecedor é o modo de falha dominante. Por outro lado, para $\beta > 0.94$ e/ou relação $i_0/i > 1.0$, a flambagem do conjunto placa-enrijecedor controla o dimensionamento.

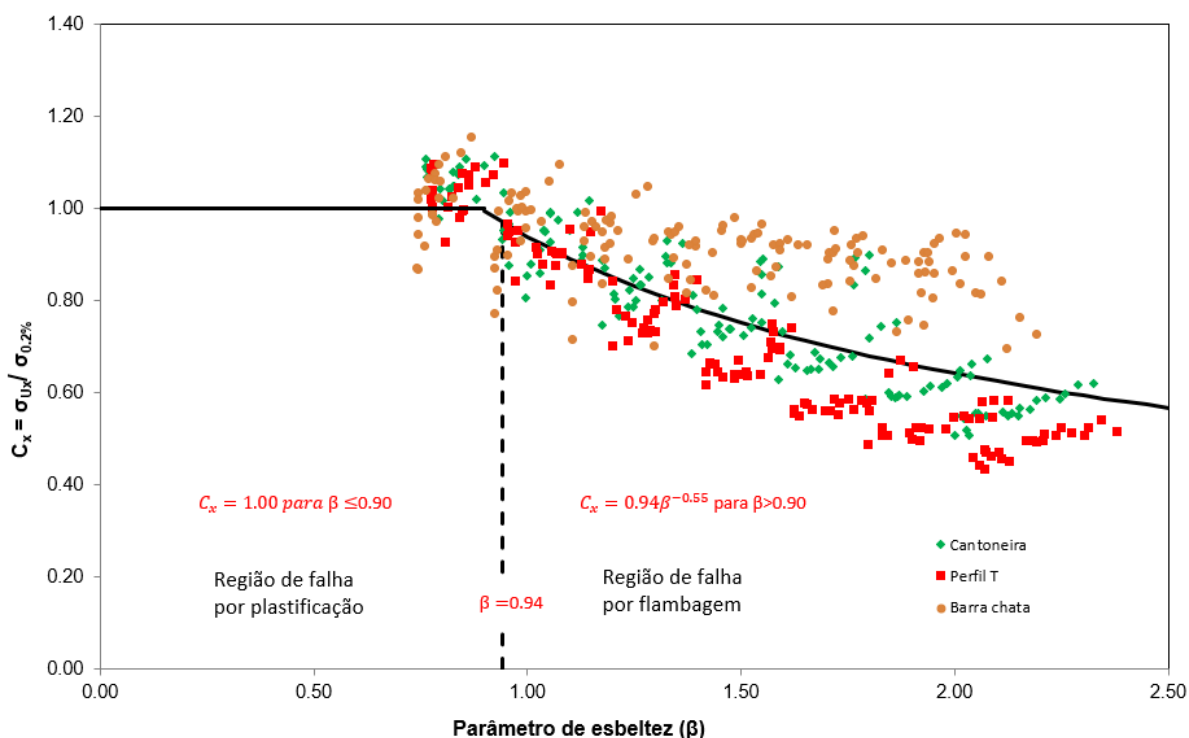


Figura 106 – Parâmetro C_x em função do parâmetro de esbeltez β

Na Figura 106 pode ser verificado que para valores de $\beta > 0.90$, a razão σ_{ux}/σ_0 decresce. O parâmetro de esbeltez β foi calculado conforme a equação (34). Contudo, a tensão $\sigma_{0.2\%}$ e o módulo de elasticidade E foram calculados como a média ponderada das respectivas propriedades mecânicas do aço inoxidável da placa e do enrijecedor, exibidas na Tabela 3, considerando-se como peso da média ponderada as respectivas áreas destes elementos.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 106, uma nova formulação para se avaliar o parâmetro C_x foi proposta, seguindo-se o mesmo procedimento adotado pelo ABS [49] e está apresentada na equação (55).

$$\begin{aligned} C_x &= 1.00 \text{ para } \beta \leq 0.90 \\ C_x &= 0.94\beta^{-0.55} \text{ para } \beta > 0.90 \end{aligned} \quad (55)$$

Após a formulação de uma nova equação para o parâmetro C_x (55), que contemplasse os painéis fabricados em aço inoxidável austenítico 304, toda a marcha de cálculo para a verificação da resistência das placas entre enrijecedores, conforme o ABS [1], foi refeita e os resultados estão exibidos na Tabela 10 e também no Apêndice D deste trabalho. Pela observação destes resultados, verificou-se a necessidade de ajuste do segundo termo da equação (27).

O segundo termo da equação (27) foi ajustado de forma a se obter uma boa previsão de falha em função do estado de tensões oriundo da carga última aplicada aos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304 investigados neste trabalho. Tal ajuste foi realizado em termos do parâmetro $A(K)$ apresentado na equação (56), onde (K) pode ser observado na equação (57). A representação gráfica do parâmetro $A(K)$ está exibida na Figura 107.

$$A(K) = -2.15K + 0.59 \quad (56)$$

$$K = \left(\frac{\sigma_{x \max}}{\sigma_{Ux}} \right) \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\sigma_{Uy}} \right) \quad (57)$$

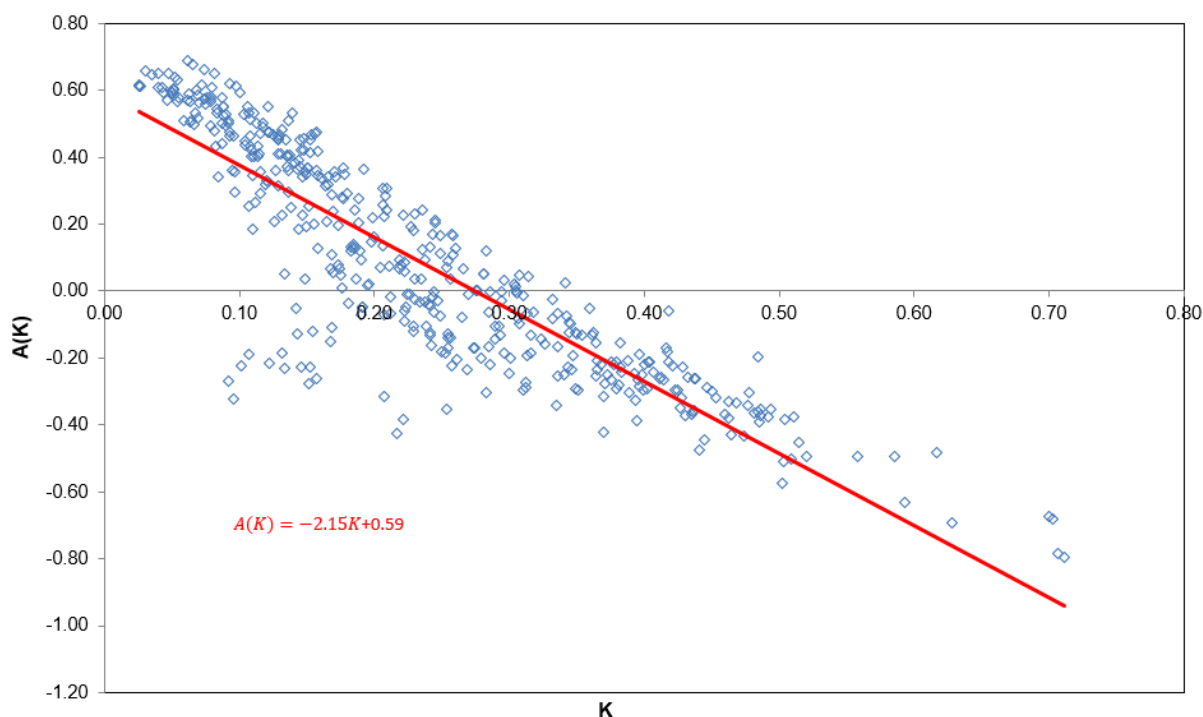


Figura 107 – Parâmetro de ajuste $A(K)$

A Tabela 10 mostra os resultados obtidos para os modelos de 1 a 21 deste trabalho. Pela observação da coluna denominada “Soma dos termos” (Termo 1 + Termo 2 + Termo 3 + Termo 4) e suas respectivas componentes, pode ser entendida a influência de cada parcela no resultado final da equação (27). O Termo 4, correspondente à tensão de cisalhamento, apresenta influência desprezível no resultado final. O Termo 3 geralmente apresenta uma menor influência no resultado final da equação (27) quando comparado com o Termo 2. Desta forma, a estratégia adotada para se corrigir os resultados da equação (27) que foi calibrada para os painéis em aço carbono e adaptar a mesma para os painéis em aço inoxidável austenítico 304, foi a correção do Termo 2 uma vez que os efeitos das tensões normais longitudinal e transversal estariam sendo considerados simultaneamente quando da correção deste termo. A coluna “Soma correta” exibe a soma dos termos da equação (27) desconsiderando-se a influência do Termo 2 (Termo 1 + Termo 3 + Termo 4) e a coluna “Ajuste” mostra a correção necessária para se trazer o resultado da equação (27) para o valor unitário quando o Termo 2 é desprezado. Desta forma, foi construído o gráfico da Figura 107, contendo os 441 resultados (pontos) apresentados pelos modelos deste trabalho no qual o eixo das abcissas representa o parâmetro (K) e o eixo das ordenadas representa o ajuste $A(K)$ a ser feito na equação

(27) para que a mesma convirja para o valor unitário. Após a obtenção da nuvem de pontos visualizada na Figura 107, foi ajustada uma reta representada pela equação (56) que quantifica o ajuste necessário A(K) como uma função do produto das tensões normais longitudinal e transversal.

Finalmente, a coluna “Nova soma” exibida na Tabela 10, apresenta os resultados da soma das colunas Termo 1 + Termo 3 + Termo 4 + “Ajuste novo” (A(K)). O apêndice D exibe a tabela completa, com a mesma metodologia de correção da equação (27) exemplificada na Tabela 10, para os 441 modelos deste trabalho. O significado de cada coluna da Tabela 10 está explicado no apêndice D deste trabalho.

Tabela 10 – Metodologia de correção do Termo 2 da equação (27)

Modelo	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Soma dos termos	Soma correta	Ajuste	1	3	1*3	Ajuste novo	Nova soma
1	1.23	-0.09	0.02	0.03	1.18	1.28	-0.28	1.11	0.14	0.15	0.26	1.54
2	1.09	-0.27	0.17	0.00	0.99	1.26	-0.26	1.04	0.41	0.43	-0.34	0.92
3	1.14	-0.29	0.19	0.00	1.04	1.33	-0.33	1.07	0.43	0.46	-0.40	0.92
4	1.14	-0.15	0.07	0.01	1.07	1.22	-0.22	1.07	0.27	0.29	-0.02	1.19
5	0.92	-0.13	0.06	0.02	0.87	1.00	0.00	0.96	0.25	0.24	0.07	1.07
6	0.97	-0.18	0.11	0.00	0.91	1.08	-0.08	0.98	0.34	0.33	-0.12	0.96
7	0.97	-0.10	0.05	0.00	0.93	1.03	-0.03	0.98	0.23	0.23	0.10	1.12
8	0.91	-0.12	0.08	0.00	0.88	1.00	0.00	0.96	0.29	0.28	0.00	1.00
9	0.93	-0.13	0.09	0.00	0.90	1.03	-0.03	0.97	0.30	0.29	-0.04	0.98
10	0.95	-0.08	0.05	0.00	0.93	1.01	-0.01	0.98	0.23	0.22	0.11	1.12
11	0.98	-0.10	0.08	0.00	0.97	1.06	-0.06	0.99	0.29	0.28	-0.02	1.04
12	1.05	-0.11	0.10	0.00	1.05	1.16	-0.16	1.03	0.32	0.33	-0.11	1.04
13	0.95	-0.05	0.05	0.00	0.96	1.01	-0.01	0.98	0.23	0.23	0.10	1.11
14	1.02	-0.07	0.08	0.00	1.04	1.10	-0.10	1.01	0.29	0.29	-0.04	1.07
15	1.03	-0.07	0.10	0.00	1.06	1.13	-0.13	1.02	0.31	0.32	-0.09	1.04
16	0.97	-0.03	0.06	0.00	1.01	1.03	-0.03	0.99	0.24	0.24	0.08	1.11
17	1.09	-0.04	0.09	0.00	1.15	1.19	-0.19	1.05	0.30	0.32	-0.09	1.10
18	1.12	-0.04	0.11	0.00	1.19	1.23	-0.23	1.06	0.32	0.34	-0.15	1.08
19	0.39	0.00	0.00	0.01	0.41	0.41	0.59	0.63	0.07	0.04	0.50	0.90
20	0.47	0.00	0.01	0.02	0.49	0.49	0.51	0.68	0.09	0.06	0.45	0.94
21	0.41	0.00	0.05	0.01	0.47	0.47	0.53	0.64	0.22	0.14	0.29	0.76

Termo 1

Termo 2

Termo 3

Termo 4

$$\left(\frac{\sigma_{x \max}}{\eta \sigma_{Ux}}\right)^2 - \varphi \left(\frac{\sigma_{x \max}}{\eta \sigma_{Ux}}\right) \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\eta \sigma_{Uy}}\right) + \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\eta \sigma_{Uy}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\eta \tau_U}\right)^2 \leq 1$$

Desta forma, a equação (27) pode ser reescrita com o novo aspecto proposto na equação (58), para a avaliação da resistência última das placas entre enrijecedores dos painéis fabricados em aço inoxidável austenítico 304 investigados neste trabalho.

$$\left(\frac{\sigma_{x \max}}{\eta \sigma_{Ux}}\right)^2 + \left(\frac{A}{\eta^2}\right) + \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\eta \sigma_{Uy}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\eta \tau_U}\right)^2 \leq 1 \quad (58)$$

Neste estágio, uma comparação estatística entre a aplicação da equação (27) do ABS [1] para painéis enrijecidos fabricados em aço carbono e a equação (58) proposta neste trabalho para os painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304 pode ser realizada, com os resultados resumidos na Tabela 11. Pode ser observado que se utilizando a formulação original do ABS [1], uma média de 0.840 foi obtida com um coeficiente de variação de 0.353 para a amostra de dados de 441 modelos de painéis enrijecidos apresentados neste trabalho. Por outro lado, quando a formulação apresentada neste trabalho é utilizada, uma média de 1.000 foi obtida com um coeficiente de variação de 0.161 para a mesma base de dados. Estes resultados demonstram que a formulação proposta neste trabalho pode prever a resistência das placas entre enrijecedores dos painéis fabricados em aço inoxidável austenítico 304, conforme pode ser verificado no Apêndice D.

Tabela 11 – Comparação estatística entre ABS [1] e as proposições deste trabalho

Parâmetro estatístico	Equação (27) do ABS [1]	Equação (58) deste trabalho
Média	0.840	1.000
Desvio padrão	0.297	0.161
Coeficiente de variação	0.353	0.161

Uma comparação direta entre as curvas para o cálculo do parâmetro C_x para o aço carbono e para o aço inoxidável austenítico 304, exibida na Figura 108, mostra que a forma das curvas é similar, com o aço inoxidável apresentando uma menor resistência para valores do parâmetro de esbeltez β maior do que 0.90. Tal diferença na resistência poderia indicar que o aço inoxidável seria mais sensível às imperfeições geométricas e tensões residuais do que o aço carbono. Tal inferência foi feita pela

consideração de que a imperfeição geométrica global para construção e modelagem numérica para o aço carbono é de 0.15% do vão do painel enrijecido enquanto para o aço inoxidável austenítico, conforme a pesquisa corrente, é de 0.10% do vão do painel enrijecido. Adicionalmente, o coeficiente de dilatação térmica linear para o aço inoxidável austenítico é de $16 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ enquanto que para o aço carbono é de $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [4]. Desta forma, o aço inoxidável austenítico seria mais sensível aos processos de soldagem, em termos de deformação/tensão, do que o aço carbono e como consequência, os efeitos das tensões residuais poderiam contribuir mais efetivamente na diminuição da resistência última das placas entre enrijecedores nos painéis fabricados em aço inoxidável austenítico do que naqueles fabricados em aço carbono.

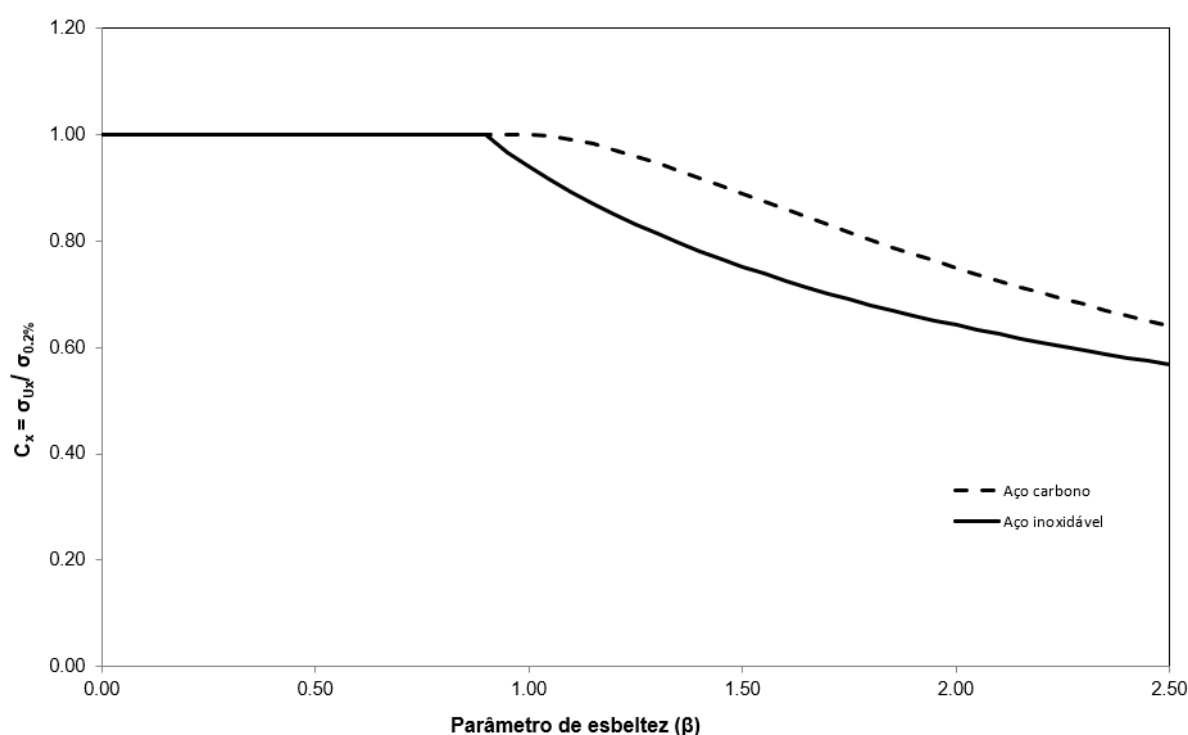


Figura 108 – Parâmetro C_x versus β para os aços carbono e inoxidável austenítico 304

O parâmetro C_x tem importância direta no cálculo da largura efetiva das placas entre enrijecedores para a verificação do modo de flambagem do tipo viga-coluna para o painel enrijecido. De fato, Faulkner [47] propôs a equação (24) enquanto a DNV [48] adotou a equação (26) para o cálculo da largura efetiva das placas entre enrijecedores. A Sociedade Classificadora ABS [1] fez uma pequena correção na

proposição (24) de Faulkner [47] e adotou a equação (59) para o cálculo da largura efetiva:

$$\frac{S_e}{S} = C_x C_y C_{xy} \quad (59)$$

Para a avaliação da equação (59), o parâmetro C_x é dado pela equação (43) do ABS [1] que na verdade é a própria equação (24) de Faulkner [47], enquanto os parâmetros C_y e C_{xy} são dados pelas equações (44) e (46), respectivamente, também do ABS [1]. Vale lembrar, que a equação (43) refere-se ao cálculo da largura efetiva para os painéis enrijecidos fabricados em aço carbono. Uma vez que este trabalho está propondo uma nova equação (55) para o cálculo do parâmetro C_x , este deve ser utilizado para o cálculo da largura efetiva das placas entre enrijecedores para os painéis fabricados em aço inoxidável austenítico 304.

A Figura 109 exhibe gráficos da relação $\frac{P_U}{P_0}$ *versus* parâmetro de esbeltez β , comparando-se os resultados para uma razão de aspecto das placas entre enrijecedores dos painéis igual a dois e para uma relação largura/altura do painel enrijecido igual a dois. Desta forma, foi feita uma comparação entre os resultados verificados para os painéis com cinco enrijecedores do tipo cantoneira, perfil T e barra chata. O significado dos parâmetros P_U e P_0 está exibido abaixo:

P_U – Carga última do painel enrijecido;

P_0 – Carga de plastificação teórica utilizando-se a tensão $\sigma_{0.2\%}$, para uma relação elasto-plástica perfeita entre tensão e deformação.

Pela observação da Figura 109, pode-se perceber que os resultados para os painéis com enrijecedores do tipo perfil T e cantoneira são semelhantes ao longo das diferentes esbeltezes avaliadas, enquanto que os resultados para os painéis enrijecidos com barra chata apresentam um descolamento dos seus pares em cantoneira e perfil T para a região com parâmetro de esbeltez abaixo de 1.30. O Apêndice F deste trabalho apresenta os resultados da relação $\frac{P_U}{P_0}$ *versus* parâmetro de esbeltez β , para diferentes famílias de razão de aspecto. De uma forma geral, os resultados para uma dada família de razão de aspecto da placa entre enrijecedores

dos painéis, são semelhantes e praticamente independem do número de enrijecedores e da relação largura/altura do painel enrijecido. De fato, a variável que exerce maior influência na resistência última dos painéis enrijecidos fabricados com aço inoxidável austenítico 304, analisados neste trabalho de pesquisa, é o parâmetro de esbeltez β .

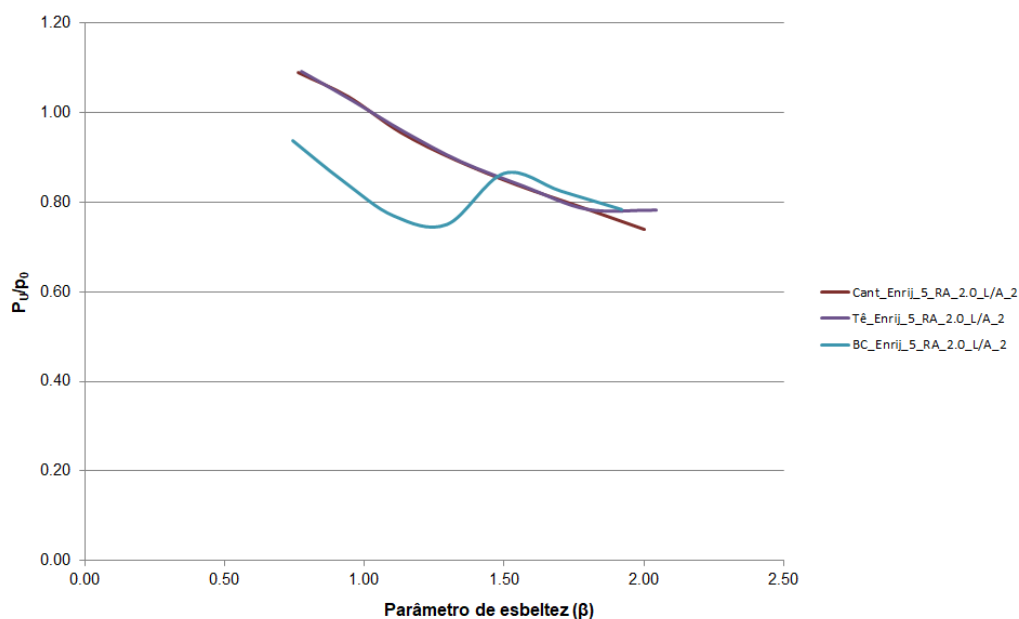


Figura 109 – Relação P_u/P_0 versus β para painéis com diferentes enrijecedores

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Principais conclusões

Para este trabalho de pesquisa, dois painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304 foram ensaiados à compressão para a obtenção da carga última dos mesmos, bem como verificação da sua configuração deformada no regime pós-flambagem. A geometria dos painéis denominados respectivamente por Painel 1 e Painel 2 foi escolhida de forma a se representar as características geométricas mais recorrentes de painéis enrijecidos para estruturas do tipo naval/*offshore*, de acordo com a Sociedade Classificadora ABS [49].

Após a realização dos ensaios experimentais à compressão uniforme dos painéis enrijecidos, foram elaborados modelos numéricos em elementos finitos, com o objetivo de se reproduzirem os resultados verificados em laboratório. Para tanto, diferentes níveis de imperfeições geométricas iniciais globais e locais foram atribuídas aos modelos numéricos. Além disso, realizaram-se estudos de sensibilidade do tamanho da malha de elementos finitos e sua influência nos resultados. Finalmente, diferentes condições de contorno foram testadas nos modelos numéricos, a fim de se obter a maior semelhança possível com os resultados apresentados nos ensaios experimentais.

Após o processo de calibração dos modelos numéricos com os ensaios experimentais, verificou-se que o conjunto de imperfeições que foram imputadas aos modelos numéricos e que mais se assemelhou aos modelos experimentais foi o de denominação $L/1000 - 0.005$ s, onde o primeiro rótulo se refere à magnitude da imperfeição global aplicada ao modelo numérico, enquanto o segundo rótulo indica a imperfeição local.

Em termos de magnitude de carga última, os modelos experimentais e numéricos apresentaram pouca diferença entre si. Os diagramas de carga vertical *versus* deslocamento vertical para os modelos numéricos e experimentais apresentaram resultados bastante semelhantes entre si. Da observação dos resultados das análises experimentais e sua comparação com o método dos elementos finitos, percebeu-se que a configuração deformada das estruturas exibiu um comportamento global e local similar entre ambas. Foi observada flambagem local das placas entre enrijecedores que precedeu a flambagem global dos painéis

enrijecidos, tanto nos modelos experimentais quanto nos modelos numéricos. No que diz respeito ao regime pós-flambagem, os modelos experimentais e numéricos apresentaram um comportamento típico de flexão, não se caracterizando uma perda abrupta de resistência.

Após a etapa de calibração dos modelos numéricos para a determinação dos níveis de imperfeição geométrica local e global a serem utilizados nos estudos numéricos, uma análise paramétrica em elementos finitos foi realizada para se estudar o comportamento estrutural de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304. Foram analisados 441 modelos em elementos finitos e seus resultados foram submetidos aos critérios de verificação de resistência última das placas entre enrijecedores conforme as prescrições do ABS [1]. Verificou-se que para os painéis com baixa esbeltez das placas entre enrijecedores, os resultados da resistência última apresentaram-se conservadores enquanto para os painéis com maiores esbeltezes, resultados não conservadores foram encontrados. Desta forma, uma nova curva para o cálculo do parâmetro C_x (razão da resistência última no que diz respeito à tensão normal uniaxial na direção longitudinal pela tensão $\sigma_{0.2\%}$ da placa) foi proposta pela equação (55), assim como, uma nova inequação de interação (58) para o cálculo da resistência última das placas entre enrijecedores sob estado combinado de tensões para os painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304.

Uma comparação direta entre as curvas para o cálculo do parâmetro C_x para o aço carbono e para o aço inoxidável austenítico 304, mostrou que a forma das curvas é similar, com o aço inoxidável apresentando uma menor resistência para valores do parâmetro de esbeltez β maior do que 0.90. Tal diferença na resistência poderia indicar que o aço inoxidável seria mais sensível às imperfeições geométricas e tensões residuais do que o aço carbono. Tal inferência foi feita pela consideração de que a imperfeição geométrica global para construção e modelagem numérica para o aço carbono é de 0.15% do vão do painel enrijecido enquanto para o aço inoxidável austenítico, conforme a pesquisa corrente, é de 0.10% do vão do painel enrijecido. Adicionalmente, o coeficiente de dilatação térmica linear para o aço inoxidável austenítico é de $16 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ enquanto que para o aço carbono é de $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [4]. Desta forma, o aço inoxidável austenítico seria mais sensível aos processos de soldagem, em termos de deformação/tensão, do que o aço carbono e como consequência, os efeitos das tensões residuais poderiam contribuir mais efetivamente

na diminuição da resistência última das placas entre enrijecedores nos painéis fabricados em aço inoxidável austenítico do que naqueles fabricados em aço carbono.

Pela observação dos resultados da análise paramétrica em elementos finitos, pode-se notar que o valor do parâmetro $\beta = 0.94$ constitui-se em uma fronteira para os modos de falha dos painéis com enrijecedores do tipo cantoneira, perfil T e barra chata, ou seja, para $\beta \leq 0.94$ e relação $i_0/i \leq 1.0$, a plastificação do conjunto placa-enrijecedor é o modo de falha dominante. Por outro lado, para $\beta > 0.94$ e/ou relação $i_0/i > 1.0$, a flambagem do conjunto placa-enrijecedor controla o dimensionamento.

Adicionalmente, foi proposta uma nova equação (58) para o cálculo da resistência última das placas entre enrijecedores dos painéis fabricados em aço inoxidável austenítico 304, em substituição à equação (27), tradicionalmente utilizada para os painéis enrijecidos fabricados em aço carbono.

Finalmente, observou-se que de uma forma geral, os resultados em termos da relação $\frac{P_U}{P_0}$ versus parâmetro de esbeltez β , para uma dada família de razão de aspecto da placa entre enrijecedores dos painéis, são semelhantes e praticamente independem do número de enrijecedores e da relação largura/altura do painel enrijecido. De fato, a variável que exerceu maior influência na resistência última dos painéis enrijecidos fabricados com aço inoxidável austenítico 304, analisados neste trabalho de pesquisa, foi o parâmetro de esbeltez β .

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros que complementem e aprimorem a presente pesquisa podem ser apresentadas, tais como:

- A realização de ensaios experimentais adicionais com a finalidade de validação da análise paramétrica numérica realizada no presente trabalho e por consequência, verificação da capacidade das formulações propostas nesta pesquisa de previsão da resistência última das placas entre enrijecedores de painéis fabricados em aço inoxidável austenítico 304;
- O estudo do parâmetro C_x apresentado neste trabalho pela equação (55) para se verificar a precisão do mesmo no cálculo da largura efetiva das placas entre

enrijecedores para a avaliação do modo de flambagem de viga-coluna dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304;

- A calibração e proposição de coeficientes de segurança η para a equação (58) proposta neste trabalho de pesquisa;
- A realização de ensaios experimentais e numéricos para a avaliação do comportamento estrutural de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável, quando submetidos à carga de pressão interna ou externa perpendicular ao plano das placas entre enrijecedores;
- A realização de trabalhos similares à presente pesquisa utilizando-se diferentes tipos de aço inoxidável, notadamente os aços duplex e super duplex, para avaliação das diferenças de comportamento estrutural em relação a este trabalho;
- A realização da avaliação da resistência estrutural residual de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável, quando submetidos à cargas acidentais, como por exemplo às oriundas de impacto perpendicular ao plano das placas entre enrijecedores. Uma vez que o aço inoxidável apresenta grande capacidade de absorção de energia mecânica dada a sua maior tenacidade em relação ao aço carbono, o estudo do impacto de embarcações auxiliares em plataformas de petróleo e a previsão da resistência estrutural residual dos painéis seria de grande valor;
- A realização de pesquisas do comportamento estrutural de painéis enrijecidos curvilíneos fabricados em aço inoxidável tais como os encontrados em silos, caixas d'água, reservatórios de produtos químicos, dentre outras estruturas.
- O estudo do momento de inércia mínimo i_0 preconizado pelo ABS [1], conforme a equação (51), que é um parâmetro que foi concebido originalmente para os painéis enrijecidos fabricados em aço carbono e que foi utilizado neste trabalho como um ponto de partida para o cálculo da inércia mínima do conjunto placa-enrijecedor dos painéis fabricados em aço inoxidável austenítico 304. Certamente, um estudo detalhado e específico da inércia mínima i_0 , dedicado aos painéis fabricados em aço inoxidável, deve ser objeto de pesquisa futura por parte de outros autores;
- A avaliação estrutural de painéis enrijecidos, fabricados em aço inoxidável, abrangendo um maior número de vigas transversais/cavernas, de modo a

diminuir a influência das condições de contorno nos resultados. Para tanto, é indicada a utilização da norma ABS [58], que trata da análise não linear em elementos finitos de estruturas marinhas e *offshore*.

REFERÊNCIAS

- [1] ABS – *Buckling and ultimate strength assessment for offshore structures* – Houston, TX: 2004-2018.
- [2] DNV-RP-C201 – *Buckling strength of plated structures – Recommended Practice*, 2010.
- [3] ESFO – Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Flutuantes *offshore* – Notas de aula do Professor Peter Kallef – Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2007.
- [4] *Design manual for structural stainless steel (third edition) - Euro Inox and The Steel Construction Institute* – 2006 - ISBN 2-87997-037-7.
- [5] OCIMF – *Factors influencing accelerated corrosion of cargo oil tanks* – 1997
- [6] ABS – *Rules for building and classing – Floating production installations* – Spring, TX: 2019.
- [7] ABS – *Inspection grading criteria for the ABS hull inspection and maintenance program (HIMP)* – 2017.
- [8] Türk Loydu - *Guideline on Türk Loydu hull inspection and maintenance program-grading for findings during inspections* – 2013.
- [9] AISC 370-21 – *Specification for structural stainless steel buildings* – 2021.
- [10] AISC 313-21 – *Code of standard practice for structural stainless steel buildings* – 2021.
- [11] R. S. Dow, C. S. Smith, *Effects of localized imperfections on compressive strength of long rectangular plates: Journal of constructional steel research*, 1984, 4: 51-76.
- [12] I. Baláz, N. W. Murray, *A comparison of some design rules with results from tests on longitudinally stiffened deck plates of box-girders: Journal of constructional steel research*, 1992; 23: 31–54.

- [13] W. Cui, A. E. Mansour, *Effects of welding distortions and residual stresses on the ultimate strength of long rectangular plates under uniaxial compression: Marine Structures*, 1998; 11: 251–269.
- [14] J. K. Paik, A. K. Thayamballi, D. H. Kim, *An analytical method for the ultimate compressive strength and effective plating of stiffened panels: Journal of constructional steel research*, 1999; 49: 43-68.
- [15] G. Y. Grondin, A. E. Elwi, J. J. R. Cheng, *Buckling of stiffened steel plates – A parametric study: Journal of constructional steel research*, 1999; 50: 151-175.
- [16] P. Alagusundaramoorthy, R. Sundaravadivelu, C. Ganapathy, *Experimental study on collapse load of stiffened panels with cutouts: Journal of constructional steel research*, 1999; 52: 235-251.
- [17] B. Johansson, R. Maquoi, G. Sedlacek, *New design rules for plated structures in Eurocode 3: Journal of constructional steel research*, 2001; 57: 279-311.
- [18] *Eurocode 3 Design of steel structures. Part 1.5 General rules. Supplementary rules for planar plated structures without transverse loading*. ENV 1993-1-5:1997.
- [19] J. K. Paik, M. S. Lee, *A semi-analytical method for the elastic–plastic large deflection analysis of stiffened panels under combined biaxial compression/tension, biaxial in-plane bending, edge shear, and lateral pressure loads: Thin-walled structures*, 2005; 43: 375-410.
- [20] T. Yusuke, R. Sherif, O. Yasuhisa, K. Yasuo, M. Hidekazu, *Prediction of welding distortion and panel buckling of car carrier decks using database generated by FEA*, Osaka: JWRI, 2007.
- [21] M. R. Khedmati, M. Rastani, K. Ghavami, *Ultimate strength and ductility characteristics of intermittently welded stiffened plates: Journal of constructional steel research*, 2009; 65: 599-610.

- [22] M. R. Khedmati, M. R. Zareei, P. Rigo, *Sensitivity analysis on the elastic buckling and ultimate strength of continuous stiffened aluminium plates under combined in-plane compression and lateral pressure: Thin-walled structures*, 2009; 47: 1232-1245.
- [23] D. G. Stamatelos, G. N. Labeas, K. I. Tserpes, *Analytical calculation of local buckling and post-buckling behaviour of isotropic and orthotropic stiffened panels: Thin-walled structures*, 2011; 49: 422-430.
- [24] M. F. Hassanein, *Finite element investigation of shear failure of lean duplex stainless steel plate girders: Thin-walled structures*, 2011; 49: 964-973.
- [25] D. d. A. M. Amante, S. F. Estefen, *Buckling strength of stiffened panels considering actual geometric imperfections*, Natal, RN: COBEM, 2011.
- [26] M. Xu, C. G. Soares, *Assessment of the ultimate strength of narrow stiffened panel test specimens: Thin-walled structures*, 2012; 55: 11-21.
- [27] S. Sultana, Y. Wang, A. J. Sobey, J. A. Wharton, R. A. Shenoi, *Influence of corrosion on the ultimate compressive strength of steel plates and stiffened panels: Thin-walled structures*, 2015; 96: 95-104.
- [28] S. Shadkam, E. Ranjbarnodeh, M. Iranmanesh, *Effect of sequence and stiffener shape on welding distortion of stiffened panel: Journal of constructional steel research*, 2018; 149: 41-52.
- [29] J. H. Chujutalli, S. F. Estefen, C. G. Soares, *Experimental and numerical analysis of small-scale panels with indented stiffeners: Journal of constructional steel research*, 2018; 150: 7-22.
- [30] F. Rodrigues, P. C. G. d. S. Vellasco, A. T. d. Silva, L. R. O. d. Lima, *Avaliação da resistência de painéis enrijecidos fabricados em aços carbono e inoxidável*, Rio de Janeiro, RJ: CBPE, 2018.

- [31] X. W. Chen, H. X. Yuan, X. X. Du, Y. Zhao, J. Ye, L. Yang, *Shear buckling behaviour of welded stainless steel plate girders with transverse stiffeners: Thin-walled structures*, 2018; 122: 529-544.
- [32] L. A. S. Rodrigues, C. R. L. Loayza, D. J. A. Borges, P. E. C. Baia, E. N. Freitas, E. M. Braga, *Welding procedures influence analysis on the residual stress distribution and distortion of stiffened panels welded via robotized FCAW: Thin-walled structures*, 2019; 141: 175-183.
- [33] H. X. Yuan, X. W. Chen, M. Theofanous, Y. W. Wu, T. Y. Cao, X. X. Du, *Shear behaviour and design of diagonally stiffened stainless steel plate girders: Journal of constructional steel research*, 2019; 153: 588-602.
- [34] M. S. Yi, S. H. Noh, D. H. Lee, D. H. Seo, J. K. Paik, *Direct measurements, numerical predictions and simple formula estimations of welding-induced biaxial residual stress in a full- scale steel stiffened plate structure: Structures*, 2021; 29: 2094-2105.
- [35] B. Kövesdi, M. Z. Haffar, S. Ádány, *Buckling resistance of longitudinally stiffened plates: Eurocode-based design for column-like and interactive behavior of plates with closed-section stiffeners: Thin-walled structures*, 2021: 107266.
- [36] M. G. Ryu, K. He, D. H. Lee, S. I. Park, G. Thomas, J. K. Paik, *Finite element modeling for the progressive collapse analysis of steel stiffened-plate structures in fires: Thin-walled structures*, 2021; 159: 107262.
- [37] J. P. Quispe, S. F. Estefen, M. I. L. de Souza, J. H. Chujutalli, D. do A. M. Amante, T. Gurova, *Numerical and experimental analyses of ultimate longitudinal strength of a small-scale hull box girder: Marine structures*, 2022; 85: 103273.
- [38] J. P. Martins, H. S. Cardoso, *Elastic shear buckling coefficients for diagonally stiffened webs: Thin-walled structures*, 2022; 171: 108657.

- [39] A. Prato, M. S. M. Al-Saymaree, C. A. Featherston, D. Kennedy, *Buckling and post-buckling of thin-walled stiffened panels: modelling imperfections and joints: Thin-walled structures*, 2022; 172: 108938.
- [40] X. Chen, H. Yuan, *Local buckling behaviour of longitudinally stiffened stainless steel plate girders under combined bending and shear: Thin-walled structures*, 2023; 184: 110541.
- [41] F. Rodrigues, P. C. G. da S. Vellasco, L. R. O. de Lima, A. T. da Silva, *Structural assessment of stainless steel stiffened panels: Structures*, 2023; 57: 105162.
- [42] Z. Wang, X. Kong, W. Wu, D. Kim, *An advanced design diagram of stiffened plate subjected to combined in-plane and lateral loads considering initial deflection effects: Thin-walled structures*, 2024.
- [43] *Abaqus Theory Manual – Release 6.14 – 2015.*
- [44] *Eurocode 3 – Design of Steel Structures – Part 1-4: General Rules - Supplementary Rules for Stainless Steels – 2006.*
- [45] J. Amdahl, TMR 4205 – *Buckling and ultimate strength of marine structures – Chapter 3: Buckling of stiffened plates*, 2009.
- [46] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger – *Theory of plates and shells – McGraw-Hill Book Company – 1987.*
- [47] D. Faulkner, *A review of effective plating for use in the analysis of stiffened plating in bending and compression: Journal of Ship Research*, Vol. 19, 1975.
- [48] DNV-CN-30.1 – *Buckling strength analysis of bars and frames, and spherical shells – Classification Notes*, 2018.
- [49] ABS – *Commentary on the guide for buckling and ultimate strength assessment for offshore structures – Houston, TX: 2005-2018.*

- [50] M. C. Fredel, P. Ortega, E. Bastos, *Propriedades Mecânicas: Ensaio Fundamentais – Volume 1* - <http://www.ceremat.ufsc.br>
- [51] NBR ISO 6892-1, *Materiais metálicos - Ensaio de Tração – Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente*, Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2015.
- [52] W. D. J. Callister, *Materials Science and Engineering. An Introduction*. – John Wiley & Sons, Inc. 1994.
- [53] Huang Y, Young B. *The art of coupon tests. Journal of constructional steel research*, 2014; 96:159-175.
- [54] I. S. Botelho, A. M. G. Kayser, F. R. Sarquis, L. R. O. de Lima, P. C. G. da S. Vellasco, A. T. Silva, *Starred rolled stainless steel angle sections under compression: An experimental and numerical investigation. Thin-Walled Structures* 2021; 158:107177.
- [55] Swanson. *ANSYS Engineering Analysis System User's Manual*. Houston, Pa. :Swanson Analysis Systems, 1985.
- [56] *NX Nastran User's Guide/Theoretical Manual - Release 11.0.1 – 2013*.
- [57] DNV-OS-C401 – *Fabrication and testing of offshore structures – offshore Standard*, 2014.
- [58] ABS – *Nonlinear finite element analysis of marine and offshore structures – January 2021*.

APÊNDICE A – PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DOS PAINÉIS

Este apêndice apresenta as propriedades geométricas dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável que foram objeto da análise paramétrica realizada neste trabalho de pesquisa.

Tabela 12 – Propriedades geométricas dos painéis enrijecidos

Modelo	Altura do painel (mm)	Largura do painel (mm)	Espessura da placa (mm)	Tipo de enrijecedor	Espaçamento entre enrijecedores (mm)	Número de enrijecedores	Razão de aspecto (α)	Esbeltez (s/t)	Largura/altura do painel enrijecido
1	2000	4000	50.0	Cantoneira	1000	5.0	2.0	20.0	2.0
2	1900	7600	47.5	Cantoneira	950	9.0	2.0	20.0	4.0
3	1800	10800	45.0	Cantoneira	900	13.0	2.0	20.0	6.0
4	2500	5000	50.0	Cantoneira	1250	5.0	2.0	25.0	2.0
5	2400	9600	48.0	Cantoneira	1200	9.0	2.0	25.0	4.0
6	2300	13800	46.0	Cantoneira	1150	13.0	2.0	25.0	6.0
7	2800	5600	46.7	Cantoneira	1400	5.0	2.0	30.0	2.0
8	2700	10800	45.0	Cantoneira	1350	9.0	2.0	30.0	4.0
9	2600	15600	43.3	Cantoneira	1300	13.0	2.0	30.0	6.0
10	2800	5600	40.0	Cantoneira	1400	5.0	2.0	35.0	2.0
11	2700	10800	38.6	Cantoneira	1350	9.0	2.0	35.0	4.0
12	2600	15600	37.1	Cantoneira	1300	13.0	2.0	35.0	6.0
13	2500	5000	31.3	Cantoneira	1250	5.0	2.0	40.0	2.0
14	2400	9600	30.0	Cantoneira	1200	9.0	2.0	40.0	4.0
15	2300	13800	28.8	Cantoneira	1150	13.0	2.0	40.0	6.0
16	2400	4800	26.7	Cantoneira	1200	5.0	2.0	45.0	2.0
17	2300	9200	25.6	Cantoneira	1150	9.0	2.0	45.0	4.0
18	2200	13200	24.4	Cantoneira	1100	13.0	2.0	45.0	6.0
19	2200	4400	22.0	Cantoneira	1100	5.0	2.0	50.0	2.0
20	2000	8000	20.0	Cantoneira	1000	9.0	2.0	50.0	4.0
21	1900	11400	19.0	Cantoneira	950	13.0	2.0	50.0	6.0

Modelo	Altura do painel (mm)	Largura do painel (mm)	Espessura da placa (mm)	Tipo de enrijecedor	Espaçamento entre enrijecedores (mm)	Número de enrijecedores	Razão de aspecto (α)	Esbeltez (s/t)	Largura/altura do painel enrijecido
22	2500	5000	50.0	Cantoneira	1000	6.0	2.5	20.0	2.0
23	2375	9500	47.5	Cantoneira	950	11.0	2.5	20.0	4.0
24	2250	13500	45.0	Cantoneira	900	16.0	2.5	20.0	6.0
25	2750	5500	44.0	Cantoneira	1100	6.0	2.5	25.0	2.0
26	2625	10500	42.0	Cantoneira	1050	11.0	2.5	25.0	4.0
27	2500	15000	40.0	Cantoneira	1000	16.0	2.5	25.0	6.0
28	2500	5000	33.3	Cantoneira	1000	6.0	2.5	30.0	2.0
29	2375	9500	31.7	Cantoneira	950	11.0	2.5	30.0	4.0
30	2250	13500	30.0	Cantoneira	900	16.0	2.5	30.0	6.0
31	2500	5000	28.6	Cantoneira	1000	6.0	2.5	35.0	2.0
32	2375	9500	27.1	Cantoneira	950	11.0	2.5	35.0	4.0
33	2250	13500	25.7	Cantoneira	900	16.0	2.5	35.0	6.0
34	2625	5250	26.3	Cantoneira	1050	6.0	2.5	40.0	2.0
35	2500	10000	25.0	Cantoneira	1000	11.0	2.5	40.0	4.0
36	2375	14250	23.8	Cantoneira	950	16.0	2.5	40.0	6.0
37	2750	5500	24.4	Cantoneira	1100	6.0	2.5	45.0	2.0
38	2625	10500	23.3	Cantoneira	1050	11.0	2.5	45.0	4.0
39	2500	15000	22.2	Cantoneira	1000	16.0	2.5	45.0	6.0
40	2625	5250	21.0	Cantoneira	1050	6.0	2.5	50.0	2.0
41	2500	10000	20.0	Cantoneira	1000	11.0	2.5	50.0	4.0
42	2375	14250	19.0	Cantoneira	950	16.0	2.5	50.0	6.0
43	2250	4500	37.5	Cantoneira	750	7.0	3.0	20.0	2.0
44	2100	8400	35.0	Cantoneira	700	13.0	3.0	20.0	4.0
45	1950	11700	32.5	Cantoneira	650	19.0	3.0	20.0	6.0
46	2400	4800	32.0	Cantoneira	800	7.0	3.0	25.0	2.0
47	2250	9000	30.0	Cantoneira	750	13.0	3.0	25.0	4.0
48	2100	12600	28.0	Cantoneira	700	19.0	3.0	25.0	6.0
49	2550	5100	28.3	Cantoneira	850	7.0	3.0	30.0	2.0
50	2400	9600	26.7	Cantoneira	800	13.0	3.0	30.0	4.0
51	2250	13500	25.0	Cantoneira	750	19.0	3.0	30.0	6.0
52	2700	5400	25.7	Cantoneira	900	7.0	3.0	35.0	2.0
53	2550	10200	24.3	Cantoneira	850	13.0	3.0	35.0	4.0
54	2400	14400	22.9	Cantoneira	800	19.0	3.0	35.0	6.0
55	2850	5700	23.8	Cantoneira	950	7.0	3.0	40.0	2.0
56	2700	10800	22.5	Cantoneira	900	13.0	3.0	40.0	4.0
57	2550	15300	21.3	Cantoneira	850	19.0	3.0	40.0	6.0
58	2700	5400	20.0	Cantoneira	900	7.0	3.0	45.0	2.0
59	2550	10200	18.9	Cantoneira	850	13.0	3.0	45.0	4.0
60	2400	14400	17.8	Cantoneira	800	19.0	3.0	45.0	6.0
61	2850	5700	19.0	Cantoneira	950	7.0	3.0	50.0	2.0
62	2700	10800	18.0	Cantoneira	900	13.0	3.0	50.0	4.0
63	2550	15300	17.0	Cantoneira	850	19.0	3.0	50.0	6.0

Modelo	Altura do painel (mm)	Largura do painel (mm)	Espessura da placa (mm)	Tipo de enrijecedor	Espaçamento entre enrijecedores (mm)	Número de enrijecedores	Razão de aspecto (α)	Esbeltez (s/t)	Largura/altura do painel enrijecido
64	2100	4200	30.0	Cantoneira	600	8.0	3.5	20.0	2.0
65	1925	7700	27.5	Cantoneira	550	15.0	3.5	20.0	4.0
66	1750	10500	25.0	Cantoneira	500	22.0	3.5	20.0	6.0
67	2275	4550	26.0	Cantoneira	650	8.0	3.5	25.0	2.0
68	2100	8400	24.0	Cantoneira	600	15.0	3.5	25.0	4.0
69	1925	11550	22.0	Cantoneira	550	22.0	3.5	25.0	6.0
70	2450	4900	23.3	Cantoneira	700	8.0	3.5	30.0	2.0
71	2275	9100	21.7	Cantoneira	650	15.0	3.5	30.0	4.0
72	2100	12600	20.0	Cantoneira	600	22.0	3.5	30.0	6.0
73	2625	5250	21.4	Cantoneira	750	8.0	3.5	35.0	2.0
74	2450	9800	20.0	Cantoneira	700	15.0	3.5	35.0	4.0
75	2275	13650	18.6	Cantoneira	650	22.0	3.5	35.0	6.0
76	2800	5600	20.0	Cantoneira	800	8.0	3.5	40.0	2.0
77	2625	10500	18.8	Cantoneira	750	15.0	3.5	40.0	4.0
78	2450	14700	17.5	Cantoneira	700	22.0	3.5	40.0	6.0
79	2975	5950	18.9	Cantoneira	850	8.0	3.5	45.0	2.0
80	2800	11200	17.8	Cantoneira	800	15.0	3.5	45.0	4.0
81	2625	15750	16.7	Cantoneira	750	22.0	3.5	45.0	6.0
82	2800	5600	16.0	Cantoneira	800	8.0	3.5	50.0	2.0
83	2625	10500	15.0	Cantoneira	750	15.0	3.5	50.0	4.0
84	2450	14700	14.0	Cantoneira	700	22.0	3.5	50.0	6.0
85	2400	4800	30.0	Cantoneira	600	9.0	4.0	20.0	2.0
86	2200	8800	27.5	Cantoneira	550	17.0	4.0	20.0	4.0
87	2000	12000	25.0	Cantoneira	500	25.0	4.0	20.0	6.0
88	2600	5200	26.0	Cantoneira	650	9.0	4.0	25.0	2.0
89	2400	9600	24.0	Cantoneira	600	17.0	4.0	25.0	4.0
90	2200	13200	22.0	Cantoneira	550	25.0	4.0	25.0	6.0
91	2800	5600	23.3	Cantoneira	700	9.0	4.0	30.0	2.0
92	2600	10400	21.7	Cantoneira	650	17.0	4.0	30.0	4.0
93	2400	14400	20.0	Cantoneira	600	25.0	4.0	30.0	6.0
94	3000	6000	21.4	Cantoneira	750	9.0	4.0	35.0	2.0
95	2800	11200	20.0	Cantoneira	700	17.0	4.0	35.0	4.0
96	2600	15600	18.6	Cantoneira	650	25.0	4.0	35.0	6.0
97	3000	6000	18.8	Cantoneira	750	9.0	4.0	40.0	2.0
98	2800	11200	17.5	Cantoneira	700	17.0	4.0	40.0	4.0
99	2600	15600	16.3	Cantoneira	650	25.0	4.0	40.0	6.0
100	2800	5600	15.6	Cantoneira	700	9.0	4.0	45.0	2.0
101	2600	10400	14.4	Cantoneira	650	17.0	4.0	45.0	4.0
102	2400	14400	13.3	Cantoneira	600	25.0	4.0	45.0	6.0
103	3000	6000	15.0	Cantoneira	750	9.0	4.0	50.0	2.0
104	2800	11200	14.0	Cantoneira	700	17.0	4.0	50.0	4.0
105	2600	15600	13.0	Cantoneira	650	25.0	4.0	50.0	6.0

Modelo	Altura do painel (mm)	Largura do painel (mm)	Espessura da placa (mm)	Tipo de enrijecedor	Espaçamento entre enrijecedores (mm)	Número de enrijecedores	Razão de aspecto (α)	Esbeltez (s/t)	Largura/altura do painel enrijecido
106	2475	4950	27.5	Cantoneira	550	10.0	4.5	20.0	2.0
107	2250	9000	25.0	Cantoneira	500	19.0	4.5	20.0	4.0
108	2025	12150	22.5	Cantoneira	450	28.0	4.5	20.0	6.0
109	2700	5400	24.0	Cantoneira	600	10.0	4.5	25.0	2.0
110	2475	9900	22.0	Cantoneira	550	19.0	4.5	25.0	4.0
111	2250	13500	20.0	Cantoneira	500	28.0	4.5	25.0	6.0
112	2925	5850	21.7	Cantoneira	650	10.0	4.5	30.0	2.0
113	2700	10800	20.0	Cantoneira	600	19.0	4.5	30.0	4.0
114	2475	14850	18.3	Cantoneira	550	28.0	4.5	30.0	6.0
115	2700	5400	17.1	Cantoneira	600	10.0	4.5	35.0	2.0
116	2475	9900	15.7	Cantoneira	550	19.0	4.5	35.0	4.0
117	2250	13500	14.3	Cantoneira	500	28.0	4.5	35.0	6.0
118	2925	5850	16.3	Cantoneira	650	10.0	4.5	40.0	2.0
119	2700	10800	15.0	Cantoneira	600	19.0	4.5	40.0	4.0
120	2475	14850	13.8	Cantoneira	550	28.0	4.5	40.0	6.0
121	2700	5400	13.3	Cantoneira	600	10.0	4.5	45.0	2.0
122	2475	9900	12.2	Cantoneira	550	19.0	4.5	45.0	4.0
123	2250	13500	11.1	Cantoneira	500	28.0	4.5	45.0	6.0
124	2925	5850	13.0	Cantoneira	650	10.0	4.5	50.0	2.0
125	2700	10800	12.0	Cantoneira	600	19.0	4.5	50.0	4.0
126	2475	14850	11.0	Cantoneira	550	28.0	4.5	50.0	6.0
127	2200	4400	20.0	Cantoneira	400	12.0	5.5	20.0	2.0
128	1925	7700	17.5	Cantoneira	350	23.0	5.5	20.0	4.0
129	1650	9900	15.0	Cantoneira	300	34.0	5.5	20.0	6.0
130	2475	4950	18.0	Cantoneira	450	12.0	5.5	25.0	2.0
131	2200	8800	16.0	Cantoneira	400	23.0	5.5	25.0	4.0
132	1925	11550	14.0	Cantoneira	350	34.0	5.5	25.0	6.0
133	2750	5500	16.7	Cantoneira	500	12.0	5.5	30.0	2.0
134	2475	9900	15.0	Cantoneira	450	23.0	5.5	30.0	4.0
135	2200	13200	13.3	Cantoneira	400	34.0	5.5	30.0	6.0
136	3025	6050	15.7	Cantoneira	550	12.0	5.5	35.0	2.0
137	2750	11000	14.3	Cantoneira	500	23.0	5.5	35.0	4.0
138	2475	14850	12.9	Cantoneira	450	34.0	5.5	35.0	6.0
139	2750	5500	12.5	Cantoneira	500	12.0	5.5	40.0	2.0
140	2475	9900	11.3	Cantoneira	450	23.0	5.5	40.0	4.0
141	2200	13200	10.0	Cantoneira	400	34.0	5.5	40.0	6.0
142	3025	6050	12.2	Cantoneira	550	12.0	5.5	45.0	2.0
143	2750	11000	11.1	Cantoneira	500	23.0	5.5	45.0	4.0
144	2475	14850	10.0	Cantoneira	450	34.0	5.5	45.0	6.0
145	3025	6050	11.0	Cantoneira	550	12.0	5.5	50.0	2.0
146	2750	11000	10.0	Cantoneira	500	23.0	5.5	50.0	4.0
147	2475	14850	9.0	Cantoneira	450	34.0	5.5	50.0	6.0

Modelo	Altura do painel (mm)	Largura do painel (mm)	Espessura da placa (mm)	Tipo de enrijecedor	Espaçamento entre enrijecedores (mm)	Número de enrijecedores	Razão de aspecto (α)	Esbeltez (s/t)	Largura/altura do painel enrijecido
148	2000	4000	50.0	Tê	1000	5.0	2.0	20.0	2.0
149	1900	7600	47.5	Tê	950	9.0	2.0	20.0	4.0
150	1800	10800	45.0	Tê	900	13.0	2.0	20.0	6.0
151	2500	5000	50.0	Tê	1250	5.0	2.0	25.0	2.0
152	2400	9600	48.0	Tê	1200	9.0	2.0	25.0	4.0
153	2300	13800	46.0	Tê	1150	13.0	2.0	25.0	6.0
154	2800	5600	46.7	Tê	1400	5.0	2.0	30.0	2.0
155	2700	10800	45.0	Tê	1350	9.0	2.0	30.0	4.0
156	2600	15600	43.3	Tê	1300	13.0	2.0	30.0	6.0
157	2800	5600	40.0	Tê	1400	5.0	2.0	35.0	2.0
158	2700	10800	38.6	Tê	1350	9.0	2.0	35.0	4.0
159	2600	15600	37.1	Tê	1300	13.0	2.0	35.0	6.0
160	2500	5000	31.3	Tê	1250	5.0	2.0	40.0	2.0
161	2400	9600	30.0	Tê	1200	9.0	2.0	40.0	4.0
162	2300	13800	28.8	Tê	1150	13.0	2.0	40.0	6.0
163	2400	4800	26.7	Tê	1200	5.0	2.0	45.0	2.0
164	2300	9200	25.6	Tê	1150	9.0	2.0	45.0	4.0
165	2200	13200	24.4	Tê	1100	13.0	2.0	45.0	6.0
166	2200	4400	22.0	Tê	1100	5.0	2.0	50.0	2.0
167	2000	8000	20.0	Tê	1000	9.0	2.0	50.0	4.0
168	1900	11400	19.0	Tê	950	13.0	2.0	50.0	6.0
169	2500	5000	50.0	Tê	1000	6.0	2.5	20.0	2.0
170	2375	9500	47.5	Tê	950	11.0	2.5	20.0	4.0
171	2250	13500	45.0	Tê	900	16.0	2.5	20.0	6.0
172	2750	5500	44.0	Tê	1100	6.0	2.5	25.0	2.0
173	2625	10500	42.0	Tê	1050	11.0	2.5	25.0	4.0
174	2500	15000	40.0	Tê	1000	16.0	2.5	25.0	6.0
175	2500	5000	33.3	Tê	1000	6.0	2.5	30.0	2.0
176	2375	9500	31.7	Tê	950	11.0	2.5	30.0	4.0
177	2250	13500	30.0	Tê	900	16.0	2.5	30.0	6.0
178	2500	5000	28.6	Tê	1000	6.0	2.5	35.0	2.0
179	2375	9500	27.1	Tê	950	11.0	2.5	35.0	4.0
180	2250	13500	25.7	Tê	900	16.0	2.5	35.0	6.0
181	2625	5250	26.3	Tê	1050	6.0	2.5	40.0	2.0
182	2500	10000	25.0	Tê	1000	11.0	2.5	40.0	4.0
183	2375	14250	23.8	Tê	950	16.0	2.5	40.0	6.0
184	2750	5500	24.4	Tê	1100	6.0	2.5	45.0	2.0
185	2625	10500	23.3	Tê	1050	11.0	2.5	45.0	4.0
186	2500	15000	22.2	Tê	1000	16.0	2.5	45.0	6.0
187	2625	5250	21.0	Tê	1050	6.0	2.5	50.0	2.0
188	2500	10000	20.0	Tê	1000	11.0	2.5	50.0	4.0
189	2375	14250	19.0	Tê	950	16.0	2.5	50.0	6.0

Modelo	Altura do painel (mm)	Largura do painel (mm)	Espessura da placa (mm)	Tipo de enrijecedor	Espaçamento entre enrijecedores (mm)	Número de enrijecedores	Razão de aspecto (α)	Esbeltez (s/t)	Largura/altura do painel enrijecido
190	2250	4500	37.5	Tê	750	7.0	3.0	20.0	2.0
191	2100	8400	35.0	Tê	700	13.0	3.0	20.0	4.0
192	1950	11700	32.5	Tê	650	19.0	3.0	20.0	6.0
193	2400	4800	32.0	Tê	800	7.0	3.0	25.0	2.0
194	2250	9000	30.0	Tê	750	13.0	3.0	25.0	4.0
195	2100	12600	28.0	Tê	700	19.0	3.0	25.0	6.0
196	2550	5100	28.3	Tê	850	7.0	3.0	30.0	2.0
197	2400	9600	26.7	Tê	800	13.0	3.0	30.0	4.0
198	2250	13500	25.0	Tê	750	19.0	3.0	30.0	6.0
199	2700	5400	25.7	Tê	900	7.0	3.0	35.0	2.0
200	2550	10200	24.3	Tê	850	13.0	3.0	35.0	4.0
201	2400	14400	22.9	Tê	800	19.0	3.0	35.0	6.0
202	2850	5700	23.8	Tê	950	7.0	3.0	40.0	2.0
203	2700	10800	22.5	Tê	900	13.0	3.0	40.0	4.0
204	2550	15300	21.3	Tê	850	19.0	3.0	40.0	6.0
205	2700	5400	20.0	Tê	900	7.0	3.0	45.0	2.0
206	2550	10200	18.9	Tê	850	13.0	3.0	45.0	4.0
207	2400	14400	17.8	Tê	800	19.0	3.0	45.0	6.0
208	2850	5700	19.0	Tê	950	7.0	3.0	50.0	2.0
209	2700	10800	18.0	Tê	900	13.0	3.0	50.0	4.0
210	2550	15300	17.0	Tê	850	19.0	3.0	50.0	6.0
211	2100	4200	30.0	Tê	600	8.0	3.5	20.0	2.0
212	1925	7700	27.5	Tê	550	15.0	3.5	20.0	4.0
213	1750	10500	25.0	Tê	500	22.0	3.5	20.0	6.0
214	2275	4550	26.0	Tê	650	8.0	3.5	25.0	2.0
215	2100	8400	24.0	Tê	600	15.0	3.5	25.0	4.0
216	1925	11550	22.0	Tê	550	22.0	3.5	25.0	6.0
217	2450	4900	23.3	Tê	700	8.0	3.5	30.0	2.0
218	2275	9100	21.7	Tê	650	15.0	3.5	30.0	4.0
219	2100	12600	20.0	Tê	600	22.0	3.5	30.0	6.0
220	2625	5250	21.4	Tê	750	8.0	3.5	35.0	2.0
221	2450	9800	20.0	Tê	700	15.0	3.5	35.0	4.0
222	2275	13650	18.6	Tê	650	22.0	3.5	35.0	6.0
223	2800	5600	20.0	Tê	800	8.0	3.5	40.0	2.0
224	2625	10500	18.8	Tê	750	15.0	3.5	40.0	4.0
225	2450	14700	17.5	Tê	700	22.0	3.5	40.0	6.0
226	2975	5950	18.9	Tê	850	8.0	3.5	45.0	2.0
227	2800	11200	17.8	Tê	800	15.0	3.5	45.0	4.0
228	2625	15750	16.7	Tê	750	22.0	3.5	45.0	6.0
229	2800	5600	16.0	Tê	800	8.0	3.5	50.0	2.0
230	2625	10500	15.0	Tê	750	15.0	3.5	50.0	4.0
231	2450	14700	14.0	Tê	700	22.0	3.5	50.0	6.0

Modelo	Altura do painel (mm)	Largura do painel (mm)	Espessura da placa (mm)	Tipo de enrijecedor	Espaçamento entre enrijecedores (mm)	Número de enrijecedores	Razão de aspecto (α)	Esbeltez (s/t)	Largura/altura do painel enrijecido
232	2400	4800	30.0	Tê	600	9.0	4.0	20.0	2.0
233	2200	8800	27.5	Tê	550	17.0	4.0	20.0	4.0
234	2000	12000	25.0	Tê	500	25.0	4.0	20.0	6.0
235	2600	5200	26.0	Tê	650	9.0	4.0	25.0	2.0
236	2400	9600	24.0	Tê	600	17.0	4.0	25.0	4.0
237	2200	13200	22.0	Tê	550	25.0	4.0	25.0	6.0
238	2800	5600	23.3	Tê	700	9.0	4.0	30.0	2.0
239	2600	10400	21.7	Tê	650	17.0	4.0	30.0	4.0
240	2400	14400	20.0	Tê	600	25.0	4.0	30.0	6.0
241	3000	6000	21.4	Tê	750	9.0	4.0	35.0	2.0
242	2800	11200	20.0	Tê	700	17.0	4.0	35.0	4.0
243	2600	15600	18.6	Tê	650	25.0	4.0	35.0	6.0
244	3000	6000	18.8	Tê	750	9.0	4.0	40.0	2.0
245	2800	11200	17.5	Tê	700	17.0	4.0	40.0	4.0
246	2600	15600	16.3	Tê	650	25.0	4.0	40.0	6.0
247	2800	5600	15.6	Tê	700	9.0	4.0	45.0	2.0
248	2600	10400	14.4	Tê	650	17.0	4.0	45.0	4.0
249	2400	14400	13.3	Tê	600	25.0	4.0	45.0	6.0
250	3000	6000	15.0	Tê	750	9.0	4.0	50.0	2.0
251	2800	11200	14.0	Tê	700	17.0	4.0	50.0	4.0
252	2600	15600	13.0	Tê	650	25.0	4.0	50.0	6.0
253	2475	4950	27.5	Tê	550	10.0	4.5	20.0	2.0
254	2250	9000	25.0	Tê	500	19.0	4.5	20.0	4.0
255	2025	12150	22.5	Tê	450	28.0	4.5	20.0	6.0
256	2700	5400	24.0	Tê	600	10.0	4.5	25.0	2.0
257	2475	9900	22.0	Tê	550	19.0	4.5	25.0	4.0
258	2250	13500	20.0	Tê	500	28.0	4.5	25.0	6.0
259	2925	5850	21.7	Tê	650	10.0	4.5	30.0	2.0
260	2700	10800	20.0	Tê	600	19.0	4.5	30.0	4.0
261	2475	14850	18.3	Tê	550	28.0	4.5	30.0	6.0
262	2700	5400	17.1	Tê	600	10.0	4.5	35.0	2.0
263	2475	9900	15.7	Tê	550	19.0	4.5	35.0	4.0
264	2250	13500	14.3	Tê	500	28.0	4.5	35.0	6.0
265	2925	5850	16.3	Tê	650	10.0	4.5	40.0	2.0
266	2700	10800	15.0	Tê	600	19.0	4.5	40.0	4.0
267	2475	14850	13.8	Tê	550	28.0	4.5	40.0	6.0
268	2700	5400	13.3	Tê	600	10.0	4.5	45.0	2.0
269	2475	9900	12.2	Tê	550	19.0	4.5	45.0	4.0
270	2250	13500	11.1	Tê	500	28.0	4.5	45.0	6.0
271	2925	5850	13.0	Tê	650	10.0	4.5	50.0	2.0
272	2700	10800	12.0	Tê	600	19.0	4.5	50.0	4.0
273	2475	14850	11.0	Tê	550	28.0	4.5	50.0	6.0

Modelo	Altura do painel (mm)	Largura do painel (mm)	Espessura da placa (mm)	Tipo de enrijecedor	Espaçamento entre enrijecedores (mm)	Número de enrijecedores	Razão de aspecto (α)	Esbeltez (s/t)	Largura/altura do painel enrijecido
274	2200	4400	20.0	Tê	400	12.0	5.5	20.0	2.0
275	1925	7700	17.5	Tê	350	23.0	5.5	20.0	4.0
276	1650	9900	15.0	Tê	300	34.0	5.5	20.0	6.0
277	2475	4950	18.0	Tê	450	12.0	5.5	25.0	2.0
278	2200	8800	16.0	Tê	400	23.0	5.5	25.0	4.0
279	1925	11550	14.0	Tê	350	34.0	5.5	25.0	6.0
280	2750	5500	16.7	Tê	500	12.0	5.5	30.0	2.0
281	2475	9900	15.0	Tê	450	23.0	5.5	30.0	4.0
282	2200	13200	13.3	Tê	400	34.0	5.5	30.0	6.0
283	3025	6050	15.7	Tê	550	12.0	5.5	35.0	2.0
284	2750	11000	14.3	Tê	500	23.0	5.5	35.0	4.0
285	2475	14850	12.9	Tê	450	34.0	5.5	35.0	6.0
286	2750	5500	12.5	Tê	500	12.0	5.5	40.0	2.0
287	2475	9900	11.3	Tê	450	23.0	5.5	40.0	4.0
288	2200	13200	10.0	Tê	400	34.0	5.5	40.0	6.0
289	3025	6050	12.2	Tê	550	12.0	5.5	45.0	2.0
290	2750	11000	11.1	Tê	500	23.0	5.5	45.0	4.0
291	2475	14850	10.0	Tê	450	34.0	5.5	45.0	6.0
292	3025	6050	11.0	Tê	550	12.0	5.5	50.0	2.0
293	2750	11000	10.0	Tê	500	23.0	5.5	50.0	4.0
294	2475	14850	9.0	Tê	450	34.0	5.5	50.0	6.0
295	2000	4000	50.0	Barra chata	1000	5.0	2.0	20.0	2.0
296	1900	7600	47.5	Barra chata	950	9.0	2.0	20.0	4.0
297	1800	10800	45.0	Barra chata	900	13.0	2.0	20.0	6.0
298	2500	5000	50.0	Barra chata	1250	5.0	2.0	25.0	2.0
299	2400	9600	48.0	Barra chata	1200	9.0	2.0	25.0	4.0
300	2300	13800	46.0	Barra chata	1150	13.0	2.0	25.0	6.0
301	2800	5600	46.7	Barra chata	1400	5.0	2.0	30.0	2.0
302	2700	10800	45.0	Barra chata	1350	9.0	2.0	30.0	4.0
303	2600	15600	43.3	Barra chata	1300	13.0	2.0	30.0	6.0
304	2800	5600	40.0	Barra chata	1400	5.0	2.0	35.0	2.0
305	2700	10800	38.6	Barra chata	1350	9.0	2.0	35.0	4.0
306	2600	15600	37.1	Barra chata	1300	13.0	2.0	35.0	6.0
307	2500	5000	31.3	Barra chata	1250	5.0	2.0	40.0	2.0
308	2400	9600	30.0	Barra chata	1200	9.0	2.0	40.0	4.0
309	2300	13800	28.8	Barra chata	1150	13.0	2.0	40.0	6.0
310	2400	4800	26.7	Barra chata	1200	5.0	2.0	45.0	2.0
311	2300	9200	25.6	Barra chata	1150	9.0	2.0	45.0	4.0
312	2200	13200	24.4	Barra chata	1100	13.0	2.0	45.0	6.0
313	2200	4400	22.0	Barra chata	1100	5.0	2.0	50.0	2.0
314	2000	8000	20.0	Barra chata	1000	9.0	2.0	50.0	4.0
315	1900	11400	19.0	Barra chata	950	13.0	2.0	50.0	6.0

Modelo	Altura do painel (mm)	Largura do painel (mm)	Espessura da placa (mm)	Tipo de enrijecedor	Espaçamento entre enrijecedores (mm)	Número de enrijecedores	Razão de aspecto (α)	Esbeltez (s/t)	Largura/altura do painel enrijecido
316	2500	5000	50.0	Barra chata	1000	6.0	2.5	20.0	2.0
317	2375	9500	47.5	Barra chata	950	11.0	2.5	20.0	4.0
318	2250	13500	45.0	Barra chata	900	16.0	2.5	20.0	6.0
319	2750	5500	44.0	Barra chata	1100	6.0	2.5	25.0	2.0
320	2625	10500	42.0	Barra chata	1050	11.0	2.5	25.0	4.0
321	2500	15000	40.0	Barra chata	1000	16.0	2.5	25.0	6.0
322	2500	5000	33.3	Barra chata	1000	6.0	2.5	30.0	2.0
323	2375	9500	31.7	Barra chata	950	11.0	2.5	30.0	4.0
324	2250	13500	30.0	Barra chata	900	16.0	2.5	30.0	6.0
325	2500	5000	28.6	Barra chata	1000	6.0	2.5	35.0	2.0
326	2375	9500	27.1	Barra chata	950	11.0	2.5	35.0	4.0
327	2250	13500	25.7	Barra chata	900	16.0	2.5	35.0	6.0
328	2625	5250	26.3	Barra chata	1050	6.0	2.5	40.0	2.0
329	2500	10000	25.0	Barra chata	1000	11.0	2.5	40.0	4.0
330	2375	14250	23.8	Barra chata	950	16.0	2.5	40.0	6.0
331	2750	5500	24.4	Barra chata	1100	6.0	2.5	45.0	2.0
332	2625	10500	23.3	Barra chata	1050	11.0	2.5	45.0	4.0
333	2500	15000	22.2	Barra chata	1000	16.0	2.5	45.0	6.0
334	2625	5250	21.0	Barra chata	1050	6.0	2.5	50.0	2.0
335	2500	10000	20.0	Barra chata	1000	11.0	2.5	50.0	4.0
336	2375	14250	19.0	Barra chata	950	16.0	2.5	50.0	6.0
337	2250	4500	37.5	Barra chata	750	7.0	3.0	20.0	2.0
338	2100	8400	35.0	Barra chata	700	13.0	3.0	20.0	4.0
339	1950	11700	32.5	Barra chata	650	19.0	3.0	20.0	6.0
340	2400	4800	32.0	Barra chata	800	7.0	3.0	25.0	2.0
341	2250	9000	30.0	Barra chata	750	13.0	3.0	25.0	4.0
342	2100	12600	28.0	Barra chata	700	19.0	3.0	25.0	6.0
343	2550	5100	28.3	Barra chata	850	7.0	3.0	30.0	2.0
344	2400	9600	26.7	Barra chata	800	13.0	3.0	30.0	4.0
345	2250	13500	25.0	Barra chata	750	19.0	3.0	30.0	6.0
346	2700	5400	25.7	Barra chata	900	7.0	3.0	35.0	2.0
347	2550	10200	24.3	Barra chata	850	13.0	3.0	35.0	4.0
348	2400	14400	22.9	Barra chata	800	19.0	3.0	35.0	6.0
349	2850	5700	23.8	Barra chata	950	7.0	3.0	40.0	2.0
350	2700	10800	22.5	Barra chata	900	13.0	3.0	40.0	4.0
351	2550	15300	21.3	Barra chata	850	19.0	3.0	40.0	6.0
352	2700	5400	20.0	Barra chata	900	7.0	3.0	45.0	2.0
353	2550	10200	18.9	Barra chata	850	13.0	3.0	45.0	4.0
354	2400	14400	17.8	Barra chata	800	19.0	3.0	45.0	6.0
355	2850	5700	19.0	Barra chata	950	7.0	3.0	50.0	2.0
356	2700	10800	18.0	Barra chata	900	13.0	3.0	50.0	4.0
357	2550	15300	17.0	Barra chata	850	19.0	3.0	50.0	6.0

Modelo	Altura do painel (mm)	Largura do painel (mm)	Espessura da placa (mm)	Tipo de enrijecedor	Espaçamento entre enrijecedores (mm)	Número de enrijecedores	Razão de aspecto (α)	Esbeltez (s/t)	Largura/altura do painel enrijecido
358	2100	4200	30.0	Barra chata	600	8.0	3.5	20.0	2.0
359	1925	7700	27.5	Barra chata	550	15.0	3.5	20.0	4.0
360	1750	10500	25.0	Barra chata	500	22.0	3.5	20.0	6.0
361	2275	4550	26.0	Barra chata	650	8.0	3.5	25.0	2.0
362	2100	8400	24.0	Barra chata	600	15.0	3.5	25.0	4.0
363	1925	11550	22.0	Barra chata	550	22.0	3.5	25.0	6.0
364	2450	4900	23.3	Barra chata	700	8.0	3.5	30.0	2.0
365	2275	9100	21.7	Barra chata	650	15.0	3.5	30.0	4.0
366	2100	12600	20.0	Barra chata	600	22.0	3.5	30.0	6.0
367	2625	5250	21.4	Barra chata	750	8.0	3.5	35.0	2.0
368	2450	9800	20.0	Barra chata	700	15.0	3.5	35.0	4.0
369	2275	13650	18.6	Barra chata	650	22.0	3.5	35.0	6.0
370	2800	5600	20.0	Barra chata	800	8.0	3.5	40.0	2.0
371	2625	10500	18.8	Barra chata	750	15.0	3.5	40.0	4.0
372	2450	14700	17.5	Barra chata	700	22.0	3.5	40.0	6.0
373	2975	5950	18.9	Barra chata	850	8.0	3.5	45.0	2.0
374	2800	11200	17.8	Barra chata	800	15.0	3.5	45.0	4.0
375	2625	15750	16.7	Barra chata	750	22.0	3.5	45.0	6.0
376	2800	5600	16.0	Barra chata	800	8.0	3.5	50.0	2.0
377	2625	10500	15.0	Barra chata	750	15.0	3.5	50.0	4.0
378	2450	14700	14.0	Barra chata	700	22.0	3.5	50.0	6.0
379	2400	4800	30.0	Barra chata	600	9.0	4.0	20.0	2.0
380	2200	8800	27.5	Barra chata	550	17.0	4.0	20.0	4.0
381	2000	12000	25.0	Barra chata	500	25.0	4.0	20.0	6.0
382	2600	5200	26.0	Barra chata	650	9.0	4.0	25.0	2.0
383	2400	9600	24.0	Barra chata	600	17.0	4.0	25.0	4.0
384	2200	13200	22.0	Barra chata	550	25.0	4.0	25.0	6.0
385	2800	5600	23.3	Barra chata	700	9.0	4.0	30.0	2.0
386	2600	10400	21.7	Barra chata	650	17.0	4.0	30.0	4.0
387	2400	14400	20.0	Barra chata	600	25.0	4.0	30.0	6.0
388	3000	6000	21.4	Barra chata	750	9.0	4.0	35.0	2.0
389	2800	11200	20.0	Barra chata	700	17.0	4.0	35.0	4.0
390	2600	15600	18.6	Barra chata	650	25.0	4.0	35.0	6.0
391	3000	6000	18.8	Barra chata	750	9.0	4.0	40.0	2.0
392	2800	11200	17.5	Barra chata	700	17.0	4.0	40.0	4.0
393	2600	15600	16.3	Barra chata	650	25.0	4.0	40.0	6.0
394	2800	5600	15.6	Barra chata	700	9.0	4.0	45.0	2.0
395	2600	10400	14.4	Barra chata	650	17.0	4.0	45.0	4.0
396	2400	14400	13.3	Barra chata	600	25.0	4.0	45.0	6.0
397	3000	6000	15.0	Barra chata	750	9.0	4.0	50.0	2.0
398	2800	11200	14.0	Barra chata	700	17.0	4.0	50.0	4.0
399	2600	15600	13.0	Barra chata	650	25.0	4.0	50.0	6.0

Modelo	Altura do painel (mm)	Largura do painel (mm)	Espessura da placa (mm)	Tipo de enrijecedor	Espaçamento entre enrijecedores (mm)	Número de enrijecedores	Razão de aspecto (α)	Esbeltez (s/t)	Largura/altura do painel enrijecido
400	2475	4950	27.5	Barra chata	550	10.0	4.5	20.0	2.0
401	2250	9000	25.0	Barra chata	500	19.0	4.5	20.0	4.0
402	2025	12150	22.5	Barra chata	450	28.0	4.5	20.0	6.0
403	2700	5400	24.0	Barra chata	600	10.0	4.5	25.0	2.0
404	2475	9900	22.0	Barra chata	550	19.0	4.5	25.0	4.0
405	2250	13500	20.0	Barra chata	500	28.0	4.5	25.0	6.0
406	2925	5850	21.7	Barra chata	650	10.0	4.5	30.0	2.0
407	2700	10800	20.0	Barra chata	600	19.0	4.5	30.0	4.0
408	2475	14850	18.3	Barra chata	550	28.0	4.5	30.0	6.0
409	2700	5400	17.1	Barra chata	600	10.0	4.5	35.0	2.0
410	2475	9900	15.7	Barra chata	550	19.0	4.5	35.0	4.0
411	2250	13500	14.3	Barra chata	500	28.0	4.5	35.0	6.0
412	2925	5850	16.3	Barra chata	650	10.0	4.5	40.0	2.0
413	2700	10800	15.0	Barra chata	600	19.0	4.5	40.0	4.0
414	2475	14850	13.8	Barra chata	550	28.0	4.5	40.0	6.0
415	2700	5400	13.3	Barra chata	600	10.0	4.5	45.0	2.0
416	2475	9900	12.2	Barra chata	550	19.0	4.5	45.0	4.0
417	2250	13500	11.1	Barra chata	500	28.0	4.5	45.0	6.0
418	2925	5850	13.0	Barra chata	650	10.0	4.5	50.0	2.0
419	2700	10800	12.0	Barra chata	600	19.0	4.5	50.0	4.0
420	2475	14850	11.0	Barra chata	550	28.0	4.5	50.0	6.0
421	2200	4400	20.0	Barra chata	400	12.0	5.5	20.0	2.0
422	1925	7700	17.5	Barra chata	350	23.0	5.5	20.0	4.0
423	1650	9900	15.0	Barra chata	300	34.0	5.5	20.0	6.0
424	2475	4950	18.0	Barra chata	450	12.0	5.5	25.0	2.0
425	2200	8800	16.0	Barra chata	400	23.0	5.5	25.0	4.0
426	1925	11550	14.0	Barra chata	350	34.0	5.5	25.0	6.0
427	2750	5500	16.7	Barra chata	500	12.0	5.5	30.0	2.0
428	2475	9900	15.0	Barra chata	450	23.0	5.5	30.0	4.0
429	2200	13200	13.3	Barra chata	400	34.0	5.5	30.0	6.0
430	3025	6050	15.7	Barra chata	550	12.0	5.5	35.0	2.0
431	2750	11000	14.3	Barra chata	500	23.0	5.5	35.0	4.0
432	2475	14850	12.9	Barra chata	450	34.0	5.5	35.0	6.0
433	2750	5500	12.5	Barra chata	500	12.0	5.5	40.0	2.0
434	2475	9900	11.3	Barra chata	450	23.0	5.5	40.0	4.0
435	2200	13200	10.0	Barra chata	400	34.0	5.5	40.0	6.0
436	3025	6050	12.2	Barra chata	550	12.0	5.5	45.0	2.0
437	2750	11000	11.1	Barra chata	500	23.0	5.5	45.0	4.0
438	2475	14850	10.0	Barra chata	450	34.0	5.5	45.0	6.0
439	3025	6050	11.0	Barra chata	550	12.0	5.5	50.0	2.0
440	2750	11000	10.0	Barra chata	500	23.0	5.5	50.0	4.0
441	2475	14850	9.0	Barra chata	450	34.0	5.5	50.0	6.0

APÊNDICE B – PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DOS ENRIJECEDORES

Este apêndice apresenta as propriedades geométricas dos enrijecedores dos painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável que foram objeto da análise paramétrica realizada neste trabalho de pesquisa. Adicionalmente, podem ser visualizados os momentos de inércia dos enrijecedores associados as suas placas colaborantes e os respectivos momentos de inércia mínimos preconizados pelo ABS [1] para o conjunto placa-enrijecedor.

Tabela 13 – Propriedades geométricas dos enrijecedores

Modelo	d_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	Centróide em relação ao eixo y (mm)	δ	γ_0	Momento de inércia (cm ⁴)	Momento de inércia mínimo I_0 (cm ⁴)
1	300	13	90	17	46.5	0.109	18.270	30364.5	20913.4
2	300	13	90	17	47.2	0.120	18.458	29658.4	17209.1
3	300	13	90	17	48.2	0.134	18.678	28952.5	14027.4
4	300	13	90	17	42.6	0.087	17.922	31097.2	25644.5
5	300	13	90	17	42.8	0.094	18.041	30520.7	21924.8
6	300	13	90	17	43.3	0.103	18.175	29952.5	18630.2
7	300	13	90	17	40.1	0.083	17.862	30699.0	23273.4
8	300	13	90	17	40.3	0.089	17.963	30220.6	20235.6
9	300	13	90	17	40.7	0.096	18.075	29747.8	17508.8
10	300	13	90	17	39.0	0.097	18.084	29245.2	14838.0
11	300	13	90	17	39.5	0.104	18.201	28842.5	12912.2
12	300	13	90	17	40.1	0.112	18.332	28437.7	11182.8
13	300	13	90	17	41.3	0.139	18.757	27088.2	6552.2
14	300	13	90	17	42.5	0.151	18.946	26699.9	5621.3
15	300	13	90	17	43.9	0.164	19.160	26296.8	4795.0
16	300	13	90	17	43.5	0.170	19.247	25962.0	4010.9
17	300	13	90	17	45.1	0.185	19.489	25571.0	3425.4
18	300	13	90	17	47.0	0.202	19.763	25159.1	2907.9
19	300	13	90	17	48.7	0.224	20.122	24544.9	2158.3
20	300	13	90	17	53.7	0.272	20.876	23643.6	1529.4
21	300	13	90	17	56.7	0.301	21.346	23142.5	1273.7

Modelo	d_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	Centróide em relação ao eixo y (mm)	δ	γ_0	Momento de inércia (cm ⁴)	Momento de inércia mínimo i_0 (cm ⁴)
22	300	13	110	17	48.4	0.115	29.264	33654.5	33498.1
23	300	13	110	17	49.3	0.128	29.576	32879.5	27575.0
24	300	13	110	17	50.4	0.142	29.941	32099.7	22486.4
25	300	13	110	17	45.8	0.119	29.359	32607.7	25192.7
26	300	13	110	17	46.7	0.131	29.650	31983.3	21122.2
27	300	13	110	17	47.9	0.144	29.985	31348.9	17573.8
28	300	13	110	17	48.8	0.173	30.706	29796.1	10414.6
29	300	13	110	17	50.8	0.192	31.174	29196.3	8611.9
30	300	13	110	17	53.1	0.214	31.722	28563.5	7058.9
31	300	13	110	17	50.5	0.202	31.428	28624.9	6712.5
32	300	13	110	17	52.9	0.224	31.973	28045.8	5562.3
33	300	13	110	17	55.6	0.249	32.612	27427.9	4570.0
34	300	13	110	17	50.3	0.209	31.613	28214.1	5498.1
35	300	13	110	17	52.6	0.231	32.149	27677.8	4600.1
36	300	13	110	17	55.3	0.256	32.772	27105.2	3819.4
37	300	13	110	17	50.0	0.215	31.744	27911.3	4670.5
38	300	13	110	17	52.3	0.236	32.267	27410.9	3941.4
39	300	13	110	17	54.9	0.260	32.870	26876.7	3303.3
40	300	13	110	17	54.4	0.262	32.921	26714.5	2931.5
41	300	13	110	17	57.3	0.289	33.591	26178.0	2460.9
42	300	13	110	17	60.6	0.320	34.371	25600.8	2050.9
43	300	13	110	17	56.2	0.205	45.123	29632.1	16342.8
44	300	13	110	17	59.2	0.236	46.215	28726.4	12701.8
45	300	13	110	17	62.9	0.273	47.570	27753.8	9720.1
46	300	13	110	17	56.0	0.225	45.851	28571.4	11006.9
47	300	13	110	17	59.2	0.256	46.969	27772.7	8709.9
48	300	13	110	17	63.0	0.294	48.335	26909.3	6801.6
49	300	13	110	17	55.8	0.240	46.362	27889.9	8208.3
50	300	13	110	17	59.0	0.270	47.474	27166.7	6595.2
51	300	13	110	17	62.8	0.308	48.815	26383.8	5238.6
52	300	13	110	17	55.6	0.249	46.712	27427.9	6546.0
53	300	13	110	17	58.8	0.280	47.799	26763.8	5329.3
54	300	13	110	17	62.5	0.316	49.097	26045.4	4295.2
55	300	13	110	17	55.3	0.256	46.943	27105.2	5471.0
56	300	13	110	17	58.4	0.285	47.995	26490.2	4505.7
57	300	13	110	17	61.9	0.319	49.237	25825.8	3677.6
58	300	13	110	17	61.3	0.321	49.277	25685.7	3249.0
59	300	13	110	17	65.2	0.359	50.675	25016.4	2658.3
60	300	13	110	17	69.6	0.406	52.342	24288.4	2154.5
61	300	13	110	17	60.6	0.320	49.245	25600.8	2938.5
62	300	13	110	17	64.2	0.356	50.559	24977.3	2430.2
63	300	13	110	17	68.4	0.399	52.112	24301.3	1992.9

Modelo	d_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	Centróide em relação ao eixo y (mm)	δ	γ_0	Momento de inércia (cm ⁴)	Momento de inércia mínimo i_0 (cm ⁴)
64	300	13	110	17	67.5	0.321	66.262	26695.2	9830.1
65	300	13	110	17	73.2	0.381	69.248	25528.0	7253.5
66	300	13	110	17	80.0	0.462	73.173	24226.7	5235.1
67	300	13	110	17	67.6	0.341	67.285	25966.6	7039.3
68	300	13	110	17	73.0	0.401	70.189	24927.9	5331.3
69	300	13	110	17	79.6	0.477	73.921	23774.0	3964.4
70	300	13	110	17	67.3	0.353	67.865	25529.5	5526.5
71	300	13	110	17	72.5	0.410	70.631	24590.8	4276.2
72	300	13	110	17	78.6	0.481	74.116	23552.9	3257.8
73	300	13	110	17	66.7	0.359	68.147	25263.1	4605.4
74	300	13	110	17	71.7	0.412	70.750	24406.3	3628.2
75	300	13	110	17	77.4	0.478	73.976	23463.4	2820.5
76	300	13	110	17	66.0	0.361	68.226	25104.1	3998.6
77	300	13	110	17	70.7	0.410	70.660	24316.6	3199.0
78	300	13	110	17	76.0	0.471	73.635	23453.6	2529.7
79	300	13	110	17	65.2	0.359	68.165	25016.4	3575.8
80	300	13	110	17	69.6	0.406	70.435	24288.4	2899.2
81	300	13	110	17	74.6	0.462	73.173	23493.8	2326.7
82	300	13	110	17	73.1	0.451	72.643	23566.1	2179.8
83	300	13	110	17	78.3	0.513	75.687	22764.4	1754.4
84	300	13	110	17	84.2	0.589	79.405	21888.8	1396.7
85	300	13	110	17	67.5	0.321	85.316	26695.2	12656.7
86	300	13	110	17	73.2	0.381	89.215	25528.0	9345.0
87	300	13	110	17	80.0	0.462	94.342	24226.7	6749.5
88	300	13	110	17	67.6	0.341	86.651	25966.6	9065.3
89	300	13	110	17	73.0	0.401	90.444	24927.9	6869.8
90	300	13	110	17	79.6	0.477	95.319	23774.0	5112.0
91	300	13	110	17	67.3	0.353	87.409	25529.5	7118.1
92	300	13	110	17	72.5	0.410	91.021	24590.8	5510.7
93	300	13	110	17	78.6	0.481	95.573	23552.9	4201.0
94	300	13	110	17	66.7	0.359	87.777	25263.1	5932.0
95	300	13	110	17	71.7	0.412	91.177	24406.3	4675.8
96	300	13	110	17	77.4	0.478	95.391	23463.4	3636.9
97	300	13	110	17	70.7	0.410	91.060	24316.6	4122.6
98	300	13	110	17	76.0	0.471	94.945	23453.6	3261.8
99	300	13	110	17	82.1	0.546	99.761	22504.9	2548.1
100	300	13	110	17	80.2	0.530	98.713	22624.1	2381.8
101	300	13	110	17	86.6	0.615	104.132	21670.5	1868.0
102	300	13	110	17	93.8	0.721	110.960	20624.6	1445.1
103	300	13	110	17	78.3	0.513	97.625	22764.4	2262.9
104	300	13	110	17	84.2	0.589	102.482	21888.8	1802.6
105	300	13	110	17	90.8	0.683	108.502	20932.0	1418.9

Modelo	d_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	Centróide em relação ao eixo y (mm)	δ	γ_0	Momento de inércia (cm ⁴)	Momento de inércia mínimo i_0 (cm ⁴)
106	300	13	110	17	73.2	0.381	111.349	25528.0	11663.4
107	300	13	110	17	80.0	0.462	117.838	24226.7	8430.5
108	300	13	110	17	88.4	0.570	126.609	22763.0	5942.9
109	300	13	110	17	73.0	0.401	112.905	24927.9	8575.8
110	300	13	110	17	79.6	0.477	119.074	23774.0	6386.0
111	300	13	110	17	87.3	0.577	127.186	22484.6	4658.8
112	300	13	110	17	72.5	0.410	113.635	24590.8	6879.8
113	300	13	110	17	78.6	0.481	119.396	23552.9	5248.2
114	300	13	110	17	85.8	0.572	126.799	22400.1	3935.3
115	300	13	110	17	84.0	0.561	125.887	22421.9	3484.7
116	300	13	110	17	91.6	0.668	134.524	21269.1	2629.2
117	300	13	110	17	100.3	0.808	145.880	19993.6	1947.4
118	300	13	110	17	82.1	0.546	124.697	22504.9	3185.0
119	300	13	110	17	89.1	0.641	132.379	21460.2	2454.8
120	300	13	110	17	97.0	0.763	142.250	20309.7	1862.5
121	300	13	110	17	93.8	0.721	138.870	20624.6	1808.6
122	300	13	110	17	101.9	0.858	149.975	19479.1	1379.1
123	300	13	110	17	111.0	1.039	164.575	18229.5	1033.7
124	300	13	110	17	90.8	0.683	135.759	20932.0	1775.4
125	300	13	110	17	98.3	0.801	145.361	19887.2	1380.1
126	300	13	110	17	106.5	0.954	157.700	18749.6	1057.2
127	300	13	110	17	98.6	0.721	203.165	21108.0	5953.5
128	300	13	110	17	110.7	0.942	229.880	19237.8	3948.8
129	300	13	110	17	124.8	1.282	271.042	17143.0	2513.1
130	300	13	110	17	96.5	0.712	202.087	21039.0	4856.8
131	300	13	110	17	107.3	0.902	224.982	19419.6	3375.6
132	300	13	110	17	119.7	1.178	258.377	17617.4	2272.4
133	300	13	110	17	94.1	0.692	199.674	21116.7	4232.7
134	300	13	110	17	103.8	0.855	219.326	19688.8	3050.4
135	300	13	110	17	114.8	1.082	246.800	18107.6	2142.9
136	300	13	110	17	91.6	0.668	196.673	21269.1	3843.9
137	300	13	110	17	100.3	0.808	213.637	19993.6	2851.9
138	300	13	110	17	110.2	0.997	236.565	18587.0	2071.9
139	300	13	110	17	105.9	0.923	227.600	19045.5	2035.4
140	300	13	110	17	115.9	1.140	253.803	17664.0	1489.2
141	300	13	110	17	126.9	1.443	290.436	16168.8	1063.9
142	300	13	110	17	101.9	0.858	219.753	19479.1	2020.8
143	300	13	110	17	111.0	1.039	241.564	18229.5	1517.2
144	300	13	110	17	120.9	1.282	271.042	16875.8	1116.9
145	300	13	110	17	106.5	0.954	231.293	18749.6	1550.5
146	300	13	110	17	115.6	1.154	255.527	17517.2	1170.0
147	300	13	110	17	125.5	1.425	288.281	16193.1	866.0

Modelo	d_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	Centróide em relação ao eixo y (mm)	δ	γ_0	Momento de inércia (cm ⁴)	Momento de inércia mínimo i_0 (cm ⁴)
148	300	13	180	17	54.9	0.139	18.760	44860.1	21473.9
149	300	13	180	17	56.3	0.154	19.000	43822.4	17714.9
150	300	13	180	17	58.0	0.172	19.282	42759.7	14481.4
151	300	13	180	17	49.5	0.111	18.314	46036.8	26205.0
152	300	13	180	17	50.3	0.121	18.466	45220.5	22441.3
153	300	13	180	17	51.2	0.132	18.637	44398.3	19104.5
154	300	13	180	17	46.7	0.107	18.237	45572.8	23761.6
155	300	13	180	17	47.4	0.115	18.365	44891.9	20689.5
156	300	13	180	17	48.2	0.124	18.509	44205.8	17929.8
157	300	13	180	17	46.5	0.124	18.521	43551.0	15196.7
158	300	13	180	17	47.5	0.134	18.671	42945.9	13245.7
159	300	13	180	17	48.6	0.144	18.839	42326.9	11492.0
160	300	13	180	17	51.2	0.178	19.383	40267.9	6771.2
161	300	13	180	17	53.0	0.193	19.626	39633.2	5823.0
162	300	13	180	17	55.1	0.211	19.901	38966.7	4980.3
163	300	13	180	17	55.0	0.218	20.012	38469.6	4170.3
164	300	13	180	17	57.3	0.237	20.322	37809.4	3571.8
165	300	13	180	17	59.9	0.259	20.674	37108.8	3041.8
166	300	13	180	17	62.5	0.288	21.134	36102.8	2266.8
167	300	13	180	17	69.3	0.348	22.100	34545.3	1619.1
168	300	13	180	17	73.3	0.386	22.702	33678.6	1354.6
169	300	13	220	17	58.5	0.153	30.199	51055.6	34568.4
170	300	13	220	17	60.1	0.169	30.612	49853.9	28541.0
171	300	13	220	17	62.2	0.189	31.095	48614.6	23353.3
172	300	13	220	17	56.0	0.158	30.325	49616.2	26021.5
173	300	13	220	17	57.7	0.173	30.710	48620.0	21877.4
174	300	13	220	17	59.7	0.191	31.154	47586.8	18258.7
175	300	13	220	17	62.2	0.229	32.109	45121.0	10890.3
176	300	13	220	17	65.1	0.254	32.728	44083.9	9041.2
177	300	13	220	17	68.5	0.283	33.453	42977.8	7444.2
178	300	13	220	17	65.3	0.267	33.064	43191.4	7062.0
179	300	13	220	17	68.7	0.296	33.786	42166.0	5877.7
180	300	13	220	17	72.5	0.330	34.632	41065.7	4853.1
181	300	13	220	17	65.4	0.277	33.309	42549.9	5793.1
182	300	13	220	17	68.7	0.306	34.019	41591.7	4867.6
183	300	13	220	17	72.4	0.339	34.844	40564.6	4060.9
184	300	13	220	17	65.3	0.284	33.482	42080.0	4926.4
185	300	13	220	17	68.5	0.312	34.175	41179.7	4174.5
186	300	13	220	17	72.2	0.344	34.974	40216.0	3514.7
187	300	13	220	17	71.8	0.346	35.041	39975.7	3120.3
188	300	13	220	17	75.7	0.382	35.929	39003.3	2632.2
189	300	13	220	17	80.0	0.423	36.961	37958.6	2205.5

Modelo	d_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	Centróide em relação ao eixo y (mm)	δ	γ_0	Momento de inércia (cm^4)	Momento de inércia mínimo i_0 (cm^4)
190	300	13	220	17	71.4	0.272	47.516	44518.3	17209.7
191	300	13	220	17	75.8	0.312	48.963	42964.1	13457.0
192	300	13	220	17	81.0	0.362	50.757	41277.0	10371.3
193	300	13	220	17	72.0	0.298	48.481	42862.1	11638.2
194	300	13	220	17	76.5	0.340	49.961	41463.5	9264.7
195	300	13	220	17	81.8	0.390	51.770	39943.3	7284.9
196	300	13	220	17	72.4	0.317	49.157	41790.5	8703.2
197	300	13	220	17	76.9	0.358	50.629	40508.9	7033.6
198	300	13	220	17	82.0	0.407	52.406	39117.8	5623.9
199	300	13	220	17	72.5	0.330	49.621	41065.7	6953.6
200	300	13	220	17	76.9	0.370	51.061	39879.4	5692.9
201	300	13	220	17	81.9	0.418	52.778	38594.9	4617.3
202	300	13	220	17	72.4	0.339	49.927	40564.6	5818.7
203	300	13	220	17	76.7	0.377	51.319	39459.2	4817.8
204	300	13	220	17	81.4	0.423	52.964	38265.6	3956.0
205	300	13	220	17	80.8	0.424	53.017	38066.7	3495.6
206	300	13	220	17	85.9	0.476	54.867	36863.4	2878.3
207	300	13	220	17	91.5	0.537	57.076	35561.8	2349.4
208	300	13	220	17	80.0	0.423	52.975	37958.6	3161.0
209	300	13	220	17	84.8	0.472	54.715	36834.0	2629.9
210	300	13	220	17	90.2	0.529	56.771	35621.3	2171.0
211	300	13	220	17	87.3	0.424	71.353	39429.5	10585.3
212	300	13	220	17	94.7	0.505	75.306	37390.8	7888.0
213	300	13	220	17	103.6	0.611	80.504	35128.7	5759.5
214	300	13	220	17	87.9	0.452	72.707	38280.7	7606.5
215	300	13	220	17	95.1	0.531	76.552	36453.2	5814.6
216	300	13	220	17	103.3	0.631	81.494	34437.6	4370.5
217	300	13	220	17	87.9	0.468	73.475	37601.1	5983.4
218	300	13	220	17	94.7	0.542	77.137	35941.4	4670.1
219	300	13	220	17	102.4	0.637	81.752	34120.9	3593.5
220	300	13	220	17	87.5	0.475	73.849	37199.0	4990.7
221	300	13	220	17	93.9	0.546	77.295	35678.0	3963.8
222	300	13	220	17	101.1	0.633	81.567	34017.8	3109.9
223	300	13	220	17	86.8	0.478	73.953	36972.9	4334.2
224	300	13	220	17	92.8	0.543	77.176	35569.6	3494.0
225	300	13	220	17	99.5	0.624	81.115	34044.2	2786.7
226	300	13	220	17	85.9	0.476	73.872	36863.4	3875.2
227	300	13	220	17	91.5	0.537	76.877	35561.8	3164.4
228	300	13	220	17	97.8	0.611	80.504	34152.1	2559.8
229	300	13	220	17	96.1	0.597	79.802	34312.0	2394.6
230	300	13	220	17	102.6	0.679	83.832	32898.2	1943.2
231	300	13	220	17	109.8	0.780	88.755	31372.4	1561.2

Modelo	d_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	Centróide em relação ao eixo y (mm)	δ	γ_0	Momento de inércia (cm^4)	Momento de inércia mínimo i_0 (cm^4)
232	300	13	220	17	87.3	0.424	91.964	39429.5	13643.1
233	300	13	220	17	94.7	0.505	97.128	37390.8	10173.8
234	300	13	220	17	103.6	0.611	103.917	35128.7	7434.5
235	300	13	220	17	87.9	0.452	93.733	38280.7	9806.2
236	300	13	220	17	95.1	0.531	98.756	36453.2	7501.1
237	300	13	220	17	103.3	0.631	105.210	34437.6	5642.4
238	300	13	220	17	87.9	0.468	94.736	37601.1	7714.8
239	300	13	220	17	94.7	0.542	99.519	35941.4	6025.2
240	300	13	220	17	102.4	0.637	105.547	34120.9	4639.4
241	300	13	220	17	87.5	0.475	95.224	37199.0	6435.3
242	300	13	220	17	93.9	0.546	99.726	35678.0	5114.1
243	300	13	220	17	101.1	0.633	105.306	34017.8	4014.9
244	300	13	220	17	92.8	0.543	99.570	35569.6	4507.9
245	300	13	220	17	99.5	0.624	104.715	34044.2	3597.5
246	300	13	220	17	107.1	0.723	111.092	32385.8	2837.5
247	300	13	220	17	104.8	0.702	109.704	32624.9	2647.0
248	300	13	220	17	112.6	0.814	116.879	30972.0	2096.7
249	300	13	220	17	121.1	0.955	125.920	29187.4	1640.0
250	300	13	220	17	102.6	0.679	108.263	32898.2	2509.5
251	300	13	220	17	109.8	0.780	114.694	31372.4	2017.4
252	300	13	220	17	117.7	0.904	122.665	29728.9	1604.1
253	300	13	220	17	94.7	0.505	121.364	37390.8	12712.4
254	300	13	220	17	103.6	0.611	129.956	35128.7	9297.4
255	300	13	220	17	114.0	0.755	141.569	32612.2	6645.1
256	300	13	220	17	95.1	0.531	123.424	36453.2	9374.8
257	300	13	220	17	103.3	0.631	131.592	34437.6	7057.3
258	300	13	220	17	112.9	0.764	142.333	32212.1	5213.6
259	300	13	220	17	94.7	0.542	124.390	35941.4	7531.0
260	300	13	220	17	102.4	0.637	132.019	34120.9	5803.0
261	300	13	220	17	111.2	0.758	141.821	32123.0	4401.5
262	300	13	220	17	109.2	0.743	140.614	32205.0	3892.3
263	300	13	220	17	118.3	0.884	152.050	30228.6	2971.7
264	300	13	220	17	128.5	1.070	167.086	28082.6	2230.5
265	300	13	220	17	107.1	0.723	139.037	32385.8	3551.2
266	300	13	220	17	115.4	0.849	149.209	30584.8	2766.9
267	300	13	220	17	124.7	1.010	162.279	28635.2	2124.8
268	300	13	220	17	121.1	0.955	157.804	29187.4	2055.2
269	300	13	220	17	130.4	1.137	172.507	27268.8	1586.3
270	300	13	220	17	140.5	1.375	191.840	25220.3	1204.9
271	300	13	220	17	117.7	0.904	153.684	29728.9	2009.8
272	300	13	220	17	126.3	1.061	166.399	27964.5	1579.9
273	300	13	220	17	135.6	1.263	182.736	26080.3	1225.0

Modelo	d_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	Centróide em relação ao eixo y (mm)	δ	γ_0	Momento de inércia (cm ⁴)	Momento de inércia mínimo i_0 (cm ⁴)
274	300	13	220	17	126.1	0.955	231.448	29816.8	6782.4
275	300	13	220	17	139.9	1.247	266.822	26734.7	4583.3
276	300	13	220	17	155.4	1.698	321.324	23390.2	2979.3
277	300	13	220	17	123.8	0.943	230.022	29759.5	5528.1
278	300	13	220	17	136.2	1.194	260.337	27073.4	3906.0
279	300	13	220	17	149.9	1.559	304.554	24167.3	2678.5
280	300	13	220	17	121.2	0.917	226.826	29934.5	4808.2
281	300	13	220	17	132.3	1.132	252.847	27549.3	3516.6
282	300	13	220	17	144.6	1.433	289.226	24973.7	2511.3
283	300	13	220	17	118.3	0.884	222.853	30228.6	4355.5
284	300	13	220	17	128.5	1.070	245.315	28082.6	3274.7
285	300	13	220	17	139.6	1.320	275.673	25769.0	2414.4
286	300	13	220	17	134.9	1.222	263.804	26536.3	2359.2
287	300	13	220	17	145.9	1.509	298.499	24296.5	1751.4
288	300	13	220	17	157.7	1.910	347.003	21936.7	1271.1
289	300	13	220	17	130.4	1.137	253.413	27268.8	2330.3
290	300	13	220	17	140.5	1.375	282.292	25220.3	1773.0
291	300	13	220	17	151.4	1.698	321.324	23054.4	1324.1
292	300	13	220	17	135.6	1.263	268.693	26080.3	1801.3
293	300	13	220	17	145.6	1.528	300.781	24083.7	1377.2
294	300	13	220	17	156.2	1.886	344.150	21990.6	1033.9
295	150	20	0	0	30.7	0.060	17.492	4434.4	20023.3
296	150	20	0	0	29.9	0.066	17.596	4154.0	16405.8
297	150	20	0	0	29.2	0.074	17.718	3901.1	13306.4
298	150	20	0	0	29.6	0.048	17.300	4727.2	24754.4
299	150	20	0	0	28.9	0.052	17.366	4463.2	21104.5
300	150	20	0	0	28.3	0.057	17.440	4221.9	17876.8
301	150	20	0	0	27.7	0.046	17.267	4521.7	22498.0
302	150	20	0	0	27.1	0.049	17.323	4305.3	19514.6
303	150	20	0	0	26.6	0.053	17.384	4105.6	16840.2
304	150	20	0	0	24.8	0.054	17.390	3879.0	14268.3
305	150	20	0	0	24.4	0.058	17.454	3729.7	12382.5
306	150	20	0	0	24.0	0.062	17.526	3590.7	10691.6
307	150	20	0	0	22.1	0.077	17.761	3168.5	6204.5
308	150	20	0	0	21.9	0.083	17.866	3075.6	5300.8
309	150	20	0	0	21.8	0.091	17.984	2987.3	4500.7
310	150	20	0	0	20.9	0.094	18.032	2892.3	3757.7
311	150	20	0	0	20.9	0.102	18.166	2819.8	3192.9
312	150	20	0	0	21.0	0.112	18.318	2749.6	2695.1
313	150	20	0	0	20.5	0.124	18.516	2634.2	1986.0
314	150	20	0	0	21.1	0.150	18.932	2513.9	1387.0
315	150	20	0	0	21.5	0.166	19.192	2453.6	1145.2

Modelo	d_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	Centróide em relação ao eixo y (mm)	δ	γ_0	Momento de inércia (cm ⁴)	Momento de inércia mínimo i_0 (cm ⁴)
316	150	20	0	0	30.7	0.060	27.879	4434.4	31912.7
317	150	20	0	0	29.9	0.066	28.041	4154.0	26144.2
318	150	20	0	0	29.2	0.074	28.231	3901.1	21202.2
319	150	20	0	0	27.7	0.062	27.929	4001.3	23965.0
320	150	20	0	0	27.1	0.068	28.080	3799.5	20003.5
321	150	20	0	0	26.6	0.075	28.254	3614.4	16559.1
322	150	20	0	0	24.2	0.090	28.629	3183.8	9710.0
323	150	20	0	0	24.1	0.100	28.872	3064.6	7976.0
324	150	20	0	0	24.0	0.111	29.157	2952.0	6488.2
325	150	20	0	0	22.8	0.105	29.004	2921.2	6194.8
326	150	20	0	0	22.8	0.116	29.288	2829.0	5095.1
327	150	20	0	0	22.9	0.130	29.620	2740.0	4150.7
328	150	20	0	0	21.8	0.109	29.100	2821.9	5061.1
329	150	20	0	0	21.9	0.120	29.379	2743.5	4203.7
330	150	20	0	0	22.1	0.133	29.703	2667.0	3461.7
331	150	20	0	0	21.0	0.112	29.168	2749.6	4291.6
332	150	20	0	0	21.1	0.122	29.440	2681.2	3596.1
333	150	20	0	0	21.4	0.135	29.754	2613.9	2990.1
334	150	20	0	0	20.7	0.136	29.780	2574.0	2651.9
335	150	20	0	0	21.1	0.150	30.129	2513.9	2207.3
336	150	20	0	0	21.5	0.166	30.534	2453.6	1822.0
337	150	20	0	0	27.8	0.107	41.577	3274.7	15058.6
338	150	20	0	0	27.6	0.122	42.145	3099.5	11583.1
339	150	20	0	0	27.6	0.142	42.849	2935.8	8755.6
340	150	20	0	0	25.5	0.117	41.956	3004.7	10071.8
341	150	20	0	0	25.6	0.133	42.537	2875.4	7888.0
342	150	20	0	0	25.8	0.153	43.247	2751.4	6085.6
343	150	20	0	0	24.0	0.125	42.221	2844.6	7475.2
344	150	20	0	0	24.2	0.141	42.799	2741.2	5945.8
345	150	20	0	0	24.6	0.160	43.497	2640.2	4667.9
346	150	20	0	0	22.9	0.130	42.404	2740.0	5942.2
347	150	20	0	0	23.2	0.145	42.969	2653.1	4790.7
348	150	20	0	0	23.6	0.164	43.643	2567.2	3818.1
349	150	20	0	0	22.1	0.133	42.524	2667.0	4955.9
350	150	20	0	0	22.4	0.148	43.070	2591.7	4043.4
351	150	20	0	0	22.8	0.166	43.716	2516.7	3265.2
352	150	20	0	0	22.1	0.167	43.737	2480.4	2883.8
353	150	20	0	0	22.7	0.187	44.464	2412.7	2332.5
354	150	20	0	0	23.5	0.211	45.331	2343.4	1865.9
355	150	20	0	0	21.5	0.166	43.720	2453.6	2608.8
356	150	20	0	0	22.1	0.185	44.404	2392.3	2134.3
357	150	20	0	0	22.9	0.208	45.211	2329.4	1729.0

Modelo	d_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	Centróide em relação ao eixo y (mm)	δ	γ_0	Momento de inércia (cm ⁴)	Momento de inércia mínimo i_0 (cm ⁴)
358	150	20	0	0	27.9	0.167	58.722	2780.4	8711.5
359	150	20	0	0	28.4	0.198	60.274	2629.7	6313.5
360	150	20	0	0	29.4	0.240	62.315	2479.9	4458.2
361	150	20	0	0	26.3	0.178	59.253	2630.7	6199.0
362	150	20	0	0	27.0	0.208	60.763	2510.8	4615.3
363	150	20	0	0	28.1	0.248	62.704	2389.3	3362.8
364	150	20	0	0	25.1	0.184	59.555	2540.3	4849.8
365	150	20	0	0	25.9	0.213	60.993	2439.7	3692.7
366	150	20	0	0	27.0	0.250	62.805	2336.5	2760.7
367	150	20	0	0	24.2	0.187	59.702	2481.4	4034.6
368	150	20	0	0	25.0	0.214	61.055	2394.2	3131.0
369	150	20	0	0	26.1	0.249	62.733	2304.2	2391.8
370	150	20	0	0	23.4	0.188	59.743	2441.1	3501.4
371	150	20	0	0	24.2	0.213	61.008	2363.9	2762.1
372	150	20	0	0	25.2	0.245	62.555	2284.0	2149.1
373	150	20	0	0	22.7	0.187	59.711	2412.7	3132.3
374	150	20	0	0	23.5	0.211	60.891	2343.4	2506.4
375	150	20	0	0	24.5	0.240	62.315	2271.5	1981.4
376	150	20	0	0	23.8	0.234	62.039	2264.1	1861.6
377	150	20	0	0	24.9	0.267	63.622	2195.6	1474.7
378	150	20	0	0	26.2	0.306	65.555	2122.9	1153.1
379	150	20	0	0	27.9	0.167	75.467	2780.4	11195.6
380	150	20	0	0	28.4	0.198	77.494	2629.7	8117.2
381	150	20	0	0	29.4	0.240	80.160	2479.9	5734.9
382	150	20	0	0	26.3	0.178	76.161	2630.7	7967.9
383	150	20	0	0	27.0	0.208	78.133	2510.8	5934.7
384	150	20	0	0	28.1	0.248	80.668	2389.3	4326.2
385	150	20	0	0	25.1	0.184	76.555	2540.3	6234.2
386	150	20	0	0	25.9	0.213	78.433	2439.7	4748.6
387	150	20	0	0	27.0	0.250	80.800	2336.5	3551.6
388	150	20	0	0	24.2	0.187	76.747	2481.4	5186.5
389	150	20	0	0	25.0	0.214	78.514	2394.2	4026.4
390	150	20	0	0	26.1	0.249	80.705	2304.2	3077.0
391	150	20	0	0	24.2	0.213	78.453	2363.9	3551.8
392	150	20	0	0	25.2	0.245	80.473	2284.0	2764.7
393	150	20	0	0	26.5	0.284	82.978	2200.1	2119.4
394	150	20	0	0	25.7	0.276	82.433	2196.1	1989.0
395	150	20	0	0	27.1	0.320	85.250	2115.9	1529.3
396	150	20	0	0	28.9	0.375	88.800	2029.5	1156.5
397	150	20	0	0	24.9	0.267	81.867	2195.6	1897.7
398	150	20	0	0	26.2	0.306	84.392	2122.9	1484.4
399	150	20	0	0	27.9	0.355	87.522	2045.0	1144.6

Modelo	d_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	Centróide em relação ao eixo y (mm)	δ	γ_0	Momento de inércia (cm ⁴)	Momento de inércia mínimo i_0 (cm ⁴)
400	150	20	0	0	28.4	0.198	96.515	2629.7	10109.5
401	150	20	0	0	29.4	0.240	99.889	2479.9	7146.3
402	150	20	0	0	31.0	0.296	104.449	2326.8	4902.8
403	150	20	0	0	27.0	0.208	97.324	2510.8	7392.3
404	150	20	0	0	28.1	0.248	100.531	2389.3	5391.5
405	150	20	0	0	29.6	0.300	104.749	2263.1	3836.9
406	150	20	0	0	25.9	0.213	97.703	2439.7	5915.3
407	150	20	0	0	27.0	0.250	100.699	2336.5	4426.3
408	150	20	0	0	28.5	0.298	104.548	2228.6	3244.7
409	150	20	0	0	27.4	0.292	104.074	2209.8	2880.8
410	150	20	0	0	29.2	0.347	108.564	2109.2	2121.8
411	150	20	0	0	31.4	0.420	114.469	2000.2	1528.1
412	150	20	0	0	26.5	0.284	103.454	2200.1	2642.4
413	150	20	0	0	28.1	0.333	107.449	2110.8	1992.5
414	150	20	0	0	30.1	0.397	112.581	2014.3	1474.1
415	150	20	0	0	28.9	0.375	110.824	2029.5	1443.4
416	150	20	0	0	31.1	0.446	116.597	1935.5	1072.2
417	150	20	0	0	33.8	0.540	124.189	1832.3	780.0
418	150	20	0	0	27.9	0.355	109.206	2045.0	1428.1
419	150	20	0	0	29.8	0.417	114.199	1960.5	1084.3
420	150	20	0	0	32.2	0.496	120.614	1868.2	808.6
421	150	20	0	0	33.2	0.375	161.268	2165.5	4725.8
422	150	20	0	0	36.3	0.490	175.159	1990.6	3008.8
423	150	20	0	0	40.5	0.667	196.560	1796.1	1822.5
424	150	20	0	0	31.7	0.370	160.708	2129.1	3862.3
425	150	20	0	0	34.5	0.469	172.612	1983.3	2589.8
426	150	20	0	0	38.1	0.612	189.975	1821.7	1670.8
427	150	20	0	0	30.4	0.360	159.453	2113.7	3380.1
428	150	20	0	0	32.9	0.444	169.671	1988.8	2359.8
429	150	20	0	0	36.1	0.563	183.956	1850.9	1597.2
430	150	20	0	0	29.2	0.347	157.893	2109.2	3085.9
431	150	20	0	0	31.4	0.420	166.713	2000.2	2225.5
432	150	20	0	0	34.2	0.519	178.634	1880.4	1564.5
433	150	20	0	0	32.6	0.480	173.973	1908.8	1555.8
434	150	20	0	0	35.6	0.593	187.597	1792.3	1100.7
435	150	20	0	0	39.3	0.750	206.643	1663.0	756.9
436	150	20	0	0	31.1	0.446	169.893	1935.5	1562.3
437	150	20	0	0	33.8	0.540	181.233	1832.3	1138.3
438	150	20	0	0	37.0	0.667	196.560	1718.3	810.0
439	150	20	0	0	32.2	0.496	175.893	1868.2	1179.1
440	150	20	0	0	35.0	0.600	188.493	1766.7	863.1
441	150	20	0	0	38.3	0.741	205.523	1654.5	617.4

APÊNDICE C – RESULTADOS DA ANÁLISE PARAMÉTRICA

Este apêndice apresenta as cargas últimas P_u verificadas para os painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável que foram objeto da análise paramétrica realizada neste trabalho de pesquisa. Também são apresentadas as cargas de plastificação teórica P_0 resultantes da integração das tensões $\sigma_{0.2\%}$ do material dos enrijecedores e das placas dos painéis enrijecidos sobre suas respectivas áreas de seção transversal. As relações P_u/P_0 , parâmetro de esbeltez β e modos de falha são exibidas, onde:

PPE – Plastificação do conjunto placa-enrijecedor;

FPE – Flambagem do conjunto placa-enrijecedor.

Finalmente, o estado plano de tensões da placa entre enrijecedores no momento da carga última de cada painel enrijecido pode ser visualizado.

Tabela 14 – Resistências, modos de falha e estado de tensões dos painéis enrijecidos

Modelo	Carga última P_u (kN)	Carga de plastificação P_0 (kN)	P_u / P_0	Parâmetro de esbeltez β	Modo de falha	Sigma x (MPa)	Sigma y (MPa)	Tau xy (MPa)
1	73230.4	67189.4	1.09	0.76	PPE	-288.19	-32.95	24.70
2	132307.6	121200.9	1.09	0.76	PPE	-270.74	-99.98	5.03
3	182487.2	165855.9	1.10	0.77	PPE	-277.45	-104.46	5.25
4	83053.6	80184.4	1.04	0.94	PPE	-269.28	-61.73	12.73
5	151018.9	147138.9	1.03	0.94	FPE	-242.51	-58.50	18.21
6	210800.8	204529.0	1.03	0.94	FPE	-247.93	-77.89	6.47
7	79512.5	83130.0	0.96	1.13	FPE	-237.82	-50.80	9.84
8	148362.1	153688.4	0.97	1.13	FPE	-231.00	-62.74	7.40
9	207563.5	215236.9	0.96	1.13	FPE	-233.62	-66.31	5.49
10	65691.5	73427.0	0.89	1.33	FPE	-229.70	-46.49	7.49
11	123535.3	135643.9	0.91	1.32	FPE	-232.69	-58.22	4.81
12	173112.1	190138.0	0.91	1.33	FPE	-241.74	-64.34	3.92
13	46821.9	55818.8	0.84	1.55	FPE	-222.46	-42.80	6.27
14	87172.4	102228.2	0.85	1.55	FPE	-230.12	-53.48	3.80
15	121854.1	142659.8	0.85	1.55	FPE	-231.55	-57.36	4.72
16	38406.7	48476.6	0.79	1.76	FPE	-216.58	-39.55	5.39
17	71525.4	88482.4	0.81	1.76	FPE	-229.40	-49.75	3.02
18	99238.5	123405.6	0.80	1.77	FPE	-232.27	-53.45	4.29
19	29871.9	40367.8	0.74	2.00	FPE	-131.80	-9.61	13.47
20	52277.2	68961.0	0.76	2.02	FPE	-143.30	-13.07	18.23
21	73040.0	95838.9	0.76	2.03	FPE	-134.87	-29.78	12.00

Modelo	Carga última P_u (kN)	Carga de plastificação P_0 (kN)	P_u / P_0	Parâmetro de esbeltez β	Modo de falha	Sigma x (MPa)	Sigma y (MPa)	Tau xy (MPa)
22	89955.6	84369.1	1.07	0.76	PPE	-283.28	-29.14	24.10
23	167063.6	152835.8	1.09	0.76	PPE	-281.84	-32.08	27.67
24	230571.3	209606.9	1.10	0.77	PPE	-281.38	-33.46	28.53
25	81198.4	82289.9	0.99	0.96	FPE	-227.92	-39.16	16.30
26	152901.4	150171.8	1.02	0.96	FPE	-251.06	-79.73	7.52
27	212710.5	207657.7	1.02	0.96	FPE	-257.83	-87.56	7.70
28	57536.8	62710.8	0.92	1.17	FPE	-194.46	-31.72	10.05
29	107355.3	113742.5	0.94	1.18	FPE	-230.60	-61.13	9.41
30	147643.2	156977.2	0.94	1.18	FPE	-226.80	-68.55	8.53
31	48202.0	56522.7	0.85	1.39	FPE	-178.06	-27.84	9.64
32	89934.3	102573.0	0.88	1.39	FPE	-211.08	-39.69	18.19
33	123864.9	141940.1	0.87	1.40	FPE	-203.01	-51.29	10.04
34	44151.4	55211.6	0.80	1.59	FPE	-163.28	-23.11	10.17
35	82935.5	100530.9	0.82	1.59	FPE	-227.12	-42.28	15.34
36	114913.5	139677.6	0.82	1.60	FPE	-190.79	-50.49	8.28
37	41171.0	54336.2	0.76	1.79	FPE	-152.48	-18.93	11.22
38	77875.3	99231.4	0.78	1.79	FPE	-225.25	-41.32	12.95
39	108169.0	138351.0	0.78	1.80	FPE	-233.99	-58.15	3.84
40	35547.8	48048.1	0.74	2.02	FPE	-142.96	-12.06	13.45
41	65219.3	87535.9	0.75	2.02	FPE	-141.20	-19.00	12.83
42	91129.2	122085.6	0.75	2.03	FPE	-132.05	-11.74	10.68
43	69423.9	66484.6	1.04	0.79	PPE	-254.60	-59.63	11.18
44	125346.6	118431.2	1.06	0.79	PPE	-271.32	-86.53	5.71
45	170554.8	160241.7	1.06	0.80	PPE	-264.19	-92.01	7.27
46	61617.2	62547.1	0.99	1.00	FPE	-209.52	-44.56	8.87
47	110771.8	112193.6	0.99	1.00	FPE	-221.79	-58.53	6.81
48	151682.1	153107.4	0.99	1.01	FPE	-228.52	-67.81	8.28
49	55235.1	60182.0	0.92	1.20	FPE	-211.70	-29.61	12.35
50	99922.6	108555.0	0.92	1.21	FPE	-208.66	-45.13	8.43
51	136763.1	149131.0	0.92	1.22	FPE	-199.24	-51.61	8.03
52	50043.6	58715.4	0.85	1.41	FPE	-190.38	-27.49	12.02
53	91314.7	106401.5	0.86	1.41	FPE	-183.50	-37.96	9.37
54	126001.6	146959.0	0.86	1.42	FPE	-183.47	-39.81	9.68
55	46119.7	57810.4	0.80	1.61	FPE	-171.93	-24.78	12.02
56	84276.5	105176.3	0.80	1.61	FPE	-177.20	-26.92	13.99
57	117393.8	145914.7	0.80	1.63	FPE	-170.07	-29.80	9.50
58	38892.5	50695.7	0.77	1.85	FPE	-155.99	-25.49	11.20
59	71132.1	92094.7	0.77	1.85	FPE	-154.15	-28.36	11.19
60	99753.2	127949.1	0.78	1.87	FPE	-154.01	-29.13	11.36
61	37420.5	50773.6	0.74	2.05	FPE	-144.25	-20.89	11.86
62	68734.1	92545.2	0.74	2.06	FPE	-144.15	-24.74	11.38
63	96710.9	129014.7	0.75	2.07	FPE	-143.29	-25.14	12.05

Modelo	Carga última P_u (kN)	Carga de plastificação P_0 (kN)	P_u / P_0	Parâmetro de esbeltez β	Modo de falha	Sigma x (MPa)	Sigma y (MPa)	Tau xy (MPa)
64	60334.8	58606.2	1.03	0.82	PPE	-271.21	-61.51	15.90
65	108577.5	103519.1	1.05	0.83	PPE	-272.73	-92.29	4.65
66	147035.4	139335.5	1.06	0.84	PPE	-281.63	-26.36	25.78
67	54776.9	56605.0	0.97	1.03	FPE	-223.42	-44.66	14.86
68	99495.5	100881.2	0.99	1.04	FPE	-247.42	-67.75	6.19
69	135889.2	137152.4	0.99	1.05	FPE	-240.86	-77.71	8.65
70	50337.4	55574.1	0.91	1.24	FPE	-214.17	-25.17	19.38
71	91772.2	99728.9	0.92	1.25	FPE	-204.18	-49.89	8.05
72	125719.5	136606.6	0.92	1.26	FPE	-216.98	-58.65	7.71
73	46743.0	55097.6	0.85	1.45	FPE	-194.12	-21.37	15.05
74	85304.6	99425.7	0.86	1.46	FPE	-187.81	-37.47	12.20
75	117815.7	136996.4	0.86	1.47	FPE	-191.99	-39.53	12.06
76	43928.5	54967.6	0.80	1.65	FPE	-168.34	-17.77	12.20
77	79902.6	99653.1	0.80	1.66	FPE	-169.28	-27.62	12.22
78	110860.0	137971.1	0.80	1.68	FPE	-169.61	-28.01	10.72
79	41927.9	55068.7	0.76	1.86	FPE	-153.39	-14.42	10.17
80	76466.8	100234.3	0.76	1.87	FPE	-154.57	-20.87	9.44
81	107069.4	139335.5	0.77	1.89	FPE	-153.90	-23.61	9.24
82	36804.6	49145.9	0.75	2.11	FPE	-145.10	-9.47	12.70
83	67292.6	89419.6	0.75	2.12	FPE	-143.18	-17.03	10.90
84	95095.4	124599.2	0.76	2.15	FPE	-142.69	-17.85	11.44
85	67989.4	66516.8	1.02	0.82	PPE	-271.45	-57.06	21.67
86	122577.0	117845.8	1.04	0.83	PPE	-280.91	-105.28	5.32
87	166510.4	158778.9	1.05	0.84	PPE	-279.38	-23.22	23.47
88	61912.6	64229.7	0.96	1.03	FPE	-236.95	-42.64	14.56
89	111897.7	114831.0	0.97	1.04	FPE	-247.43	-76.48	6.88
90	153381.3	156283.8	0.98	1.05	FPE	-257.13	-92.14	7.77
91	56871.5	63051.5	0.90	1.24	FPE	-204.76	-32.88	12.58
92	102885.3	113514.2	0.91	1.25	FPE	-220.64	-52.35	11.25
93	141456.6	155660.1	0.91	1.26	FPE	-225.95	-65.37	7.56
94	52552.4	62506.9	0.84	1.45	FPE	-190.23	-28.70	11.02
95	95547.6	113167.6	0.84	1.46	FPE	-203.46	-34.34	12.48
96	132120.4	156105.6	0.85	1.47	FPE	-191.89	-41.67	10.52
97	46309.2	58329.9	0.79	1.67	FPE	-179.00	-19.20	15.81
98	84372.1	105890.4	0.80	1.68	FPE	-175.23	-27.43	11.90
99	118103.9	146693.5	0.81	1.71	FPE	-173.13	-28.88	10.80
100	40109.1	51731.4	0.78	1.93	FPE	-157.15	-16.00	12.13
101	73230.0	93992.8	0.78	1.94	FPE	-159.97	-18.21	17.04
102	103578.9	130709.7	0.79	1.97	FPE	-159.39	-26.75	10.25
103	39225.9	52482.2	0.75	2.13	FPE	-144.62	-12.57	10.85
104	71978.6	95702.3	0.75	2.15	FPE	-147.25	-17.80	11.46
105	102185.8	133516.6	0.77	2.18	FPE	-146.52	-17.50	11.83

Modelo	Carga última P_u (kN)	Carga de plastificação P_0 (kN)	P_u / P_0	Parâmetro de esbeltez β	Modo de falha	Sigma x (MPa)	Sigma y (MPa)	Tau xy (MPa)
106	68826.0	67702.4	1.02	0.83	PPE	-272.29	-65.89	13.90
107	123605.0	119892.2	1.03	0.84	PPE	-283.76	-103.68	7.11
108	167350.1	161556.1	1.04	0.86	PPE	-287.91	-53.36	40.47
109	63486.3	66006.6	0.96	1.04	FPE	-246.91	-41.86	17.59
110	114784.6	118020.9	0.97	1.05	FPE	-257.92	-78.97	8.04
111	157384.1	160678.9	0.98	1.07	FPE	-253.63	-89.64	8.67
112	58731.6	65265.9	0.90	1.25	FPE	-208.48	-30.54	12.70
113	106440.2	117553.1	0.91	1.27	FPE	-216.96	-55.53	9.22
114	146798.4	161263.7	0.91	1.28	FPE	-221.32	-67.12	9.32
115	48087.7	56382.9	0.85	1.50	FPE	-188.26	-26.80	12.14
116	87596.9	101847.7	0.86	1.52	FPE	-193.04	-38.52	10.59
117	122256.0	140629.5	0.87	1.55	FPE	-195.47	-49.36	8.93
118	45848.8	57030.3	0.80	1.72	FPE	-170.83	-23.21	11.18
119	83712.0	103518.5	0.81	1.73	FPE	-176.05	-26.90	16.05
120	117819.2	143574.2	0.82	1.76	FPE	-176.57	-33.54	13.91
121	40168.7	51036.3	0.79	1.98	FPE	-160.90	-18.65	10.38
122	74229.9	92862.6	0.80	2.01	FPE	-165.24	-22.89	11.72
123	105719.9	129490.9	0.82	2.04	FPE	-165.76	-28.10	10.83
124	39540.2	52088.9	0.76	2.19	FPE	-151.81	-14.01	11.48
125	73319.6	95097.8	0.77	2.21	FPE	-153.20	-19.72	10.66
126	104731.3	132960.6	0.79	2.25	FPE	-152.12	-19.54	15.13
127	61492.1	61659.4	1.00	0.88	PPE	-265.12	-66.78	12.39
128	110412.4	109365.7	1.01	0.90	PPE	-284.61	-43.99	41.60
129	151299.4	148495.2	1.02	0.92	PPE	-289.30	-45.45	37.50
130	59206.1	61945.3	0.96	1.10	FPE	-247.89	-48.08	11.93
131	107338.9	110938.1	0.97	1.12	FPE	-258.23	-84.55	5.32
132	148514.2	151925.9	0.98	1.14	FPE	-264.57	-98.57	8.12
133	56417.9	62612.4	0.90	1.31	FPE	-208.25	-33.69	9.91
134	103177.2	112939.3	0.91	1.34	FPE	-229.01	-63.99	8.47
135	144017.7	155642.4	0.93	1.36	FPE	-240.30	-82.98	11.98
136	54063.5	63497.3	0.85	1.53	FPE	-197.58	-23.40	16.31
137	98629.1	115185.6	0.86	1.55	FPE	-211.47	-40.29	11.12
138	138375.4	159522.4	0.87	1.58	FPE	-206.52	-56.58	10.28
139	46906.4	56656.4	0.83	1.80	FPE	-186.74	-24.46	11.88
140	87062.7	103290.5	0.84	1.83	FPE	-193.64	-34.52	10.51
141	124672.9	144206.8	0.86	1.86	FPE	-195.78	-44.34	9.52
142	45491.9	58006.4	0.78	2.01	FPE	-168.68	-23.82	9.36
143	84457.3	106109.7	0.80	2.04	FPE	-172.49	-30.47	10.56
144	121521.6	148495.2	0.82	2.07	FPE	-175.38	-30.26	11.83
145	43066.8	56084.6	0.77	2.26	FPE	-155.39	-17.50	14.20
146	80488.7	102933.1	0.78	2.29	FPE	-160.80	-17.85	11.17
147	116474.9	144635.7	0.81	2.33	FPE	-161.13	-21.86	11.80

Modelo	Carga última P_u (kN)	Carga de plastificação P_0 (kN)	P_u / P_0	Parâmetro de esbeltez β	Modo de falha	Sigma x (MPa)	Sigma y (MPa)	Tau xy (MPa)
148	77983.4	71475.0	1.09	0.77	PPE	-282.59	-69.33	14.13
149	142240.7	128914.8	1.10	0.77	PPE	-265.34	-98.73	6.39
150	196559.3	176998.3	1.11	0.78	PPE	-270.36	-101.49	6.54
151	86718.8	84470.0	1.03	0.95	FPE	-251.16	-57.23	12.55
152	159572.5	154852.8	1.03	0.95	FPE	-244.78	-75.03	8.56
153	222987.3	215671.4	1.03	0.96	FPE	-246.76	-80.88	8.04
154	83567.2	87415.5	0.96	1.14	FPE	-225.64	-49.12	11.38
155	155620.4	161402.3	0.96	1.14	FPE	-220.33	-60.91	9.00
156	217824.0	226379.3	0.96	1.14	FPE	-226.04	-51.87	15.71
157	69152.4	77712.6	0.89	1.34	FPE	-210.58	-44.66	10.36
158	129449.2	143357.8	0.90	1.34	FPE	-217.03	-55.73	7.18
159	181137.9	201280.4	0.90	1.35	FPE	-222.70	-49.08	13.08
160	50131.2	60104.3	0.83	1.57	FPE	-181.19	-38.57	12.03
161	92505.0	109942.1	0.84	1.57	FPE	-195.03	-48.98	9.18
162	129735.9	153802.2	0.84	1.58	FPE	-190.40	-48.95	10.15
163	41342.3	52762.2	0.78	1.80	FPE	-126.83	-11.23	14.37
164	76856.8	96196.3	0.80	1.79	FPE	-150.03	-14.26	18.72
165	107476.4	134548.0	0.80	1.80	FPE	-145.91	-33.67	11.12
166	34903.7	44653.3	0.78	2.04	FPE	-119.60	-7.45	16.33
167	60674.8	76674.9	0.79	2.06	FPE	-115.28	-16.45	12.74
168	85412.8	106981.2	0.80	2.07	FPE	-112.89	-15.70	13.25
169	96884.4	90654.6	1.07	0.78	PPE	-261.14	-49.06	20.39
170	180830.6	164359.1	1.10	0.78	PPE	-280.44	-106.24	6.04
171	251171.8	226368.1	1.11	0.78	PPE	-285.32	-34.09	27.76
172	88412.4	88575.4	1.00	0.97	FPE	-218.80	-36.85	14.55
173	165217.9	161695.1	1.02	0.97	FPE	-240.88	-78.11	8.64
174	230849.5	224418.8	1.03	0.98	FPE	-248.04	-86.03	8.96
175	64010.0	68996.2	0.93	1.20	FPE	-182.84	-30.89	10.48
176	118713.6	125265.8	0.95	1.20	FPE	-218.90	-42.56	19.86
177	163850.4	173738.3	0.94	1.21	FPE	-203.18	-61.58	10.08
178	54468.2	62808.1	0.87	1.42	FPE	-160.66	-26.07	11.52
179	99396.8	114096.3	0.87	1.42	FPE	-167.85	-29.23	11.84
180	139762.3	158701.3	0.88	1.43	FPE	-172.68	-40.22	10.81
181	50600.9	61497.0	0.82	1.62	FPE	-146.28	-21.23	12.83
182	92555.1	112054.2	0.83	1.63	FPE	-144.34	-20.75	12.68
183	130130.2	156438.8	0.83	1.64	FPE	-142.87	-18.98	13.08
184	47790.1	60621.7	0.79	1.83	FPE	-136.51	-11.72	14.76
185	87826.1	110754.7	0.79	1.83	FPE	-132.25	-19.47	14.51
186	124155.8	155112.2	0.80	1.84	FPE	-131.77	-17.66	13.78
187	42560.1	54333.5	0.78	2.07	FPE	-124.15	-10.87	15.01
188	78148.1	99059.2	0.79	2.07	FPE	-122.73	-10.58	15.01
189	110797.4	138846.8	0.80	2.09	FPE	-120.59	-9.83	14.64

Modelo	Carga última P_u (kN)	Carga de plastificação P_0 (kN)	P_u / P_0	Parâmetro de esbeltez β	Modo de falha	Sigma x (MPa)	Sigma y (MPa)	Tau xy (MPa)
190	78802.8	73817.6	1.07	0.81	PPE	-241.09	-55.89	10.36
191	142101.0	132049.7	1.08	0.81	PPE	-260.64	-80.98	5.97
192	194535.7	180145.6	1.08	0.82	PPE	-266.91	-92.78	7.18
193	70214.2	69880.1	1.00	1.02	FPE	-238.13	-34.35	15.93
194	126426.1	125812.1	1.00	1.02	FPE	-234.42	-55.08	8.86
195	174169.2	173011.4	1.01	1.03	FPE	-228.45	-67.79	7.41
196	63112.3	67515.0	0.93	1.23	FPE	-199.43	-28.94	13.18
197	114581.9	122173.5	0.94	1.23	FPE	-185.29	-40.61	10.10
198	158189.7	169034.9	0.94	1.25	FPE	-195.58	-45.77	10.31
199	57384.3	66048.5	0.87	1.44	FPE	-172.22	-26.60	13.22
200	104967.4	120020.0	0.87	1.44	FPE	-167.92	-33.75	10.51
201	146561.6	166862.9	0.88	1.46	FPE	-164.61	-32.32	10.88
202	53625.0	65143.5	0.82	1.65	FPE	-150.27	-26.66	12.48
203	98249.4	118794.8	0.83	1.65	FPE	-149.53	-27.84	11.90
204	138554.3	165818.6	0.84	1.67	FPE	-146.80	-27.15	12.01
205	47089.0	58028.7	0.81	1.89	FPE	-133.53	-22.10	13.53
206	86474.6	105713.1	0.82	1.90	FPE	-130.05	-22.05	12.28
207	122628.1	147853.0	0.83	1.92	FPE	-129.01	-21.29	12.13
208	45331.2	58106.7	0.78	2.10	FPE	-122.23	-6.57	13.24
209	84211.7	106163.6	0.79	2.11	FPE	-118.64	-15.74	11.96
210	119909.2	148918.6	0.81	2.13	FPE	-117.22	-14.44	11.69
211	70530.2	66986.8	1.05	0.84	PPE	-255.13	-55.97	16.61
212	127700.2	119232.7	1.07	0.85	PPE	-258.69	-85.46	6.04
213	174421.0	162382.2	1.07	0.86	PPE	-273.32	-99.63	7.96
214	64485.0	64985.6	0.99	1.06	FPE	-235.60	-30.90	21.51
215	117856.4	116594.8	1.01	1.07	FPE	-227.60	-63.82	7.36
216	162389.5	160199.0	1.01	1.08	FPE	-234.71	-77.24	8.60
217	59563.0	63954.7	0.93	1.27	FPE	-192.87	-21.44	16.78
218	109443.0	115442.5	0.95	1.28	FPE	-196.86	-42.20	12.38
219	151719.9	159653.2	0.95	1.30	FPE	-190.39	-53.93	9.53
220	55566.0	63478.2	0.88	1.49	FPE	-164.07	-17.47	12.30
221	102139.7	115139.3	0.89	1.50	FPE	-166.70	-37.32	10.77
222	143293.4	160043.1	0.90	1.51	FPE	-165.51	-33.45	13.97
223	52905.3	63348.2	0.84	1.70	FPE	-145.72	-13.66	10.40
224	96785.4	115366.7	0.84	1.71	FPE	-145.72	-18.50	9.22
225	136455.1	161017.7	0.85	1.73	FPE	-143.77	-21.90	10.48
226	50989.3	63449.3	0.80	1.91	FPE	-136.11	-10.62	9.50
227	93577.4	115947.9	0.81	1.92	FPE	-136.01	-13.96	9.24
228	132894.9	162382.2	0.82	1.94	FPE	-135.73	-8.16	10.81
229	46413.5	57526.5	0.81	2.17	FPE	-128.98	-7.10	12.66
230	85393.4	105133.2	0.81	2.18	FPE	-128.87	-4.41	12.65
231	122087.9	147645.8	0.83	2.21	FPE	-129.07	-4.32	12.99

Modelo	Carga última P_u (kN)	Carga de plastificação P_0 (kN)	P_u / P_0	Parâmetro de esbeltez β	Modo de falha	Sigma x (MPa)	Sigma y (MPa)	Tau xy (MPa)
232	79513.5	75945.0	1.05	0.84	PPE	-271.90	-54.22	18.12
233	144874.7	135654.6	1.07	0.85	PPE	-279.61	-93.01	5.79
234	198409.3	184968.2	1.07	0.86	PPE	-279.52	-105.23	8.04
235	72899.1	73657.8	0.99	1.05	FPE	-216.65	-37.34	16.95
236	132106.4	132639.7	1.00	1.06	FPE	-235.13	-65.95	12.08
237	182948.1	182473.2	1.00	1.08	FPE	-235.40	-82.88	9.38
238	67045.8	72479.6	0.93	1.27	FPE	-189.65	-29.69	13.00
239	122342.4	131322.9	0.93	1.28	FPE	-189.83	-41.24	9.60
240	170514.8	181849.4	0.94	1.30	FPE	-200.71	-50.69	9.97
241	61992.1	71935.1	0.86	1.48	FPE	-166.54	-23.52	11.37
242	113820.1	130976.4	0.87	1.49	FPE	-174.56	-26.41	11.46
243	160244.1	182294.9	0.88	1.51	FPE	-167.77	-32.56	9.57
244	56290.1	67758.1	0.83	1.72	FPE	-152.68	-15.57	12.40
245	103599.7	123699.2	0.84	1.73	FPE	-150.54	-19.59	9.99
246	147284.5	172882.9	0.85	1.75	FPE	-152.58	-20.99	10.57
247	51354.6	61159.5	0.84	1.98	FPE	-135.84	-10.23	12.26
248	93673.7	111801.5	0.84	2.00	FPE	-142.33	-14.14	11.18
249	134291.9	156899.0	0.86	2.02	FPE	-143.11	-16.66	11.45
250	50489.8	61910.4	0.82	2.19	FPE	-128.59	-4.16	11.84
251	92438.8	113511.1	0.81	2.21	FPE	-132.71	-8.08	11.67
252	132990.2	159705.9	0.83	2.24	FPE	-131.65	-12.56	12.23
253	81609.3	78178.2	1.04	0.85	PPE	-259.58	-61.75	14.13
254	147489.7	139796.1	1.06	0.86	PPE	-274.75	-99.36	6.65
255	202332.1	190888.1	1.06	0.88	PPE	-283.37	-21.65	24.05
256	75825.6	76482.3	0.99	1.07	FPE	-234.18	-38.94	18.21
257	137677.2	137924.9	1.00	1.08	FPE	-234.99	-71.35	9.33
258	191084.4	190011.0	1.01	1.10	FPE	-248.33	-90.70	6.93
259	70392.3	75741.6	0.93	1.29	FPE	-191.64	-27.66	14.36
260	128416.7	137457.0	0.93	1.30	FPE	-202.68	-44.36	10.74
261	179873.6	190595.8	0.94	1.32	FPE	-207.69	-59.84	7.75
262	59824.8	66858.6	0.89	1.55	FPE	-166.04	-20.60	13.20
263	109855.7	121751.6	0.90	1.56	FPE	-176.08	-32.33	9.68
264	156213.1	169961.6	0.92	1.59	FPE	-180.52	-39.65	10.60
265	57835.5	67506.0	0.86	1.76	FPE	-146.58	-14.59	11.16
266	106884.7	123422.4	0.87	1.78	FPE	-151.69	-19.12	13.02
267	152723.4	172906.3	0.88	1.81	FPE	-151.39	-23.52	10.90
268	53006.9	61512.1	0.86	2.03	FPE	-141.73	-11.79	11.00
269	98799.6	112766.5	0.88	2.06	FPE	-141.49	-8.72	11.38
270	142295.8	158823.0	0.90	2.09	FPE	-142.21	-10.09	11.97
271	52389.4	62564.7	0.84	2.25	FPE	-136.06	-10.48	10.90
272	98223.0	115001.7	0.85	2.27	FPE	-133.42	-11.98	11.80
273	142132.0	162292.6	0.88	2.30	FPE	-131.76	-7.81	11.69

Modelo	Carga última P_u (kN)	Carga de plastificação P_0 (kN)	P_u / P_0	Parâmetro de esbeltez β	Modo de falha	Sigma x (MPa)	Sigma y (MPa)	Tau xy (MPa)
274	77254.2	74230.3	1.04	0.90	PPE	-274.48	-57.07	18.15
275	140001.7	133459.9	1.05	0.92	PPE	-278.91	-97.82	6.29
276	193661.3	184112.7	1.05	0.94	PPE	-286.02	-19.59	24.98
277	74668.7	74516.2	1.00	1.13	FPE	-228.72	-44.56	14.73
278	136604.7	135032.3	1.01	1.15	FPE	-247.03	-78.59	7.29
279	191175.0	187543.4	1.02	1.17	FPE	-258.50	-99.24	8.43
280	70906.9	75183.3	0.94	1.35	FPE	-205.33	-24.97	13.68
281	132300.4	137033.5	0.97	1.37	FPE	-208.79	-56.99	11.30
282	186729.9	191260.0	0.98	1.40	FPE	-220.12	-74.40	10.46
283	67689.2	76068.2	0.89	1.57	FPE	-184.59	-21.11	13.36
284	126874.2	139279.8	0.91	1.59	FPE	-181.76	-33.80	14.77
285	181475.4	195139.9	0.93	1.62	FPE	-192.72	-50.53	10.19
286	61495.8	69227.3	0.89	1.85	FPE	-167.11	-17.53	12.69
287	115772.6	127384.7	0.91	1.87	FPE	-174.60	-28.86	11.82
288	169994.7	179824.4	0.95	1.90	FPE	-170.98	-37.75	12.53
289	60043.7	70577.3	0.85	2.06	FPE	-151.14	-15.57	10.45
290	113067.8	130203.9	0.87	2.09	FPE	-151.49	-19.85	10.05
291	167091.4	184112.7	0.91	2.12	FPE	-151.58	-25.84	11.66
292	59060.2	68655.5	0.86	2.31	FPE	-136.52	-12.81	10.21
293	110733.1	127027.3	0.87	2.34	FPE	-140.84	-12.38	10.63
294	164119.2	180253.2	0.91	2.38	FPE	-133.81	-17.97	10.92
295	56674.1	60383.0	0.94	0.74	FPE	-225.63	-47.63	15.55
296	107206.6	108949.3	0.98	0.74	FPE	-255.33	-83.80	11.64
297	153438.8	148159.2	1.04	0.74	FPE	-269.01	-35.65	25.14
298	62278.8	73378.0	0.85	0.92	FPE	-200.77	-42.64	9.88
299	120695.2	134887.3	0.89	0.92	FPE	-226.48	-66.87	6.85
300	176258.2	186832.3	0.94	0.92	FPE	-233.20	-78.31	7.05
301	58766.8	76323.5	0.77	1.11	FPE	-185.85	-39.50	8.12
302	116923.8	141436.8	0.83	1.10	FPE	-207.68	-60.03	6.19
303	178623.5	197540.2	0.90	1.11	FPE	-228.02	-66.28	7.23
304	50033.8	66620.6	0.75	1.30	FPE	-182.13	-37.59	8.49
305	107703.9	123392.3	0.87	1.29	FPE	-241.70	-65.89	7.22
306	155413.9	172441.3	0.90	1.30	FPE	-243.49	-26.98	18.78
307	42424.5	49012.4	0.87	1.50	FPE	-242.45	-21.68	12.12
308	79303.4	89976.6	0.88	1.50	FPE	-240.70	-56.49	2.51
309	111051.8	124963.1	0.89	1.50	FPE	-241.94	-61.18	3.44
310	34411.6	41670.2	0.83	1.70	FPE	-217.85	-21.89	13.30
311	64646.9	76230.8	0.85	1.70	FPE	-231.40	-48.71	2.37
312	89502.8	105708.9	0.85	1.71	FPE	-234.97	-49.94	2.83
313	26327.9	33561.3	0.78	1.92	FPE	-212.33	-20.61	11.57
314	45263.2	56709.4	0.80	1.93	FPE	-224.61	-42.70	2.34
315	62314.3	78142.1	0.80	1.94	FPE	-230.19	-44.42	7.02

Modelo	Carga última P_u (kN)	Carga de plastificação P_0 (kN)	P_u / P_0	Parâmetro de esbeltez β	Modo de falha	Sigma x (MPa)	Sigma y (MPa)	Tau xy (MPa)
316	66897.1	75058.6	0.89	0.74	FPE	-226.36	-42.14	13.79
317	127105.9	135766.5	0.94	0.74	FPE	-245.44	-76.27	7.88
318	182283.3	184778.9	0.99	0.74	FPE	-265.24	-58.84	23.67
319	61071.3	72979.4	0.84	0.93	FPE	-214.19	-40.14	11.92
320	120194.9	133102.5	0.90	0.93	FPE	-236.66	-71.00	7.17
321	175069.1	182829.6	0.96	0.93	FPE	-258.42	-70.90	11.73
322	46790.2	53400.3	0.88	1.13	FPE	-241.56	-43.47	14.13
323	90512.9	96673.2	0.94	1.13	FPE	-249.89	-72.46	7.23
324	124987.8	132149.1	0.95	1.14	FPE	-258.21	-76.64	4.16
325	40435.9	47212.2	0.86	1.33	FPE	-220.33	-33.06	10.75
326	76499.9	85503.7	0.89	1.33	FPE	-246.98	-65.69	3.17
327	105509.2	117112.0	0.90	1.34	FPE	-245.74	-64.68	3.48
328	37602.8	45901.1	0.82	1.52	FPE	-215.23	-30.02	7.96
329	72174.7	83461.6	0.86	1.52	FPE	-243.37	-59.13	2.47
330	100023.1	114849.5	0.87	1.53	FPE	-245.71	-59.30	2.45
331	34892.2	45025.7	0.77	1.71	FPE	-202.58	-24.74	6.09
332	68572.4	82162.1	0.83	1.72	FPE	-235.44	-52.51	2.48
333	95276.2	113522.9	0.84	1.72	FPE	-237.63	-52.41	2.51
334	28578.9	38737.6	0.74	1.93	FPE	-194.14	-19.98	4.71
335	56375.7	70466.6	0.80	1.93	FPE	-235.46	-41.82	10.55
336	77854.0	97257.5	0.80	1.94	FPE	-235.03	-47.81	2.01
337	52189.3	55622.3	0.94	0.76	FPE	-239.02	-56.49	14.56
338	99467.9	98258.4	1.01	0.76	FPE	-270.05	-56.14	30.76
339	135709.2	130758.4	1.04	0.77	FPE	-276.80	-83.68	20.89
340	47121.5	51684.8	0.91	0.95	FPE	-234.03	-51.46	13.14
341	89335.3	92020.8	0.97	0.96	FPE	-264.41	-71.98	15.19
342	123528.9	123624.1	1.00	0.96	FPE	-269.22	-99.88	7.75
343	44488.1	49319.8	0.90	1.15	FPE	-233.27	-36.53	16.43
344	82079.1	88382.2	0.93	1.15	FPE	-252.51	-76.28	4.66
345	111959.7	119647.7	0.94	1.16	FPE	-249.71	-72.76	4.93
346	40595.5	47853.2	0.85	1.34	FPE	-232.35	-32.66	13.44
347	76093.5	86228.7	0.88	1.35	FPE	-246.93	-67.37	3.44
348	104181.7	117475.6	0.89	1.35	FPE	-249.76	-67.64	3.76
349	38349.9	46948.2	0.82	1.54	FPE	-225.17	-29.73	10.28
350	72337.3	85003.5	0.85	1.54	FPE	-246.27	-62.15	2.31
351	99555.8	116431.4	0.86	1.55	FPE	-251.68	-64.76	3.77
352	31006.3	39833.4	0.78	1.75	FPE	-219.35	-26.96	7.50
353	58402.8	71921.9	0.81	1.76	FPE	-239.78	-56.98	3.38
354	79992.9	98465.8	0.81	1.77	FPE	-243.62	-56.78	2.68
355	29720.8	39911.4	0.74	1.95	FPE	-209.76	-23.29	5.57
356	56875.0	72372.4	0.79	1.95	FPE	-240.20	-50.58	5.38
357	78071.8	99531.4	0.78	1.96	FPE	-243.52	-52.83	2.30

Modelo	Carga última P_u (kN)	Carga de plastificação P_0 (kN)	P_u / P_0	Parâmetro de esbeltez β	Modo de falha	Sigma x (MPa)	Sigma y (MPa)	Tau xy (MPa)
358	45495.0	46192.2	0.98	0.78	FPE	-256.12	-57.01	16.96
359	83287.0	80242.8	1.04	0.78	FPE	-279.64	-75.94	26.85
360	110759.3	105197.0	1.05	0.79	FPE	-266.22	-97.30	8.54
361	42295.2	44191.0	0.96	0.98	FPE	-258.42	-56.94	14.94
362	75176.1	77604.8	0.97	0.98	FPE	-242.12	-69.24	6.32
363	101687.8	103013.8	0.99	0.99	FPE	-249.09	-78.10	7.77
364	38614.3	43160.0	0.89	1.18	FPE	-217.49	-40.43	10.70
365	69587.8	76452.6	0.91	1.18	FPE	-231.46	-55.48	6.72
366	96819.4	102468.0	0.94	1.19	FPE	-252.27	-74.07	6.38
367	36094.4	42683.6	0.85	1.37	FPE	-212.74	-36.52	8.35
368	65075.3	76149.4	0.85	1.38	FPE	-219.53	-47.92	5.96
369	90574.0	102857.9	0.88	1.39	FPE	-239.16	-69.08	6.77
370	34412.9	42553.6	0.81	1.57	FPE	-222.18	-35.93	6.15
371	62541.6	76376.8	0.82	1.58	FPE	-239.32	-50.58	3.74
372	86149.6	103832.5	0.83	1.59	FPE	-239.99	-64.83	4.14
373	33218.8	42654.7	0.78	1.76	FPE	-228.03	-27.88	10.38
374	60590.9	76958.0	0.79	1.77	FPE	-235.48	-46.73	2.81
375	84581.2	105197.0	0.80	1.79	FPE	-244.73	-52.38	12.27
376	27300.9	36731.8	0.74	1.99	FPE	-224.91	-26.93	8.37
377	50544.3	66143.3	0.76	2.00	FPE	-246.32	-56.06	1.43
378	69205.2	90460.6	0.77	2.02	FPE	-232.85	-58.30	4.37
379	49831.1	52551.0	0.95	0.78	FPE	-257.43	-52.28	18.41
380	91671.2	91466.0	1.00	0.78	FPE	-275.88	-65.50	29.45
381	124788.2	119985.0	1.04	0.79	FPE	-284.74	-70.77	32.04
382	46528.3	50263.9	0.93	0.98	FPE	-260.16	-34.43	21.26
383	85166.2	88451.2	0.96	0.98	FPE	-267.56	-61.68	27.82
384	114088.5	117490.0	0.97	0.99	FPE	-258.66	-84.50	7.71
385	43307.8	49085.7	0.88	1.17	FPE	-247.11	-46.02	14.61
386	78014.9	87134.3	0.90	1.18	FPE	-238.21	-60.54	6.29
387	106087.5	116866.2	0.91	1.19	FPE	-240.52	-68.46	6.61
388	40105.3	48541.1	0.83	1.37	FPE	-228.84	-37.29	11.27
389	73459.9	86787.8	0.85	1.38	FPE	-239.77	-56.51	4.68
390	99936.7	117311.7	0.85	1.39	FPE	-241.52	-63.32	5.09
391	35200.4	44364.2	0.79	1.58	FPE	-227.15	-26.82	15.55
392	64395.0	79510.6	0.81	1.59	FPE	-236.53	-52.03	3.93
393	89088.4	107899.7	0.83	1.61	FPE	-242.47	-66.77	5.71
394	28700.9	37765.6	0.76	1.82	FPE	-220.38	-25.27	13.21
395	52985.4	67613.0	0.78	1.83	FPE	-236.70	-60.07	5.59
396	72529.9	91915.8	0.79	1.85	FPE	-229.32	-41.97	14.60
397	27908.5	38516.4	0.72	2.01	FPE	-217.36	-24.07	10.06
398	52520.7	69322.5	0.76	2.03	FPE	-245.22	-53.95	5.00
399	71928.7	94722.7	0.76	2.05	FPE	-212.40	-25.08	18.34

Modelo	Carga última P_u (kN)	Carga de plastificação P_0 (kN)	P_u / P_0	Parâmetro de esbeltez β	Modo de falha	Sigma x (MPa)	Sigma y (MPa)	Tau xy (MPa)
400	49479.1	52184.9	0.95	0.79	FPE	-252.54	-57.81	14.47
401	90206.5	90408.9	1.00	0.79	FPE	-275.75	-58.45	31.51
402	122204.6	118107.0	1.03	0.81	FPE	-289.59	-115.68	6.24
403	46392.0	50489.0	0.92	0.99	FPE	-260.77	-52.01	29.71
404	84629.2	88537.6	0.96	1.00	FPE	-269.50	-55.44	28.46
405	113823.4	117229.8	0.97	1.01	FPE	-259.18	-84.37	8.65
406	44110.4	49748.3	0.89	1.19	FPE	-253.36	-55.45	12.16
407	80456.6	88069.8	0.91	1.20	FPE	-255.50	-77.57	9.32
408	106808.1	117814.6	0.91	1.21	FPE	-247.89	-72.98	7.23
409	34397.3	40865.3	0.84	1.42	FPE	-214.31	-31.22	15.10
410	62423.4	72364.4	0.86	1.43	FPE	-235.13	-48.94	9.82
411	89822.4	97180.4	0.92	1.46	FPE	-247.68	-60.32	14.77
412	33173.3	41512.7	0.80	1.62	FPE	-210.29	-30.38	11.90
413	61025.1	74035.2	0.82	1.63	FPE	-239.48	-64.56	7.30
414	86086.1	100125.1	0.86	1.65	FPE	-239.47	-59.20	5.50
415	27273.9	35518.8	0.77	1.86	FPE	-190.28	-24.89	11.26
416	51261.7	63379.3	0.81	1.88	FPE	-230.61	-52.49	7.96
417	70053.9	86041.8	0.81	1.92	FPE	-223.73	-38.94	16.56
418	26519.3	36571.4	0.73	2.06	FPE	-211.69	-21.99	13.12
419	48913.5	65614.4	0.75	2.08	FPE	-233.29	-55.04	5.33
420	67635.2	89511.5	0.76	2.11	FPE	-219.29	-51.36	9.35
421	42043.3	43038.4	0.98	0.83	FPE	-265.79	-54.29	25.94
422	75706.1	73675.3	1.03	0.84	FPE	-291.26	-75.95	35.54
423	101437.3	95735.6	1.06	0.87	FPE	-300.40	-99.93	33.37
424	40249.8	43324.3	0.93	1.03	FPE	-252.77	-47.49	19.58
425	73558.6	75247.7	0.98	1.05	FPE	-275.33	-90.23	6.65
426	100529.6	99166.2	1.01	1.08	FPE	-285.22	-39.82	31.75
427	38614.4	43991.4	0.88	1.24	FPE	-231.47	-39.02	13.88
428	72092.2	77249.0	0.93	1.25	FPE	-268.44	-15.84	16.84
429	98737.4	102882.8	0.96	1.28	FPE	-272.67	-75.22	7.46
430	36913.8	44876.3	0.82	1.44	FPE	-211.15	-34.44	11.74
431	70368.4	79495.2	0.89	1.46	FPE	-250.93	-59.16	12.28
432	96863.4	106762.7	0.91	1.48	FPE	-255.31	-70.91	6.24
433	30897.1	38035.3	0.81	1.69	FPE	-216.64	-27.27	15.71
434	59226.6	67600.2	0.88	1.72	FPE	-247.37	-53.32	5.41
435	81719.5	91447.2	0.89	1.76	FPE	-230.87	-33.71	21.24
436	29706.5	39385.4	0.75	1.89	FPE	-196.87	-25.52	15.07
437	55881.1	70419.4	0.79	1.92	FPE	-229.93	-47.59	7.56
438	77081.7	95735.6	0.81	1.95	FPE	-223.71	-32.12	20.19
439	26787.8	37463.5	0.72	2.12	FPE	-181.26	-23.55	14.84
440	49764.0	67242.8	0.74	2.15	FPE	-198.67	-43.12	10.47
441	69919.5	91876.0	0.76	2.19	FPE	-188.90	-39.18	8.38

APÊNDICE D – CORREÇÃO DA EQUAÇÃO (27)

Este apêndice apresenta o significado das colunas da Tabela 15, bem como a correção (coluna “Ajuste novo”) do Termo 2 da equação (27) para os modelos de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304, que foram objeto da análise paramétrica realizada neste trabalho de pesquisa.

Modelo – Número sequencial do modelo em elementos finitos da análise paramétrica;

Termo 1 – Primeira parcela da equação (27) exibida na Tabela 10;

Termo 2 – Segunda parcela da equação (27) exibida na Tabela 10;

Termo 3 – Terceira parcela da equação (27) exibida na Tabela 10;

Termo 4 – Quarta parcela da equação (27) exibida na Tabela 10;

Soma dos termos (equação (27)) – Termo 1 + Termo 2 + Termo 3 + Termo 4;

Soma correta – Termo 1 + Termo 3 + Termo 4;

Ajuste – 1 - Soma correta;

$$1 - \left(\frac{\sigma_{x \max}}{\sigma_{Ux}} \right);$$

$$3 - \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\sigma_{Uy}} \right);$$

$$1*3 - \left(\frac{\sigma_{x \max}}{\sigma_{Ux}} \right) \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\sigma_{Uy}} \right);$$

Ajuste novo – Correção dada pela função A(K) conforme a equação (56);

Nova soma (equação (58)) – Termo 1 + Termo 3 + Termo 4 + Ajuste novo.

Tabela 15 – Correção do Termo 2 da equação (27)

Modelo	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Soma dos termos	Soma correta	Ajuste	1	3	1*3	Ajuste novo	Nova soma
1	1.23	-0.09	0.02	0.03	1.18	1.28	-0.28	1.11	0.14	0.15	0.26	1.54
2	1.09	-0.27	0.17	0.00	0.99	1.26	-0.26	1.04	0.41	0.43	-0.34	0.92
3	1.14	-0.29	0.19	0.00	1.04	1.33	-0.33	1.07	0.43	0.46	-0.40	0.92
4	1.14	-0.15	0.07	0.01	1.07	1.22	-0.22	1.07	0.27	0.29	-0.02	1.19
5	0.92	-0.13	0.06	0.02	0.87	1.00	0.00	0.96	0.25	0.24	0.07	1.07
6	0.97	-0.18	0.11	0.00	0.91	1.08	-0.08	0.98	0.34	0.33	-0.12	0.96
7	0.97	-0.10	0.05	0.00	0.93	1.03	-0.03	0.98	0.23	0.23	0.10	1.12
8	0.91	-0.12	0.08	0.00	0.88	1.00	0.00	0.96	0.29	0.28	0.00	1.00
9	0.93	-0.13	0.09	0.00	0.90	1.03	-0.03	0.97	0.30	0.29	-0.04	0.98
10	0.95	-0.08	0.05	0.00	0.93	1.01	-0.01	0.98	0.23	0.22	0.11	1.12
11	0.98	-0.10	0.08	0.00	0.97	1.06	-0.06	0.99	0.29	0.28	-0.02	1.04
12	1.05	-0.11	0.10	0.00	1.05	1.16	-0.16	1.03	0.32	0.33	-0.11	1.04
13	0.95	-0.05	0.05	0.00	0.96	1.01	-0.01	0.98	0.23	0.23	0.10	1.11
14	1.02	-0.07	0.08	0.00	1.04	1.10	-0.10	1.01	0.29	0.29	-0.04	1.07
15	1.03	-0.07	0.10	0.00	1.06	1.13	-0.13	1.02	0.31	0.32	-0.09	1.04
16	0.97	-0.03	0.06	0.00	1.01	1.03	-0.03	0.99	0.24	0.24	0.08	1.11
17	1.09	-0.04	0.09	0.00	1.15	1.19	-0.19	1.05	0.30	0.32	-0.09	1.10
18	1.12	-0.04	0.11	0.00	1.19	1.23	-0.23	1.06	0.32	0.34	-0.15	1.08
19	0.39	0.00	0.00	0.01	0.41	0.41	0.59	0.63	0.07	0.04	0.50	0.90
20	0.47	0.00	0.01	0.02	0.49	0.49	0.51	0.68	0.09	0.06	0.45	0.94
21	0.41	0.00	0.05	0.01	0.47	0.47	0.53	0.64	0.22	0.14	0.29	0.76

Modelo	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Soma dos termos	Soma correta	Ajuste	1	3	1*3	Ajuste novo	Nova soma
22	1.19	-0.08	0.01	0.03	1.15	1.23	-0.23	1.09	0.12	0.13	0.30	1.53
23	1.18	-0.09	0.02	0.03	1.14	1.23	-0.23	1.08	0.13	0.15	0.28	1.50
24	1.17	-0.09	0.02	0.04	1.13	1.23	-0.23	1.08	0.14	0.15	0.26	1.49
25	0.83	-0.08	0.03	0.01	0.79	0.87	0.13	0.91	0.17	0.16	0.25	1.12
26	1.01	-0.18	0.12	0.00	0.95	1.13	-0.13	1.00	0.35	0.35	-0.17	0.96
27	1.06	-0.21	0.15	0.00	1.01	1.22	-0.22	1.03	0.39	0.40	-0.27	0.95
28	0.65	-0.05	0.02	0.00	0.62	0.67	0.33	0.80	0.15	0.12	0.33	1.00
29	0.91	-0.11	0.08	0.00	0.88	1.00	0.00	0.95	0.29	0.28	0.00	0.99
30	0.88	-0.12	0.11	0.00	0.86	0.99	0.01	0.94	0.33	0.30	-0.07	0.92
31	0.57	-0.03	0.02	0.00	0.56	0.60	0.40	0.76	0.14	0.11	0.36	0.95
32	0.80	-0.06	0.04	0.02	0.81	0.86	0.14	0.90	0.21	0.18	0.19	1.06
33	0.74	-0.07	0.07	0.00	0.75	0.82	0.18	0.86	0.27	0.23	0.10	0.92
34	0.51	-0.02	0.02	0.00	0.52	0.54	0.46	0.72	0.13	0.10	0.38	0.92
35	0.99	-0.05	0.06	0.01	1.01	1.06	-0.06	1.00	0.24	0.24	0.07	1.13
36	0.70	-0.05	0.09	0.00	0.74	0.79	0.21	0.84	0.29	0.24	0.06	0.85
37	0.48	-0.01	0.02	0.01	0.50	0.51	0.49	0.70	0.13	0.09	0.40	0.90
38	1.05	-0.03	0.08	0.01	1.11	1.14	-0.14	1.03	0.28	0.29	-0.03	1.11
39	1.14	-0.04	0.16	0.00	1.25	1.30	-0.30	1.07	0.40	0.42	-0.32	0.98
40	0.46	0.00	0.01	0.01	0.48	0.48	0.52	0.68	0.10	0.07	0.44	0.92
41	0.45	0.00	0.03	0.01	0.49	0.49	0.51	0.67	0.16	0.11	0.36	0.85
42	0.40	0.00	0.01	0.01	0.41	0.41	0.59	0.63	0.10	0.06	0.46	0.87
43	0.96	-0.15	0.06	0.01	0.88	1.03	-0.03	0.98	0.25	0.25	0.06	1.09
44	1.09	-0.23	0.13	0.00	1.00	1.23	-0.23	1.04	0.37	0.38	-0.23	0.99
45	1.03	-0.24	0.15	0.00	0.95	1.19	-0.19	1.02	0.39	0.40	-0.26	0.93
46	0.72	-0.09	0.04	0.00	0.68	0.76	0.24	0.85	0.20	0.17	0.23	0.99
47	0.80	-0.12	0.07	0.00	0.76	0.87	0.13	0.90	0.26	0.24	0.08	0.96
48	0.85	-0.14	0.09	0.00	0.81	0.95	0.05	0.92	0.30	0.28	-0.01	0.93
49	0.77	-0.05	0.02	0.01	0.74	0.79	0.21	0.88	0.14	0.13	0.32	1.11
50	0.74	-0.07	0.05	0.00	0.72	0.80	0.20	0.86	0.22	0.19	0.18	0.98
51	0.68	-0.08	0.06	0.00	0.66	0.74	0.26	0.82	0.25	0.21	0.15	0.89
52	0.65	-0.04	0.02	0.01	0.65	0.68	0.32	0.81	0.15	0.12	0.33	1.02
53	0.61	-0.05	0.04	0.00	0.61	0.65	0.35	0.78	0.20	0.16	0.25	0.90
54	0.61	-0.05	0.05	0.00	0.61	0.66	0.34	0.78	0.21	0.17	0.23	0.89
55	0.57	-0.02	0.02	0.01	0.58	0.60	0.40	0.75	0.15	0.11	0.35	0.94
56	0.60	-0.02	0.03	0.01	0.62	0.64	0.36	0.78	0.16	0.13	0.32	0.96
57	0.56	-0.03	0.03	0.00	0.57	0.59	0.41	0.75	0.18	0.13	0.30	0.89
58	0.51	-0.01	0.04	0.01	0.54	0.55	0.45	0.71	0.19	0.13	0.30	0.85
59	0.49	-0.01	0.04	0.01	0.53	0.54	0.46	0.70	0.21	0.15	0.27	0.82
60	0.49	-0.01	0.05	0.01	0.54	0.55	0.45	0.70	0.22	0.15	0.26	0.81
61	0.47	0.00	0.04	0.01	0.52	0.52	0.48	0.69	0.19	0.13	0.31	0.82
62	0.47	0.00	0.05	0.01	0.53	0.53	0.47	0.69	0.23	0.16	0.25	0.78
63	0.47	0.01	0.05	0.01	0.53	0.53	0.47	0.68	0.23	0.16	0.25	0.78

Modelo	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Soma dos termos	Soma correta	Ajuste	1	3	1*3	Ajuste novo	Nova soma
64	1.09	-0.16	0.07	0.01	1.01	1.17	-0.17	1.04	0.26	0.27	0.00	1.17
65	1.10	-0.24	0.15	0.00	1.01	1.26	-0.26	1.05	0.39	0.41	-0.30	0.96
66	1.17	-0.07	0.01	0.03	1.15	1.22	-0.22	1.08	0.11	0.12	0.33	1.55
67	0.82	-0.09	0.04	0.01	0.78	0.87	0.13	0.90	0.20	0.18	0.20	1.06
68	1.00	-0.15	0.09	0.00	0.95	1.10	-0.10	1.00	0.31	0.31	-0.07	1.03
69	0.95	-0.16	0.12	0.00	0.91	1.08	-0.08	0.97	0.35	0.34	-0.15	0.93
70	0.78	-0.04	0.02	0.02	0.78	0.82	0.18	0.89	0.12	0.11	0.35	1.17
71	0.71	-0.08	0.06	0.00	0.70	0.78	0.22	0.84	0.25	0.21	0.14	0.92
72	0.80	-0.10	0.08	0.00	0.80	0.89	0.11	0.90	0.29	0.26	0.03	0.92
73	0.68	-0.03	0.01	0.01	0.68	0.70	0.30	0.82	0.12	0.10	0.38	1.09
74	0.64	-0.04	0.04	0.01	0.64	0.69	0.31	0.80	0.20	0.16	0.24	0.92
75	0.67	-0.05	0.05	0.01	0.67	0.72	0.28	0.82	0.22	0.18	0.21	0.93
76	0.55	-0.01	0.01	0.01	0.55	0.57	0.43	0.74	0.11	0.08	0.41	0.98
77	0.55	-0.02	0.03	0.01	0.57	0.59	0.41	0.74	0.17	0.13	0.31	0.90
78	0.55	-0.02	0.03	0.01	0.57	0.59	0.41	0.74	0.18	0.13	0.31	0.90
79	0.49	-0.01	0.01	0.01	0.50	0.51	0.49	0.70	0.11	0.08	0.42	0.93
80	0.50	-0.01	0.03	0.00	0.52	0.53	0.47	0.70	0.16	0.12	0.34	0.87
81	0.49	-0.01	0.03	0.00	0.52	0.53	0.47	0.70	0.19	0.13	0.31	0.84
82	0.48	0.00	0.01	0.01	0.50	0.49	0.51	0.69	0.09	0.06	0.45	0.95
83	0.47	0.01	0.03	0.01	0.51	0.50	0.50	0.68	0.16	0.11	0.35	0.85
84	0.46	0.01	0.03	0.01	0.51	0.50	0.50	0.68	0.17	0.12	0.34	0.84
85	1.09	-0.15	0.06	0.02	1.02	1.17	-0.17	1.04	0.24	0.25	0.04	1.21
86	1.17	-0.29	0.20	0.00	1.09	1.37	-0.37	1.08	0.45	0.49	-0.46	0.92
87	1.16	-0.06	0.01	0.02	1.13	1.19	-0.19	1.07	0.10	0.11	0.36	1.55
88	0.92	-0.09	0.04	0.01	0.87	0.96	0.04	0.96	0.19	0.19	0.19	1.15
89	1.00	-0.17	0.12	0.00	0.96	1.12	-0.12	1.00	0.35	0.35	-0.16	0.96
90	1.08	-0.21	0.18	0.00	1.05	1.26	-0.26	1.04	0.42	0.44	-0.35	0.91
91	0.72	-0.05	0.03	0.01	0.70	0.75	0.25	0.85	0.16	0.14	0.29	1.04
92	0.83	-0.09	0.07	0.01	0.82	0.91	0.09	0.91	0.26	0.24	0.08	0.99
93	0.87	-0.11	0.11	0.00	0.87	0.98	0.02	0.93	0.32	0.30	-0.06	0.92
94	0.65	-0.04	0.03	0.01	0.65	0.68	0.32	0.81	0.16	0.13	0.31	1.00
95	0.75	-0.04	0.04	0.01	0.75	0.79	0.21	0.86	0.19	0.16	0.24	1.03
96	0.66	-0.05	0.05	0.01	0.67	0.72	0.28	0.82	0.23	0.19	0.18	0.91
97	0.62	-0.02	0.02	0.01	0.63	0.64	0.36	0.79	0.12	0.10	0.38	1.03
98	0.59	-0.02	0.03	0.01	0.61	0.63	0.37	0.77	0.18	0.14	0.30	0.93
99	0.58	-0.02	0.03	0.01	0.60	0.62	0.38	0.76	0.19	0.14	0.29	0.90
100	0.51	0.00	0.02	0.01	0.53	0.54	0.46	0.72	0.13	0.09	0.39	0.93
101	0.53	0.00	0.02	0.01	0.57	0.57	0.43	0.73	0.15	0.11	0.36	0.93
102	0.53	0.00	0.05	0.01	0.58	0.58	0.42	0.73	0.22	0.16	0.25	0.83
103	0.47	0.01	0.02	0.01	0.50	0.50	0.50	0.69	0.13	0.09	0.40	0.90
104	0.49	0.01	0.03	0.01	0.54	0.53	0.47	0.70	0.18	0.13	0.32	0.85
105	0.49	0.01	0.03	0.01	0.54	0.53	0.47	0.70	0.18	0.12	0.33	0.85

Modelo	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Soma dos termos	Soma correta	Ajuste	1	3	1*3	Ajuste novo	Nova soma
106	1.10	-0.17	0.08	0.01	1.01	1.19	-0.19	1.05	0.28	0.30	-0.05	1.14
107	1.19	-0.28	0.20	0.00	1.11	1.39	-0.39	1.09	0.44	0.49	-0.45	0.94
108	1.23	-0.15	0.05	0.07	1.21	1.35	-0.35	1.11	0.23	0.25	0.05	1.40
109	1.00	-0.09	0.04	0.01	0.96	1.05	-0.05	1.00	0.19	0.19	0.18	1.23
110	1.09	-0.18	0.13	0.00	1.04	1.22	-0.22	1.04	0.36	0.38	-0.22	1.00
111	1.05	-0.20	0.17	0.00	1.03	1.22	-0.22	1.03	0.41	0.42	-0.32	0.91
112	0.74	-0.05	0.02	0.01	0.72	0.77	0.23	0.86	0.15	0.13	0.31	1.08
113	0.80	-0.09	0.08	0.00	0.79	0.89	0.11	0.90	0.28	0.25	0.05	0.94
114	0.84	-0.11	0.11	0.00	0.84	0.95	0.05	0.91	0.34	0.31	-0.07	0.88
115	0.64	-0.03	0.02	0.01	0.64	0.67	0.33	0.80	0.15	0.12	0.33	1.00
116	0.67	-0.04	0.05	0.01	0.68	0.72	0.28	0.82	0.22	0.18	0.21	0.93
117	0.69	-0.05	0.08	0.00	0.72	0.77	0.23	0.83	0.28	0.23	0.10	0.87
118	0.56	-0.02	0.02	0.01	0.58	0.59	0.41	0.75	0.15	0.11	0.34	0.94
119	0.60	-0.02	0.03	0.01	0.62	0.64	0.36	0.77	0.18	0.14	0.30	0.94
120	0.60	-0.02	0.05	0.01	0.64	0.66	0.34	0.77	0.22	0.17	0.22	0.88
121	0.54	0.00	0.02	0.01	0.57	0.57	0.43	0.73	0.16	0.11	0.35	0.91
122	0.57	0.00	0.04	0.01	0.61	0.61	0.39	0.75	0.19	0.14	0.28	0.89
123	0.57	0.00	0.05	0.01	0.63	0.63	0.37	0.76	0.23	0.18	0.21	0.84
124	0.52	0.01	0.02	0.01	0.56	0.55	0.45	0.72	0.14	0.10	0.37	0.92
125	0.53	0.02	0.04	0.01	0.60	0.58	0.42	0.73	0.20	0.15	0.27	0.85
126	0.53	0.02	0.04	0.01	0.60	0.58	0.42	0.72	0.20	0.15	0.28	0.85
127	1.04	-0.16	0.08	0.01	0.97	1.13	-0.13	1.02	0.29	0.29	-0.04	1.09
128	1.20	-0.11	0.04	0.08	1.20	1.31	-0.31	1.10	0.19	0.21	0.14	1.46
129	1.28	-0.12	0.04	0.06	1.27	1.38	-0.38	1.13	0.20	0.22	0.11	1.50
130	1.00	-0.10	0.05	0.01	0.96	1.06	-0.06	1.00	0.22	0.22	0.11	1.17
131	1.09	-0.18	0.15	0.00	1.06	1.24	-0.24	1.04	0.39	0.41	-0.28	0.96
132	1.14	-0.21	0.21	0.00	1.15	1.35	-0.35	1.07	0.45	0.49	-0.45	0.90
133	0.74	-0.05	0.03	0.00	0.72	0.77	0.23	0.86	0.17	0.15	0.28	1.05
134	0.90	-0.10	0.10	0.00	0.90	1.00	0.00	0.95	0.32	0.31	-0.07	0.94
135	0.99	-0.13	0.18	0.01	1.04	1.17	-0.17	0.99	0.42	0.42	-0.31	0.86
136	0.70	-0.03	0.02	0.01	0.71	0.74	0.26	0.84	0.13	0.11	0.35	1.08
137	0.81	-0.05	0.05	0.01	0.82	0.87	0.13	0.90	0.23	0.21	0.15	1.01
138	0.77	-0.06	0.10	0.01	0.82	0.88	0.12	0.88	0.32	0.28	-0.02	0.86
139	0.67	-0.01	0.03	0.01	0.69	0.71	0.29	0.82	0.17	0.14	0.30	1.00
140	0.72	-0.02	0.05	0.01	0.77	0.78	0.22	0.85	0.23	0.20	0.16	0.94
141	0.74	-0.02	0.09	0.00	0.82	0.83	0.17	0.86	0.30	0.26	0.03	0.87
142	0.59	0.00	0.04	0.00	0.64	0.64	0.36	0.77	0.20	0.16	0.25	0.89
143	0.62	0.00	0.07	0.01	0.70	0.69	0.31	0.79	0.26	0.21	0.15	0.84
144	0.64	0.01	0.07	0.01	0.72	0.71	0.29	0.80	0.26	0.21	0.14	0.86
145	0.55	0.02	0.03	0.01	0.61	0.59	0.41	0.74	0.19	0.14	0.29	0.89
146	0.59	0.02	0.04	0.01	0.65	0.63	0.37	0.77	0.19	0.15	0.28	0.91
147	0.59	0.03	0.05	0.01	0.68	0.65	0.35	0.77	0.23	0.18	0.21	0.86

Modelo	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Soma dos termos	Soma correta	Ajuste	1	3	1*3	Ajuste novo	Nova soma
148	1.18	-0.19	0.08	0.01	1.08	1.27	-0.27	1.09	0.29	0.31	-0.08	1.19
149	1.04	-0.26	0.17	0.00	0.96	1.21	-0.21	1.02	0.41	0.42	-0.31	0.90
150	1.08	-0.27	0.18	0.00	0.99	1.26	-0.26	1.04	0.42	0.44	-0.35	0.91
151	1.00	-0.13	0.06	0.01	0.94	1.07	-0.07	1.00	0.25	0.25	0.06	1.13
152	0.95	-0.17	0.11	0.00	0.90	1.06	-0.06	0.98	0.33	0.32	-0.09	0.97
153	0.97	-0.18	0.12	0.00	0.92	1.10	-0.10	0.99	0.35	0.35	-0.15	0.94
154	0.87	-0.09	0.05	0.01	0.84	0.93	0.07	0.93	0.23	0.21	0.14	1.06
155	0.83	-0.11	0.08	0.00	0.80	0.91	0.09	0.91	0.28	0.25	0.04	0.95
156	0.87	-0.10	0.06	0.01	0.85	0.94	0.06	0.93	0.24	0.22	0.11	1.05
157	0.80	-0.06	0.05	0.00	0.79	0.85	0.15	0.89	0.22	0.20	0.17	1.02
158	0.85	-0.08	0.08	0.00	0.84	0.93	0.07	0.92	0.28	0.25	0.04	0.97
159	0.90	-0.08	0.06	0.01	0.89	0.96	0.04	0.95	0.24	0.23	0.10	1.06
160	0.63	-0.04	0.04	0.01	0.65	0.68	0.32	0.80	0.21	0.17	0.23	0.92
161	0.73	-0.05	0.07	0.00	0.76	0.81	0.19	0.86	0.27	0.23	0.10	0.91
162	0.70	-0.05	0.07	0.00	0.73	0.77	0.23	0.84	0.26	0.22	0.11	0.89
163	0.33	0.00	0.00	0.01	0.34	0.35	0.65	0.58	0.07	0.04	0.51	0.85
164	0.47	-0.01	0.01	0.02	0.49	0.49	0.51	0.68	0.09	0.06	0.46	0.95
165	0.44	-0.01	0.04	0.01	0.48	0.49	0.51	0.67	0.20	0.14	0.30	0.79
166	0.32	0.00	0.00	0.01	0.34	0.34	0.66	0.57	0.05	0.03	0.52	0.86
167	0.30	0.00	0.01	0.01	0.33	0.32	0.68	0.55	0.12	0.07	0.45	0.77
168	0.29	0.00	0.01	0.01	0.31	0.31	0.69	0.54	0.11	0.06	0.46	0.77
169	1.01	-0.13	0.04	0.02	0.94	1.07	-0.07	1.00	0.21	0.21	0.14	1.22
170	1.16	-0.29	0.20	0.00	1.07	1.37	-0.37	1.08	0.45	0.48	-0.45	0.92
171	1.21	-0.10	0.02	0.03	1.16	1.26	-0.26	1.10	0.14	0.16	0.25	1.51
172	0.78	-0.07	0.03	0.01	0.74	0.81	0.19	0.88	0.16	0.14	0.28	1.09
173	0.94	-0.17	0.12	0.00	0.89	1.07	-0.07	0.97	0.35	0.34	-0.13	0.93
174	1.01	-0.20	0.15	0.00	0.96	1.15	-0.15	1.00	0.38	0.38	-0.23	0.92
175	0.57	-0.04	0.02	0.01	0.55	0.60	0.40	0.76	0.15	0.11	0.35	0.95
176	0.82	-0.07	0.04	0.02	0.80	0.88	0.12	0.90	0.20	0.18	0.20	1.08
177	0.71	-0.10	0.09	0.00	0.70	0.80	0.20	0.84	0.29	0.25	0.06	0.86
178	0.47	-0.03	0.02	0.01	0.46	0.49	0.51	0.68	0.14	0.09	0.39	0.88
179	0.51	-0.03	0.02	0.01	0.51	0.54	0.46	0.71	0.15	0.11	0.36	0.90
180	0.54	-0.04	0.04	0.01	0.54	0.59	0.41	0.73	0.21	0.15	0.26	0.85
181	0.41	-0.01	0.02	0.01	0.42	0.44	0.56	0.64	0.12	0.08	0.42	0.86
182	0.40	-0.01	0.01	0.01	0.41	0.42	0.58	0.63	0.12	0.08	0.43	0.85
183	0.39	-0.01	0.01	0.01	0.40	0.41	0.59	0.63	0.11	0.07	0.44	0.86
184	0.39	0.00	0.01	0.01	0.40	0.40	0.60	0.62	0.08	0.05	0.48	0.89
185	0.36	-0.01	0.02	0.01	0.38	0.39	0.61	0.60	0.13	0.08	0.42	0.81
186	0.36	-0.01	0.01	0.01	0.38	0.38	0.62	0.60	0.12	0.07	0.43	0.82
187	0.35	0.00	0.01	0.01	0.37	0.37	0.63	0.59	0.09	0.05	0.47	0.84
188	0.34	0.00	0.01	0.01	0.36	0.36	0.64	0.58	0.09	0.05	0.48	0.84
189	0.33	0.00	0.01	0.01	0.35	0.35	0.65	0.57	0.08	0.05	0.49	0.84

Modelo	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Soma dos termos	Soma correta	Ajuste	1	3	1*3	Ajuste novo	Nova soma
190	0.86	-0.13	0.06	0.00	0.79	0.92	0.08	0.93	0.24	0.22	0.12	1.04
191	1.01	-0.20	0.12	0.00	0.92	1.12	-0.12	1.00	0.34	0.34	-0.15	0.98
192	1.05	-0.24	0.15	0.00	0.97	1.21	-0.21	1.03	0.39	0.40	-0.28	0.93
193	0.93	-0.07	0.02	0.01	0.89	0.96	0.04	0.96	0.15	0.15	0.27	1.23
194	0.90	-0.11	0.06	0.00	0.85	0.96	0.04	0.95	0.25	0.23	0.09	1.05
195	0.85	-0.14	0.09	0.00	0.81	0.95	0.05	0.92	0.30	0.28	-0.01	0.93
196	0.68	-0.04	0.02	0.01	0.66	0.71	0.29	0.82	0.14	0.12	0.34	1.05
197	0.59	-0.06	0.04	0.00	0.57	0.63	0.37	0.77	0.20	0.15	0.27	0.90
198	0.65	-0.07	0.05	0.00	0.64	0.71	0.29	0.81	0.22	0.18	0.20	0.91
199	0.54	-0.03	0.02	0.01	0.53	0.56	0.44	0.73	0.14	0.10	0.37	0.93
200	0.51	-0.04	0.03	0.01	0.51	0.55	0.45	0.71	0.18	0.13	0.31	0.86
201	0.49	-0.03	0.03	0.01	0.49	0.52	0.48	0.70	0.17	0.12	0.33	0.85
202	0.43	-0.02	0.03	0.01	0.45	0.47	0.53	0.66	0.16	0.11	0.36	0.83
203	0.43	-0.02	0.03	0.01	0.45	0.47	0.53	0.66	0.17	0.11	0.35	0.82
204	0.42	-0.02	0.03	0.01	0.43	0.45	0.55	0.64	0.16	0.11	0.36	0.81
205	0.37	-0.01	0.03	0.01	0.40	0.41	0.59	0.61	0.16	0.10	0.38	0.78
206	0.35	0.00	0.03	0.01	0.38	0.39	0.61	0.59	0.16	0.10	0.38	0.77
207	0.35	0.00	0.03	0.01	0.37	0.38	0.62	0.59	0.16	0.09	0.39	0.77
208	0.34	0.00	0.00	0.01	0.35	0.35	0.65	0.58	0.06	0.04	0.51	0.87
209	0.32	0.00	0.02	0.01	0.35	0.35	0.65	0.57	0.14	0.08	0.41	0.76
210	0.31	0.00	0.02	0.01	0.34	0.34	0.66	0.56	0.13	0.07	0.43	0.77
211	0.96	-0.14	0.06	0.01	0.90	1.03	-0.03	0.98	0.24	0.23	0.09	1.12
212	0.99	-0.21	0.13	0.00	0.92	1.12	-0.12	1.00	0.36	0.36	-0.19	0.94
213	1.11	-0.25	0.18	0.00	1.03	1.29	-0.29	1.05	0.42	0.45	-0.37	0.92
214	0.91	-0.06	0.02	0.02	0.88	0.95	0.05	0.95	0.14	0.13	0.30	1.25
215	0.85	-0.12	0.08	0.00	0.81	0.93	0.07	0.92	0.29	0.27	0.02	0.95
216	0.90	-0.15	0.12	0.00	0.87	1.03	-0.03	0.95	0.35	0.33	-0.12	0.90
217	0.64	-0.03	0.01	0.01	0.63	0.66	0.34	0.80	0.11	0.08	0.41	1.07
218	0.66	-0.06	0.04	0.01	0.65	0.71	0.29	0.81	0.21	0.17	0.23	0.94
219	0.62	-0.07	0.07	0.00	0.62	0.69	0.31	0.79	0.27	0.21	0.14	0.84
220	0.49	-0.02	0.01	0.01	0.49	0.50	0.50	0.70	0.10	0.07	0.45	0.95
221	0.50	-0.04	0.04	0.01	0.51	0.55	0.45	0.71	0.20	0.14	0.28	0.83
222	0.49	-0.03	0.03	0.01	0.51	0.54	0.46	0.70	0.18	0.13	0.31	0.85
223	0.41	-0.01	0.01	0.01	0.41	0.42	0.58	0.64	0.09	0.05	0.47	0.89
224	0.41	-0.01	0.01	0.00	0.42	0.43	0.57	0.64	0.12	0.07	0.43	0.86
225	0.40	-0.01	0.02	0.01	0.41	0.42	0.58	0.63	0.14	0.09	0.40	0.83
226	0.39	0.00	0.01	0.00	0.39	0.40	0.60	0.62	0.08	0.05	0.48	0.88
227	0.38	0.00	0.01	0.00	0.40	0.40	0.60	0.62	0.11	0.07	0.44	0.84
228	0.38	0.00	0.00	0.01	0.39	0.39	0.61	0.62	0.06	0.04	0.50	0.90
229	0.38	0.00	0.00	0.01	0.39	0.39	0.61	0.61	0.07	0.04	0.50	0.89
230	0.38	0.00	0.00	0.01	0.39	0.39	0.61	0.61	0.04	0.03	0.53	0.92
231	0.38	0.00	0.00	0.01	0.39	0.39	0.61	0.62	0.04	0.03	0.53	0.92

Modelo	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Soma dos termos	Soma correta	Ajuste	1	3	1*3	Ajuste novo	Nova soma
232	1.09	-0.14	0.05	0.01	1.02	1.16	-0.16	1.05	0.23	0.24	0.07	1.23
233	1.16	-0.25	0.16	0.00	1.07	1.32	-0.32	1.08	0.40	0.43	-0.33	0.99
234	1.16	-0.28	0.20	0.00	1.09	1.36	-0.36	1.08	0.45	0.48	-0.45	0.91
235	0.77	-0.07	0.03	0.01	0.74	0.81	0.19	0.88	0.17	0.15	0.27	1.08
236	0.90	-0.13	0.09	0.01	0.87	1.00	0.00	0.95	0.30	0.29	-0.02	0.98
237	0.91	-0.17	0.14	0.00	0.89	1.05	-0.05	0.95	0.38	0.36	-0.18	0.87
238	0.61	-0.04	0.02	0.01	0.60	0.64	0.36	0.78	0.15	0.12	0.34	0.99
239	0.62	-0.06	0.04	0.00	0.60	0.66	0.34	0.78	0.20	0.16	0.24	0.91
240	0.69	-0.07	0.06	0.00	0.68	0.76	0.24	0.83	0.25	0.21	0.14	0.90
241	0.50	-0.02	0.02	0.01	0.50	0.52	0.48	0.71	0.13	0.09	0.39	0.92
242	0.55	-0.03	0.02	0.01	0.55	0.58	0.42	0.74	0.15	0.11	0.36	0.93
243	0.51	-0.03	0.03	0.00	0.51	0.55	0.45	0.71	0.18	0.13	0.31	0.86
244	0.45	-0.01	0.01	0.01	0.46	0.47	0.53	0.67	0.10	0.07	0.45	0.91
245	0.44	-0.01	0.02	0.00	0.45	0.46	0.54	0.66	0.13	0.08	0.41	0.87
246	0.45	-0.01	0.02	0.01	0.46	0.47	0.53	0.67	0.13	0.09	0.40	0.87
247	0.38	0.00	0.01	0.01	0.40	0.40	0.60	0.62	0.08	0.05	0.48	0.88
248	0.42	0.00	0.01	0.01	0.44	0.44	0.56	0.65	0.11	0.07	0.43	0.87
249	0.43	0.00	0.02	0.01	0.45	0.45	0.55	0.65	0.14	0.09	0.40	0.85
250	0.38	0.00	0.00	0.01	0.39	0.38	0.62	0.61	0.04	0.03	0.53	0.92
251	0.40	0.01	0.01	0.01	0.42	0.41	0.59	0.63	0.08	0.05	0.48	0.89
252	0.39	0.01	0.02	0.01	0.43	0.42	0.58	0.63	0.13	0.08	0.42	0.84
253	1.00	-0.15	0.07	0.01	0.92	1.08	-0.08	1.00	0.26	0.26	0.02	1.10
254	1.12	-0.26	0.18	0.00	1.04	1.30	-0.30	1.06	0.43	0.45	-0.38	0.92
255	1.19	-0.06	0.01	0.03	1.17	1.22	-0.22	1.09	0.09	0.10	0.37	1.60
256	0.90	-0.08	0.03	0.02	0.86	0.94	0.06	0.95	0.18	0.17	0.23	1.17
257	0.90	-0.14	0.11	0.00	0.87	1.01	-0.01	0.95	0.33	0.31	-0.08	0.94
258	1.01	-0.19	0.17	0.00	0.99	1.18	-0.18	1.00	0.42	0.42	-0.31	0.88
259	0.63	-0.04	0.02	0.01	0.62	0.66	0.34	0.79	0.14	0.11	0.35	1.01
260	0.70	-0.07	0.05	0.01	0.69	0.76	0.24	0.84	0.22	0.19	0.19	0.95
261	0.74	-0.09	0.09	0.00	0.74	0.83	0.17	0.86	0.30	0.26	0.04	0.87
262	0.50	-0.02	0.01	0.01	0.50	0.52	0.48	0.71	0.12	0.08	0.41	0.93
263	0.56	-0.03	0.03	0.00	0.57	0.60	0.40	0.75	0.18	0.14	0.30	0.90
264	0.59	-0.04	0.05	0.01	0.61	0.64	0.36	0.77	0.22	0.17	0.22	0.87
265	0.41	-0.01	0.01	0.01	0.42	0.43	0.57	0.64	0.10	0.06	0.46	0.89
266	0.44	-0.01	0.02	0.01	0.46	0.47	0.53	0.67	0.13	0.08	0.41	0.88
267	0.44	-0.01	0.02	0.01	0.46	0.47	0.53	0.66	0.15	0.10	0.37	0.84
268	0.42	0.00	0.01	0.01	0.43	0.43	0.57	0.65	0.10	0.06	0.45	0.89
269	0.42	0.00	0.01	0.01	0.43	0.43	0.57	0.65	0.07	0.05	0.49	0.92
270	0.42	0.00	0.01	0.01	0.44	0.43	0.57	0.65	0.08	0.05	0.47	0.91
271	0.42	0.01	0.01	0.01	0.45	0.44	0.56	0.65	0.11	0.07	0.44	0.88
272	0.40	0.01	0.02	0.01	0.44	0.43	0.57	0.64	0.12	0.08	0.42	0.85
273	0.39	0.01	0.01	0.01	0.42	0.41	0.59	0.63	0.08	0.05	0.48	0.89

Modelo	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Soma dos termos	Soma correta	Ajuste	1	3	1*3	Ajuste novo	Nova soma
274	1.13	-0.14	0.06	0.01	1.06	1.20	-0.20	1.06	0.25	0.26	0.03	1.23
275	1.19	-0.25	0.18	0.00	1.12	1.37	-0.37	1.09	0.42	0.46	-0.40	0.97
276	1.29	-0.05	0.01	0.03	1.27	1.32	-0.32	1.13	0.08	0.10	0.38	1.71
277	0.85	-0.08	0.04	0.01	0.82	0.91	0.09	0.92	0.21	0.19	0.18	1.09
278	1.00	-0.15	0.13	0.00	0.98	1.13	-0.13	1.00	0.36	0.36	-0.19	0.94
279	1.09	-0.20	0.21	0.00	1.11	1.30	-0.30	1.04	0.46	0.48	-0.44	0.87
280	0.72	-0.03	0.02	0.01	0.71	0.75	0.25	0.85	0.13	0.11	0.36	1.11
281	0.75	-0.08	0.08	0.01	0.76	0.83	0.17	0.86	0.29	0.25	0.06	0.89
282	0.83	-0.10	0.14	0.01	0.87	0.97	0.03	0.91	0.38	0.34	-0.15	0.83
283	0.62	-0.02	0.01	0.01	0.62	0.64	0.36	0.78	0.12	0.09	0.39	1.03
284	0.60	-0.03	0.04	0.01	0.61	0.64	0.36	0.77	0.19	0.15	0.27	0.91
285	0.67	-0.05	0.08	0.00	0.71	0.76	0.24	0.82	0.29	0.24	0.08	0.84
286	0.54	-0.01	0.01	0.01	0.55	0.56	0.44	0.73	0.12	0.09	0.40	0.96
287	0.59	-0.01	0.04	0.01	0.62	0.63	0.37	0.77	0.20	0.15	0.27	0.90
288	0.56	-0.01	0.07	0.01	0.63	0.64	0.36	0.75	0.26	0.19	0.18	0.81
289	0.47	0.00	0.02	0.01	0.50	0.50	0.50	0.69	0.13	0.09	0.39	0.89
290	0.48	0.01	0.03	0.01	0.52	0.51	0.49	0.69	0.17	0.12	0.34	0.85
291	0.48	0.01	0.05	0.01	0.54	0.53	0.47	0.69	0.22	0.15	0.26	0.79
292	0.42	0.01	0.02	0.01	0.46	0.45	0.55	0.65	0.14	0.09	0.40	0.85
293	0.45	0.02	0.02	0.01	0.49	0.47	0.53	0.67	0.13	0.09	0.40	0.87
294	0.41	0.02	0.04	0.01	0.47	0.45	0.55	0.64	0.19	0.12	0.33	0.78
295	0.75	-0.11	0.04	0.01	0.70	0.80	0.20	0.87	0.20	0.17	0.22	1.02
296	0.97	-0.22	0.12	0.01	0.88	1.09	-0.09	0.98	0.35	0.34	-0.15	0.94
297	1.07	-0.10	0.02	0.03	1.03	1.12	-0.12	1.04	0.15	0.15	0.26	1.38
298	0.62	-0.08	0.04	0.00	0.58	0.66	0.34	0.79	0.19	0.15	0.27	0.93
299	0.79	-0.14	0.09	0.00	0.73	0.87	0.13	0.89	0.29	0.26	0.03	0.90
300	0.83	-0.17	0.12	0.00	0.79	0.95	0.05	0.91	0.34	0.31	-0.08	0.87
301	0.60	-0.06	0.03	0.00	0.57	0.64	0.36	0.77	0.18	0.14	0.28	0.92
302	0.75	-0.11	0.08	0.00	0.72	0.83	0.17	0.87	0.28	0.24	0.07	0.90
303	0.90	-0.13	0.10	0.00	0.87	1.00	0.00	0.95	0.31	0.29	-0.04	0.96
304	0.61	-0.05	0.04	0.00	0.60	0.65	0.35	0.78	0.19	0.15	0.27	0.92
305	1.08	-0.12	0.11	0.00	1.07	1.19	-0.19	1.04	0.33	0.35	-0.16	1.04
306	1.09	-0.05	0.02	0.02	1.08	1.13	-0.13	1.05	0.14	0.14	0.28	1.41
307	1.16	-0.03	0.01	0.01	1.15	1.19	-0.19	1.08	0.12	0.13	0.31	1.49
308	1.15	-0.09	0.10	0.00	1.16	1.25	-0.25	1.07	0.32	0.34	-0.14	1.11
309	1.16	-0.09	0.12	0.00	1.19	1.28	-0.28	1.08	0.34	0.37	-0.21	1.07
310	1.02	-0.02	0.02	0.01	1.03	1.05	-0.05	1.01	0.14	0.14	0.28	1.34
311	1.16	-0.05	0.10	0.00	1.20	1.25	-0.25	1.07	0.31	0.34	-0.13	1.12
312	1.19	-0.05	0.10	0.00	1.24	1.29	-0.29	1.09	0.32	0.35	-0.16	1.13
313	1.07	-0.01	0.03	0.01	1.10	1.11	-0.11	1.04	0.16	0.17	0.23	1.33
314	1.20	-0.01	0.11	0.00	1.30	1.32	-0.32	1.10	0.34	0.37	-0.21	1.11
315	1.26	-0.01	0.12	0.00	1.38	1.39	-0.39	1.12	0.35	0.39	-0.26	1.13

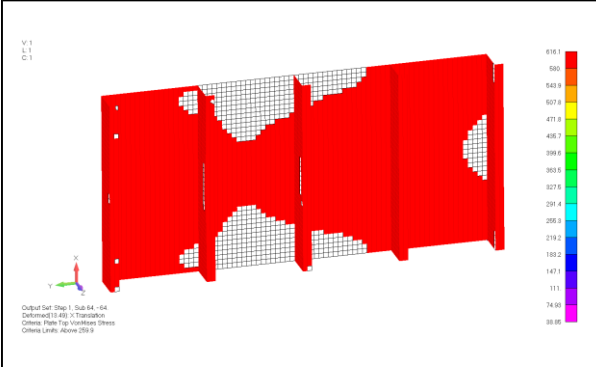
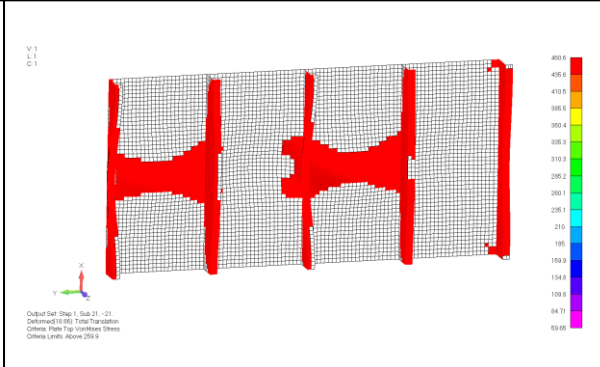
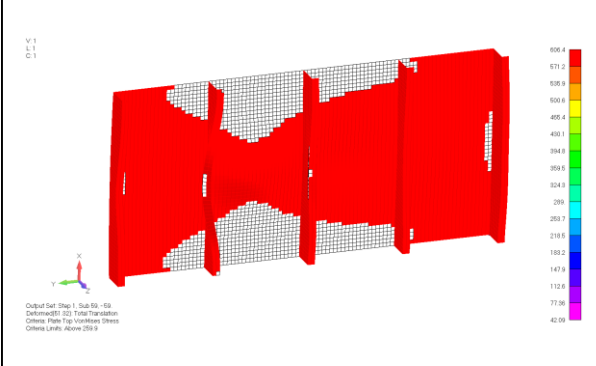
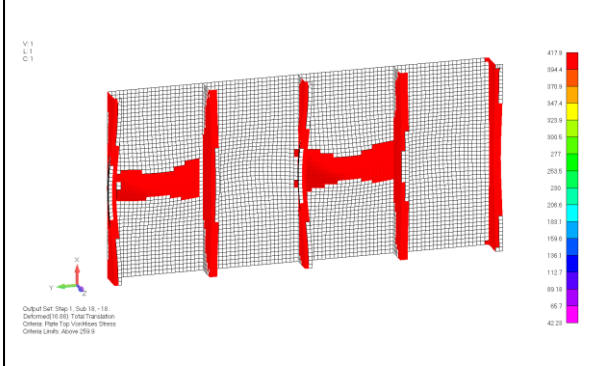
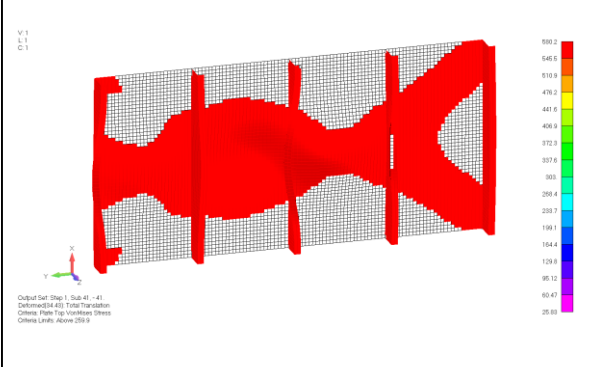
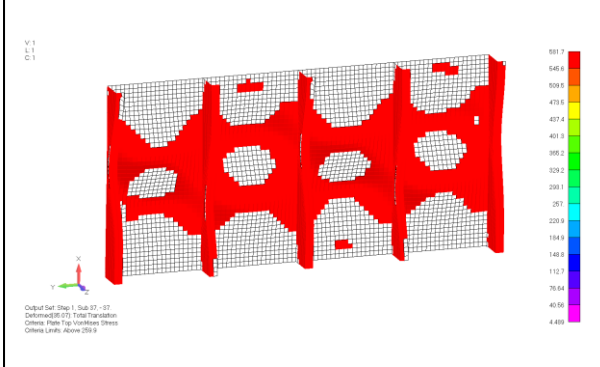
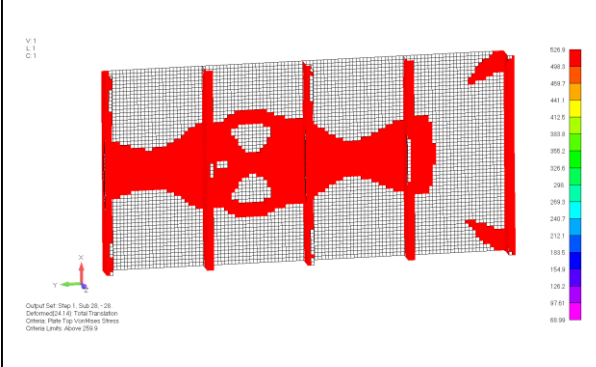
Modelo	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Soma dos termos	Soma correta	Ajuste	1	3	1*3	Ajuste novo	Nova soma
316	0.76	-0.10	0.03	0.01	0.70	0.80	0.20	0.87	0.18	0.16	0.26	1.05
317	0.89	-0.19	0.10	0.00	0.81	1.00	0.00	0.94	0.32	0.31	-0.07	0.93
318	1.04	-0.16	0.06	0.03	0.97	1.13	-0.13	1.02	0.25	0.25	0.04	1.17
319	0.71	-0.08	0.03	0.01	0.67	0.75	0.25	0.84	0.18	0.15	0.26	1.01
320	0.87	-0.16	0.10	0.00	0.81	0.97	0.03	0.93	0.32	0.30	-0.05	0.92
321	1.03	-0.17	0.10	0.01	0.97	1.14	-0.14	1.02	0.32	0.32	-0.11	1.04
322	1.01	-0.09	0.04	0.01	0.97	1.07	-0.07	1.01	0.21	0.21	0.13	1.20
323	1.08	-0.16	0.12	0.00	1.05	1.21	-0.21	1.04	0.35	0.37	-0.20	1.01
324	1.16	-0.17	0.14	0.00	1.12	1.30	-0.30	1.08	0.37	0.40	-0.27	1.03
325	0.89	-0.06	0.03	0.01	0.88	0.93	0.07	0.95	0.18	0.17	0.23	1.16
326	1.12	-0.12	0.12	0.00	1.12	1.25	-0.25	1.06	0.35	0.37	-0.21	1.04
327	1.11	-0.12	0.12	0.00	1.11	1.23	-0.23	1.06	0.35	0.36	-0.19	1.04
328	0.92	-0.04	0.03	0.00	0.91	0.95	0.05	0.96	0.18	0.17	0.21	1.17
329	1.17	-0.09	0.13	0.00	1.21	1.30	-0.30	1.08	0.36	0.39	-0.25	1.06
330	1.20	-0.09	0.13	0.00	1.23	1.33	-0.33	1.09	0.36	0.39	-0.26	1.07
331	0.89	-0.02	0.03	0.00	0.90	0.92	0.08	0.94	0.18	0.17	0.22	1.14
332	1.20	-0.06	0.15	0.00	1.29	1.35	-0.35	1.09	0.39	0.43	-0.33	1.02
333	1.22	-0.06	0.15	0.00	1.31	1.37	-0.37	1.10	0.39	0.43	-0.33	1.04
334	0.90	-0.01	0.03	0.00	0.93	0.93	0.07	0.95	0.18	0.17	0.22	1.15
335	1.32	-0.02	0.15	0.01	1.46	1.47	-0.47	1.15	0.38	0.44	-0.36	1.12
336	1.32	-0.02	0.19	0.00	1.49	1.51	-0.51	1.15	0.44	0.50	-0.49	1.02
337	0.85	-0.14	0.06	0.01	0.78	0.91	0.09	0.92	0.24	0.22	0.11	1.03
338	1.08	-0.15	0.06	0.04	1.03	1.18	-0.18	1.04	0.24	0.25	0.05	1.23
339	1.13	-0.23	0.13	0.02	1.05	1.28	-0.28	1.07	0.36	0.38	-0.23	1.05
340	0.87	-0.11	0.06	0.01	0.82	0.93	0.07	0.93	0.23	0.22	0.12	1.05
341	1.12	-0.18	0.11	0.01	1.05	1.23	-0.23	1.06	0.33	0.35	-0.16	1.08
342	1.16	-0.25	0.21	0.00	1.12	1.37	-0.37	1.08	0.46	0.49	-0.47	0.91
343	0.94	-0.07	0.03	0.01	0.91	0.99	0.01	0.97	0.18	0.18	0.21	1.20
344	1.11	-0.17	0.14	0.00	1.08	1.25	-0.25	1.05	0.38	0.40	-0.27	0.98
345	1.08	-0.16	0.13	0.00	1.06	1.21	-0.21	1.04	0.36	0.38	-0.22	1.00
346	1.00	-0.06	0.03	0.01	0.98	1.04	-0.04	1.00	0.18	0.18	0.20	1.24
347	1.12	-0.13	0.14	0.00	1.13	1.26	-0.26	1.06	0.37	0.40	-0.26	1.00
348	1.15	-0.13	0.14	0.00	1.16	1.29	-0.29	1.07	0.37	0.40	-0.27	1.02
349	1.00	-0.04	0.04	0.01	1.00	1.05	-0.05	1.00	0.19	0.19	0.18	1.23
350	1.20	-0.10	0.16	0.00	1.26	1.36	-0.36	1.10	0.40	0.44	-0.35	1.01
351	1.26	-0.10	0.17	0.00	1.32	1.43	-0.43	1.12	0.41	0.46	-0.41	1.02
352	1.04	-0.03	0.05	0.00	1.06	1.09	-0.09	1.02	0.22	0.22	0.11	1.20
353	1.24	-0.06	0.21	0.00	1.39	1.45	-0.45	1.11	0.46	0.51	-0.52	0.94
354	1.28	-0.06	0.21	0.00	1.43	1.49	-0.49	1.13	0.46	0.52	-0.53	0.96
355	1.05	-0.01	0.05	0.00	1.10	1.10	-0.10	1.02	0.23	0.24	0.08	1.18
356	1.38	-0.01	0.26	0.00	1.62	1.63	-0.63	1.17	0.51	0.59	-0.69	0.95
357	1.41	-0.01	0.28	0.00	1.68	1.69	-0.69	1.19	0.53	0.63	-0.76	0.93

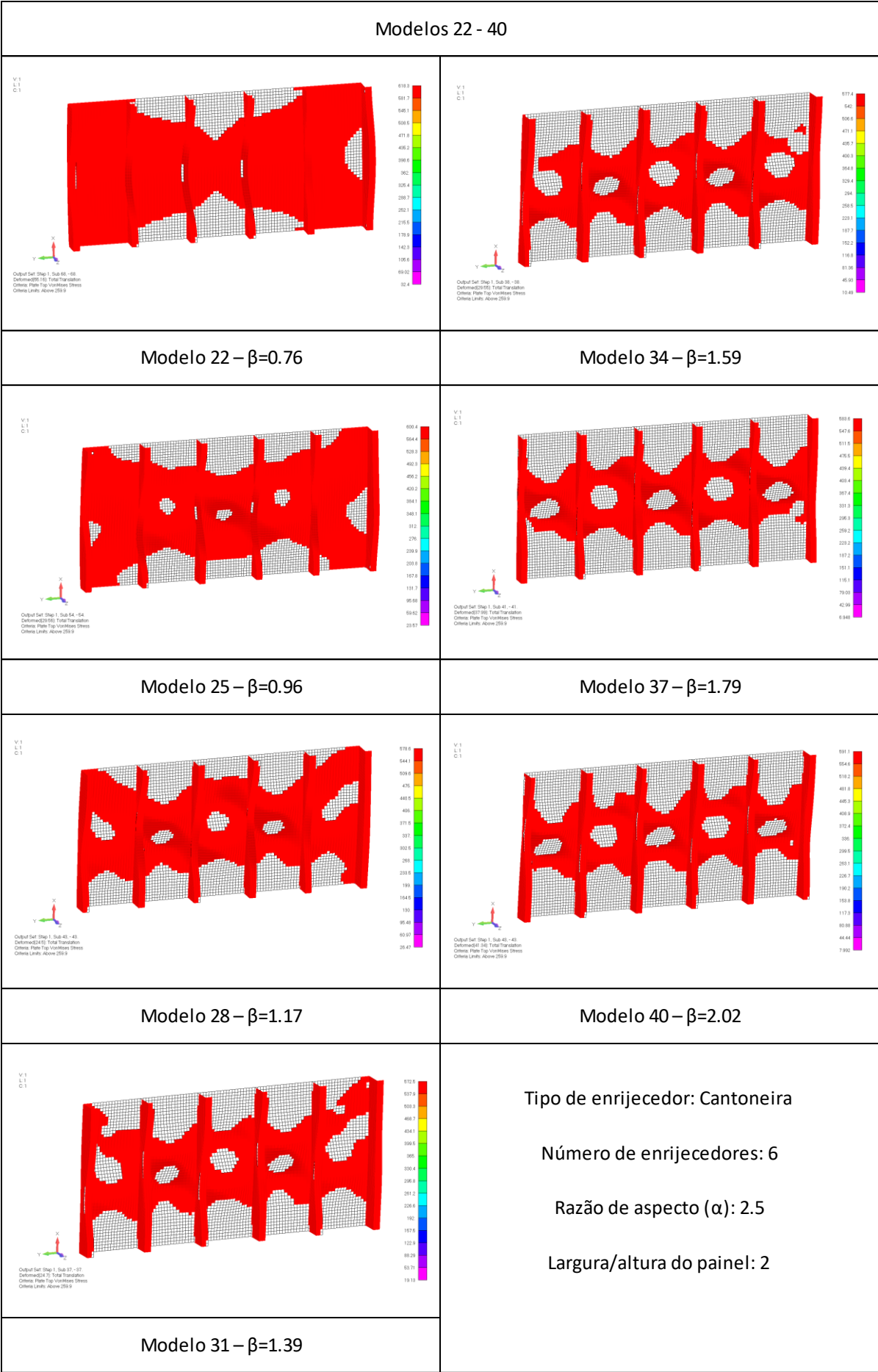
Modelo	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Soma dos termos	Soma correta	Ajuste	1	3	1*3	Ajuste novo	Nova soma
358	0.97	-0.15	0.06	0.01	0.90	1.04	-0.04	0.99	0.25	0.24	0.07	1.11
359	1.16	-0.21	0.11	0.03	1.08	1.30	-0.30	1.08	0.33	0.35	-0.17	1.13
360	1.05	-0.26	0.18	0.00	0.97	1.23	-0.23	1.02	0.42	0.43	-0.33	0.90
361	1.09	-0.14	0.07	0.01	1.03	1.17	-0.17	1.04	0.26	0.27	0.00	1.17
362	0.96	-0.16	0.10	0.00	0.91	1.07	-0.07	0.98	0.32	0.31	-0.08	0.98
363	1.02	-0.18	0.13	0.00	0.97	1.16	-0.16	1.01	0.36	0.36	-0.19	0.96
364	0.82	-0.08	0.04	0.01	0.79	0.87	0.13	0.91	0.20	0.18	0.19	1.06
365	0.93	-0.11	0.08	0.00	0.90	1.01	-0.01	0.96	0.28	0.27	0.01	1.02
366	1.10	-0.16	0.14	0.00	1.09	1.25	-0.25	1.05	0.37	0.39	-0.25	0.99
367	0.83	-0.06	0.04	0.00	0.82	0.88	0.12	0.91	0.21	0.19	0.18	1.06
368	0.89	-0.08	0.07	0.00	0.88	0.96	0.04	0.94	0.27	0.26	0.04	1.00
369	1.05	-0.12	0.15	0.00	1.09	1.21	-0.21	1.03	0.39	0.40	-0.28	0.93
370	0.98	-0.05	0.06	0.00	0.99	1.04	-0.04	0.99	0.24	0.24	0.07	1.11
371	1.13	-0.08	0.12	0.00	1.18	1.25	-0.25	1.07	0.34	0.36	-0.19	1.06
372	1.14	-0.10	0.19	0.00	1.24	1.33	-0.33	1.07	0.44	0.47	-0.42	0.92
373	1.12	-0.03	0.06	0.01	1.15	1.18	-0.18	1.06	0.24	0.25	0.05	1.23
374	1.20	-0.05	0.16	0.00	1.31	1.36	-0.36	1.09	0.40	0.44	-0.35	1.01
375	1.29	-0.05	0.20	0.01	1.45	1.50	-0.50	1.14	0.45	0.51	-0.50	1.00
376	1.21	0.00	0.08	0.00	1.29	1.29	-0.29	1.10	0.28	0.31	-0.08	1.21
377	1.45	0.00	0.35	0.00	1.80	1.80	-0.80	1.20	0.59	0.71	-0.94	0.86
378	1.29	0.01	0.38	0.00	1.68	1.67	-0.67	1.14	0.62	0.70	-0.91	0.76
379	0.98	-0.14	0.05	0.02	0.91	1.05	-0.05	0.99	0.23	0.22	0.11	1.16
380	1.13	-0.18	0.08	0.04	1.06	1.25	-0.25	1.06	0.28	0.30	-0.06	1.19
381	1.20	-0.20	0.09	0.05	1.14	1.34	-0.34	1.10	0.31	0.33	-0.13	1.21
382	1.10	-0.09	0.03	0.02	1.06	1.15	-0.15	1.05	0.16	0.17	0.23	1.38
383	1.18	-0.16	0.08	0.04	1.14	1.29	-0.29	1.08	0.29	0.31	-0.08	1.22
384	1.10	-0.21	0.15	0.00	1.05	1.26	-0.26	1.05	0.39	0.41	-0.30	0.97
385	1.06	-0.10	0.06	0.01	1.02	1.12	-0.12	1.03	0.23	0.24	0.07	1.20
386	0.98	-0.13	0.10	0.00	0.96	1.08	-0.08	0.99	0.31	0.31	-0.07	1.01
387	1.00	-0.14	0.12	0.00	0.99	1.13	-0.13	1.00	0.35	0.35	-0.16	0.97
388	0.97	-0.07	0.05	0.01	0.95	1.02	-0.02	0.98	0.22	0.21	0.13	1.15
389	1.06	-0.10	0.11	0.00	1.06	1.17	-0.17	1.03	0.33	0.34	-0.13	1.03
390	1.08	-0.12	0.13	0.00	1.10	1.21	-0.21	1.04	0.37	0.38	-0.23	0.98
391	1.02	-0.04	0.04	0.01	1.03	1.07	-0.07	1.01	0.19	0.19	0.18	1.25
392	1.11	-0.08	0.13	0.00	1.16	1.24	-0.24	1.05	0.36	0.38	-0.23	1.01
393	1.16	-0.10	0.22	0.00	1.29	1.38	-0.38	1.08	0.47	0.50	-0.49	0.89
394	1.05	-0.02	0.05	0.01	1.09	1.11	-0.11	1.02	0.22	0.23	0.10	1.20
395	1.21	-0.05	0.28	0.00	1.44	1.49	-0.49	1.10	0.53	0.59	-0.67	0.83
396	1.13	-0.03	0.14	0.01	1.25	1.28	-0.28	1.07	0.37	0.40	-0.26	1.02
397	1.13	0.00	0.07	0.01	1.20	1.20	-0.20	1.06	0.26	0.28	-0.01	1.19
398	1.43	0.01	0.35	0.00	1.79	1.78	-0.78	1.20	0.59	0.71	-0.93	0.85
399	1.08	0.01	0.08	0.02	1.17	1.17	-0.17	1.04	0.27	0.28	-0.02	1.15

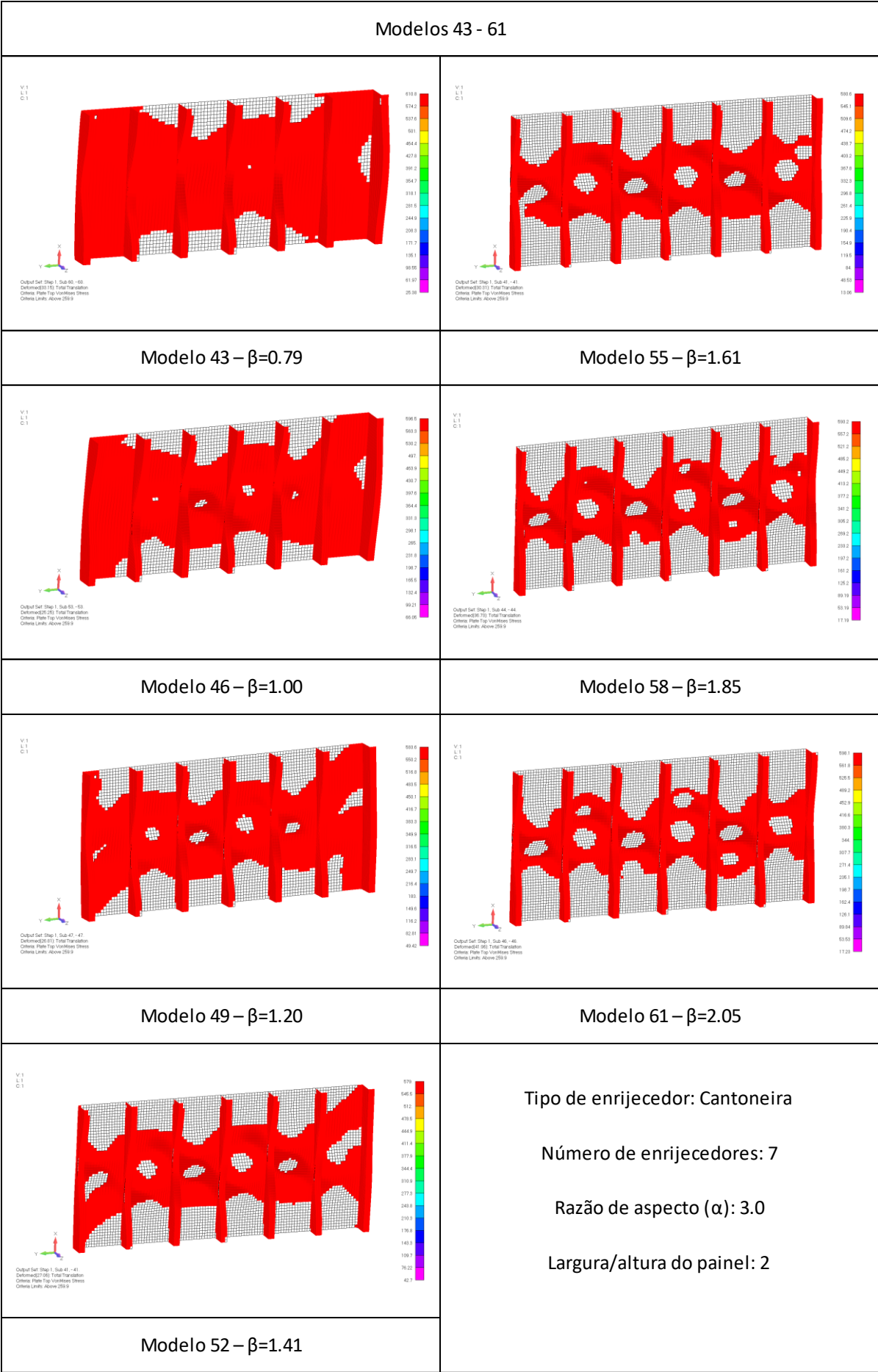
Modelo	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Soma dos termos	Soma correta	Ajuste	1	3	1*3	Ajuste novo	Nova soma
400	0.94	-0.15	0.06	0.01	0.87	1.02	-0.02	0.97	0.25	0.24	0.07	1.08
401	1.13	-0.16	0.06	0.05	1.07	1.23	-0.23	1.06	0.25	0.27	0.01	1.25
402	1.24	-0.33	0.25	0.00	1.16	1.49	-0.49	1.11	0.50	0.56	-0.61	0.88
403	1.12	-0.13	0.06	0.04	1.09	1.22	-0.22	1.06	0.24	0.26	0.04	1.26
404	1.20	-0.14	0.07	0.04	1.16	1.30	-0.30	1.09	0.26	0.28	-0.02	1.28
405	1.11	-0.21	0.15	0.00	1.06	1.27	-0.27	1.05	0.39	0.41	-0.30	0.97
406	1.11	-0.12	0.08	0.01	1.08	1.20	-0.20	1.06	0.29	0.30	-0.06	1.14
407	1.13	-0.17	0.16	0.00	1.13	1.30	-0.30	1.06	0.40	0.42	-0.32	0.97
408	1.07	-0.15	0.14	0.00	1.06	1.21	-0.21	1.03	0.38	0.39	-0.24	0.97
409	0.85	-0.05	0.03	0.01	0.84	0.89	0.11	0.92	0.18	0.17	0.23	1.12
410	1.02	-0.08	0.08	0.00	1.02	1.11	-0.11	1.01	0.29	0.29	-0.03	1.07
411	1.13	-0.10	0.12	0.01	1.16	1.27	-0.27	1.06	0.35	0.38	-0.22	1.05
412	0.88	-0.04	0.05	0.01	0.89	0.93	0.07	0.94	0.22	0.20	0.15	1.08
413	1.14	-0.09	0.21	0.00	1.26	1.35	-0.35	1.07	0.46	0.49	-0.47	0.88
414	1.14	-0.08	0.18	0.00	1.24	1.32	-0.32	1.07	0.42	0.45	-0.38	0.93
415	0.78	-0.01	0.05	0.01	0.82	0.84	0.16	0.88	0.23	0.20	0.16	1.00
416	1.15	-0.03	0.23	0.00	1.35	1.38	-0.38	1.07	0.48	0.51	-0.51	0.87
417	1.08	-0.02	0.13	0.01	1.20	1.22	-0.22	1.04	0.35	0.37	-0.20	1.02
418	1.07	0.01	0.06	0.01	1.15	1.14	-0.14	1.03	0.25	0.25	0.04	1.18
419	1.30	0.03	0.38	0.00	1.71	1.68	-0.68	1.14	0.62	0.70	-0.92	0.76
420	1.15	0.03	0.33	0.00	1.52	1.48	-0.48	1.07	0.58	0.62	-0.74	0.75
421	1.05	-0.14	0.06	0.03	0.99	1.13	-0.13	1.02	0.24	0.24	0.07	1.20
422	1.26	-0.21	0.11	0.06	1.21	1.42	-0.42	1.12	0.33	0.37	-0.21	1.22
423	1.34	-0.28	0.19	0.05	1.29	1.58	-0.58	1.16	0.43	0.50	-0.49	1.09
424	1.05	-0.11	0.05	0.02	1.01	1.12	-0.12	1.03	0.22	0.23	0.10	1.22
425	1.25	-0.22	0.18	0.00	1.21	1.43	-0.43	1.12	0.42	0.47	-0.43	1.00
426	1.34	-0.10	0.03	0.05	1.32	1.42	-0.42	1.16	0.19	0.22	0.12	1.55
427	0.93	-0.07	0.04	0.01	0.91	0.98	0.02	0.96	0.20	0.20	0.17	1.15
428	1.25	-0.03	0.01	0.01	1.24	1.27	-0.27	1.12	0.08	0.09	0.39	1.66
429	1.29	-0.16	0.15	0.00	1.29	1.45	-0.45	1.14	0.39	0.44	-0.36	1.08
430	0.82	-0.05	0.04	0.01	0.82	0.87	0.13	0.91	0.21	0.19	0.19	1.06
431	1.16	-0.10	0.12	0.01	1.19	1.29	-0.29	1.08	0.35	0.38	-0.23	1.07
432	1.20	-0.12	0.18	0.00	1.26	1.38	-0.38	1.10	0.42	0.46	-0.40	0.98
433	0.93	-0.03	0.04	0.01	0.95	0.98	0.02	0.96	0.20	0.19	0.17	1.15
434	1.21	-0.06	0.16	0.00	1.31	1.37	-0.37	1.10	0.39	0.43	-0.34	1.02
435	1.06	-0.03	0.06	0.02	1.11	1.14	-0.14	1.03	0.25	0.26	0.04	1.18
436	0.84	-0.01	0.06	0.01	0.89	0.90	0.10	0.91	0.24	0.22	0.12	1.02
437	1.14	-0.02	0.20	0.00	1.32	1.34	-0.34	1.07	0.45	0.48	-0.43	0.91
438	1.08	-0.01	0.09	0.02	1.18	1.19	-0.19	1.04	0.30	0.31	-0.08	1.11
439	0.78	0.01	0.07	0.01	0.88	0.87	0.13	0.88	0.27	0.24	0.07	0.94
440	0.94	0.04	0.25	0.01	1.23	1.20	-0.20	0.97	0.50	0.48	-0.45	0.74
441	0.85	0.04	0.21	0.00	1.10	1.06	-0.06	0.92	0.45	0.42	-0.31	0.75

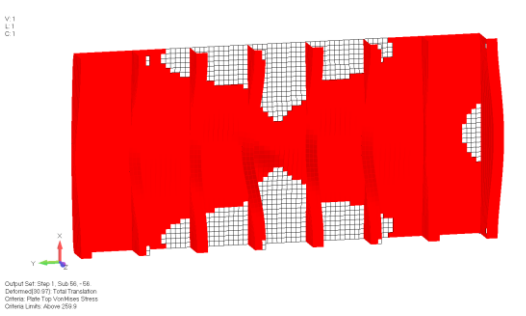
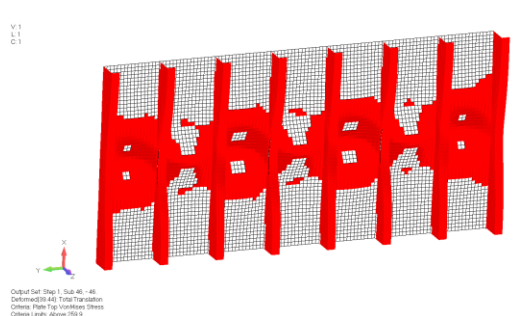
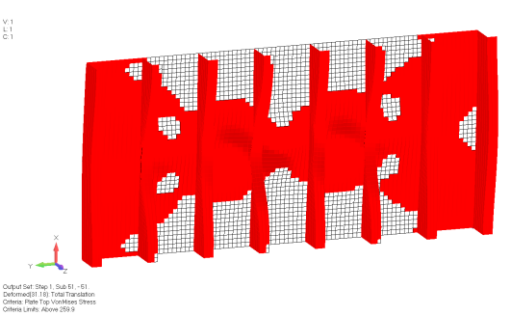
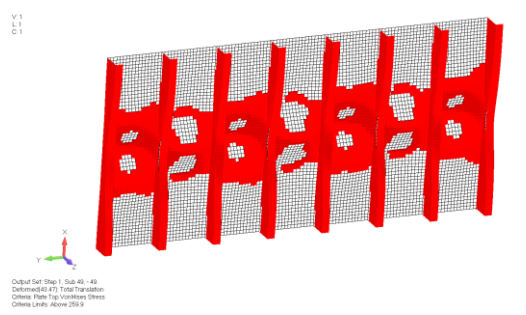
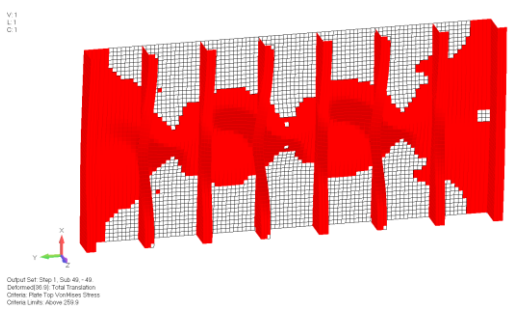
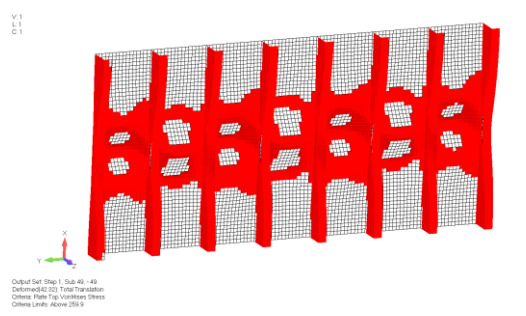
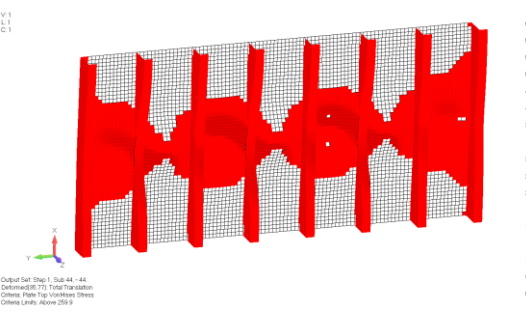
APÊNDICE E – CONFIGURAÇÃO DEFORMADA DOS PAINÉIS ENRIJECIDOS

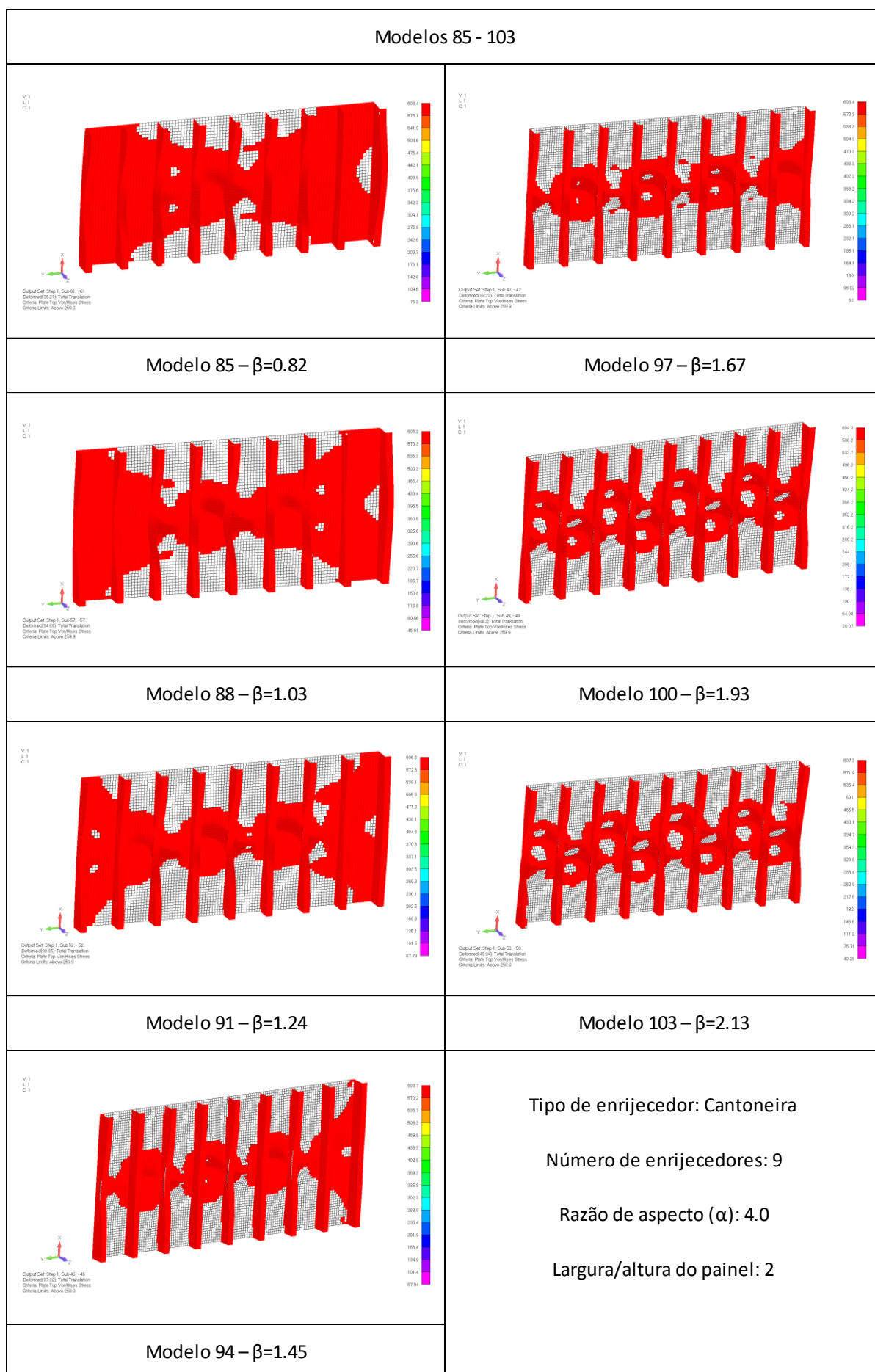
Este apêndice exibe a configuração deformada para os modelos de painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304 que foram objeto da análise paramétrica realizada neste trabalho de pesquisa, no instante da sua resistência última. Os painéis exibidos neste apêndice apresentam uma relação largura/altura igual a dois. A distribuição de tensões de von Mises está plotada e exibe em vermelho as regiões com tensão superior a 259.9 MPa. Este valor corresponde à tensão $\sigma_{0.2\%}$ da placa do painel enrijecido (ver Tabela 3).

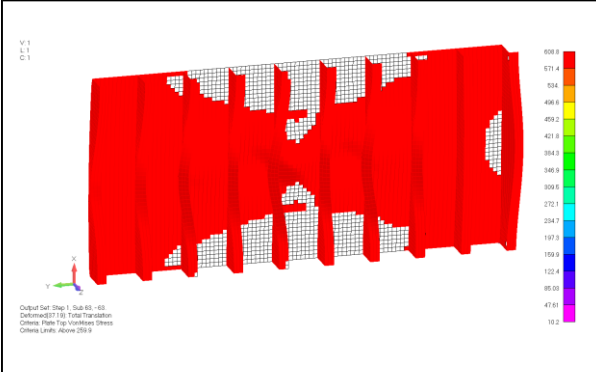
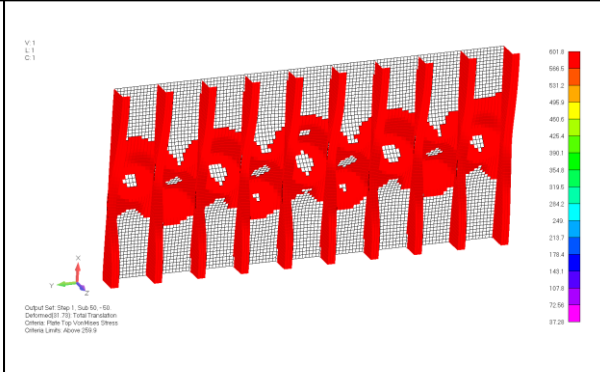
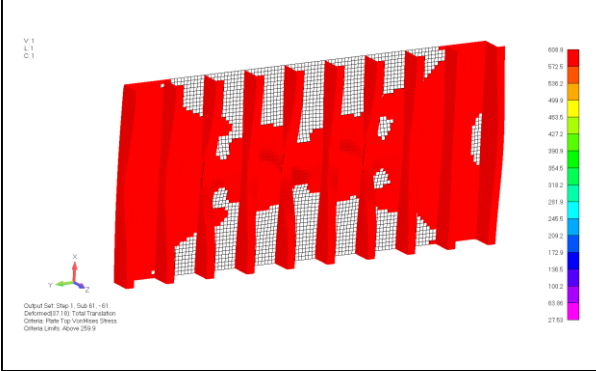
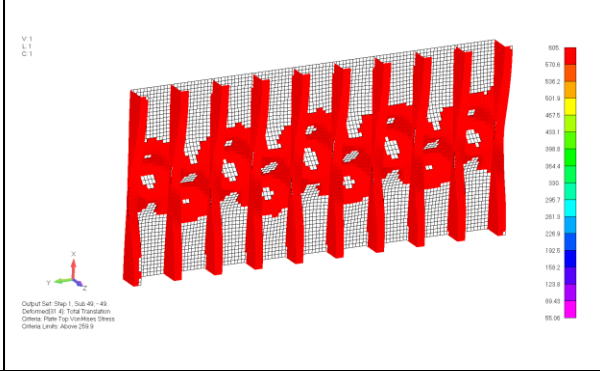
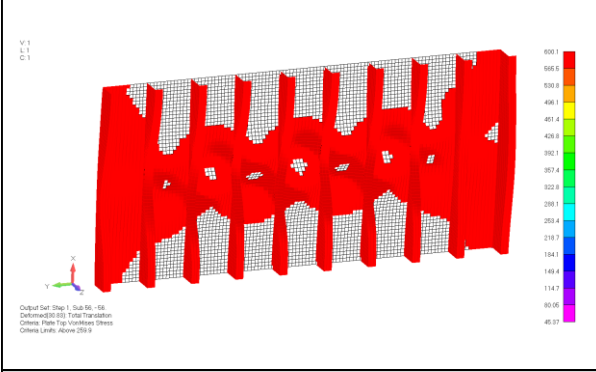
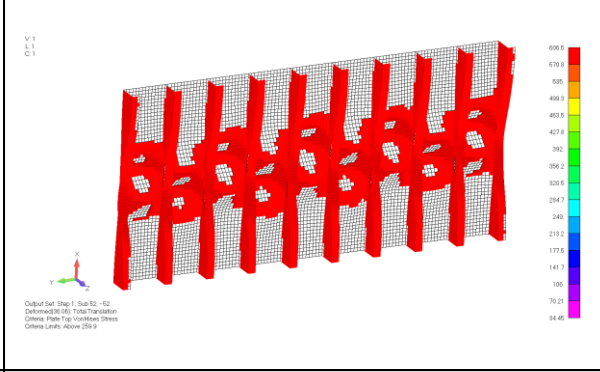
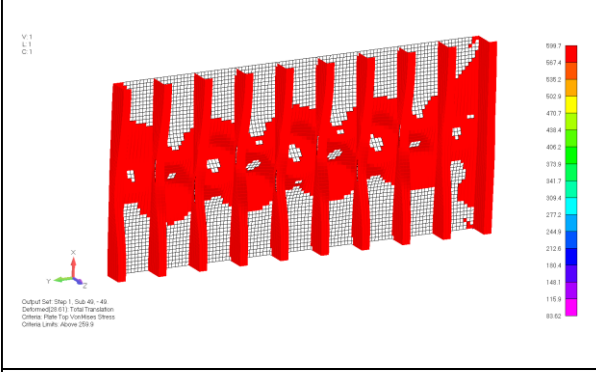
Modelos 1 - 19	
	
Modelo 1 – $\beta=0.76$	Modelo 13 – $\beta=1.55$
	
Modelo 4 – $\beta=0.94$	Modelo 16 – $\beta=1.76$
	
Modelo 7 – $\beta=1.13$	Modelo 19 – $\beta=2.00$
	Tipo de enrijecedor: Cantoneira Número de enrijecedores: 5 Razão de aspecto (α): 2.0 Largura/altura do painel: 2
Modelo 10 – $\beta=1.33$	

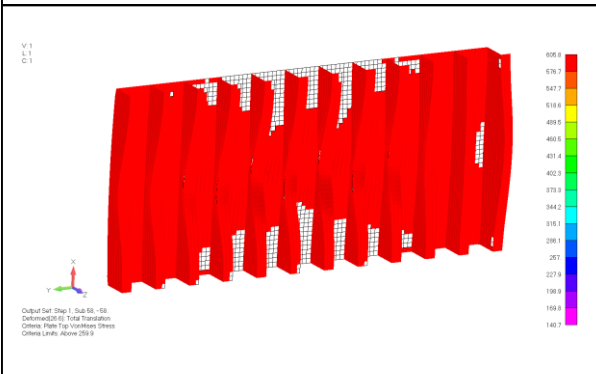
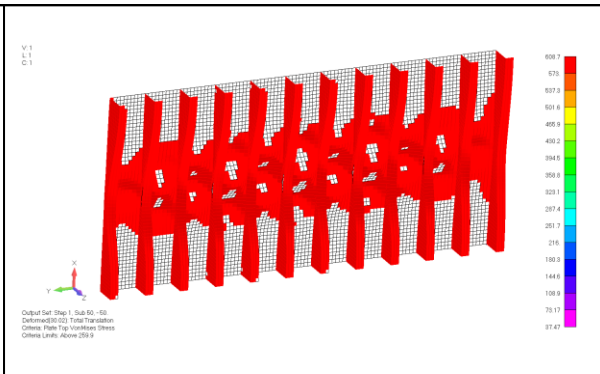
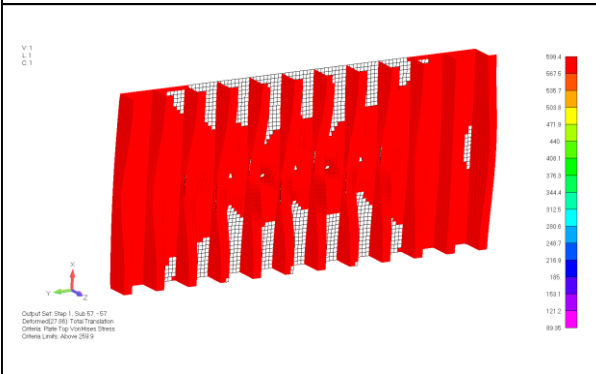
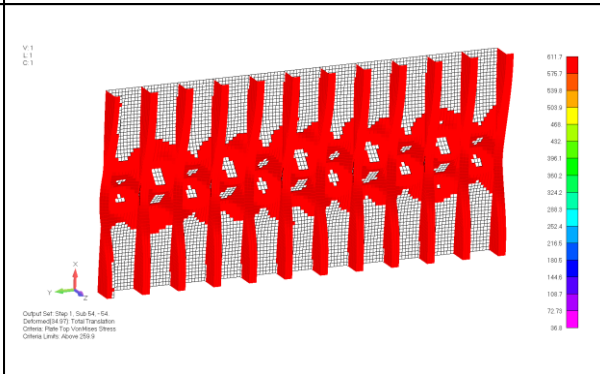
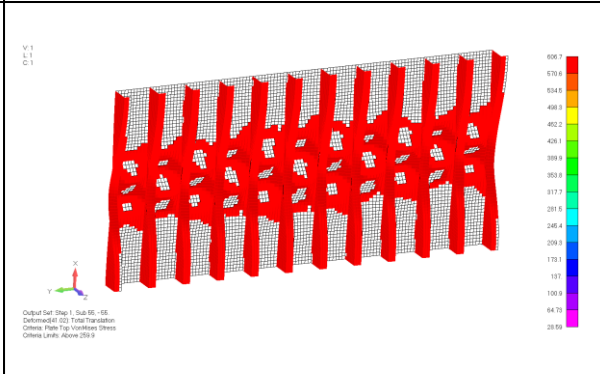
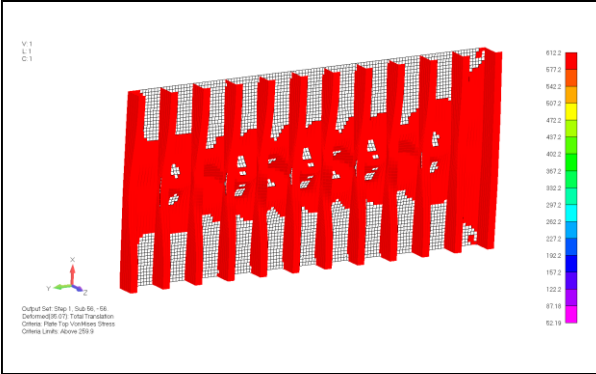


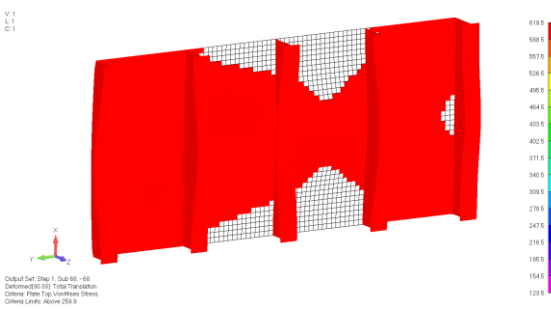
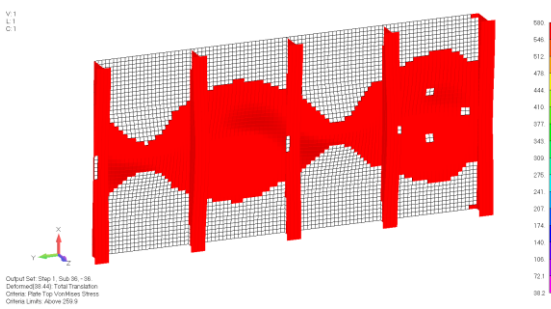
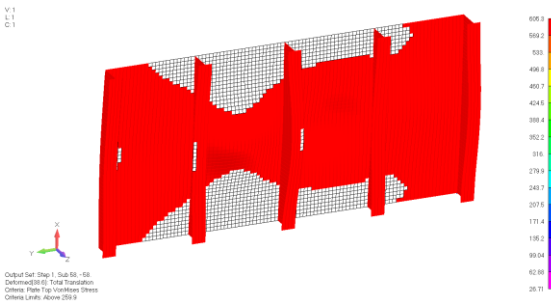
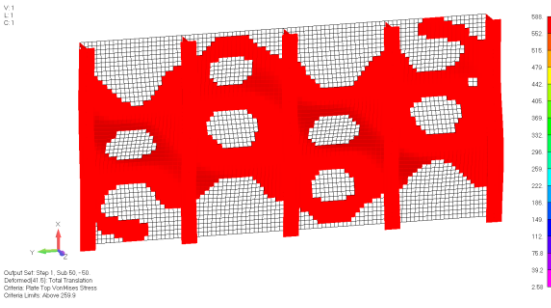
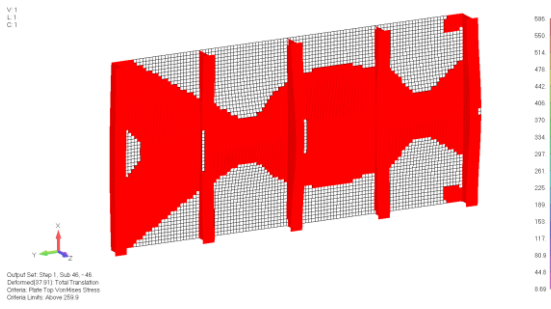
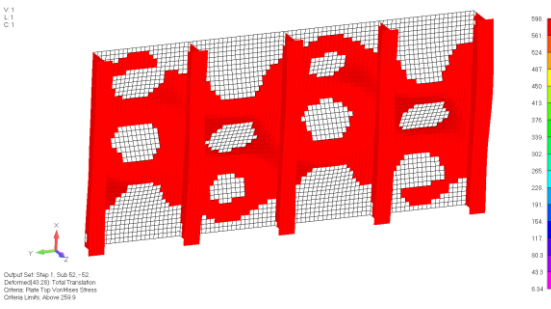
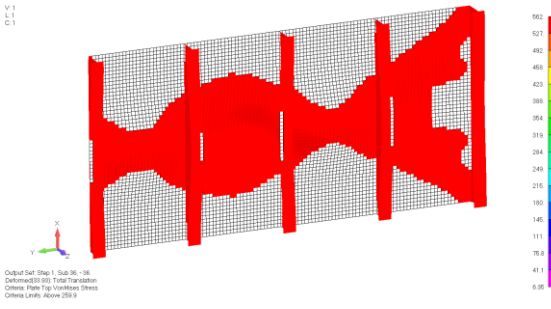


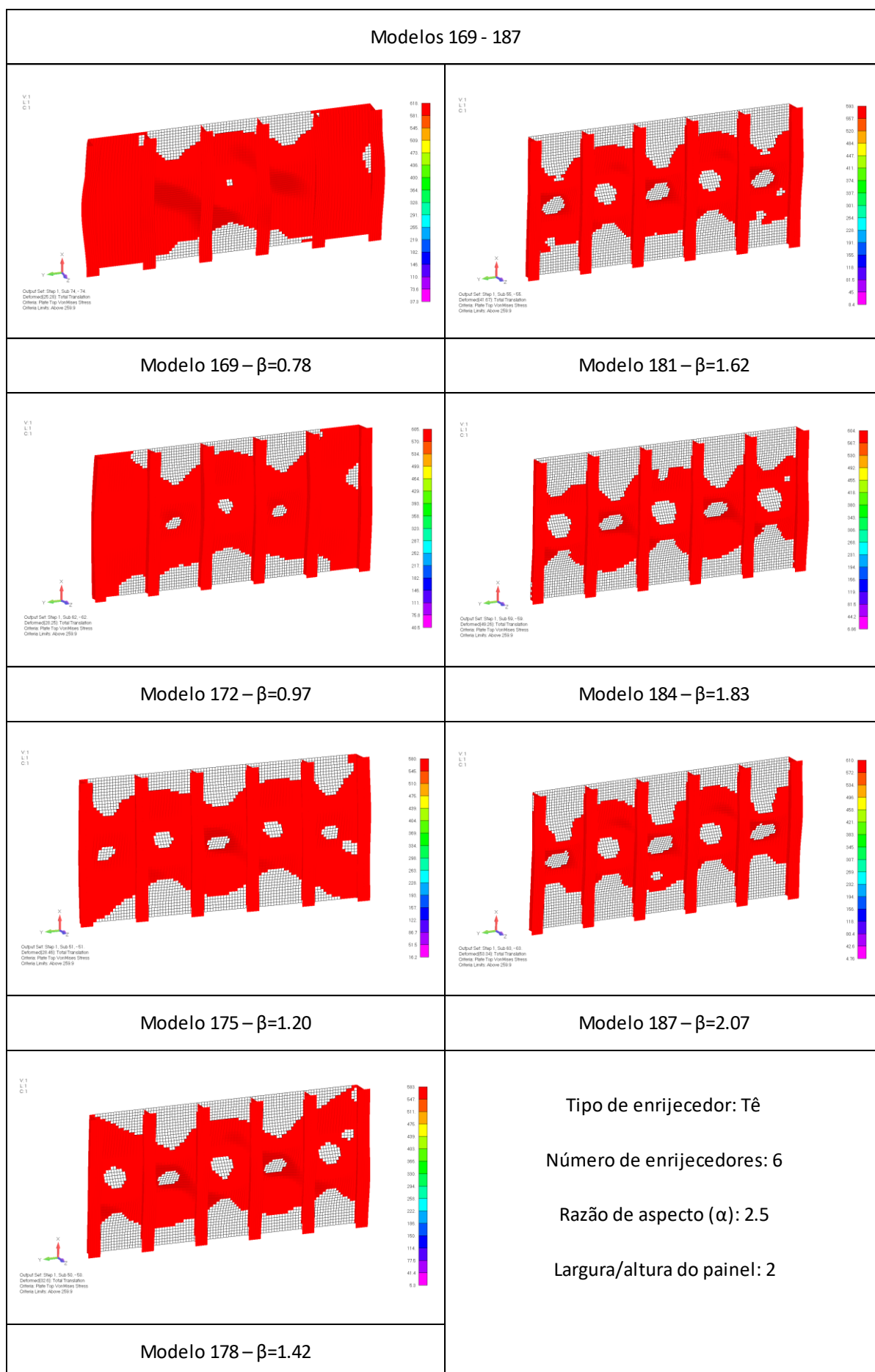
Modelos 64 - 82	
 Output Set (Step 1, Sub 56 - 56) Deformed(S217) Total Translation Criteria: Plate Top vonmises Stress Criteria Limits: Above 250.9	 Output Set (Step 1, Sub 46 - 46) Deformed(S214) Total Translation Criteria: Plate Top vonmises Stress Criteria Limits: Above 250.9
Modelo 64 – $\beta=0.82$	Modelo 76 – $\beta=1.65$
 Output Set (Step 1, Sub 61 - 61) Deformed(S218) Total Translation Criteria: Plate Top vonmises Stress Criteria Limits: Above 250.9	 Output Set (Step 1, Sub 49 - 49) Deformed(S217) Total Translation Criteria: Plate Top vonmises Stress Criteria Limits: Above 250.9
Modelo 67 – $\beta=1.03$	Modelo 79 – $\beta=1.86$
 Output Set (Step 1, Sub 49 - 49) Deformed(S218) Total Translation Criteria: Plate Top vonmises Stress Criteria Limits: Above 250.9	 Output Set (Step 1, Sub 49 - 49) Deformed(S212) Total Translation Criteria: Plate Top vonmises Stress Criteria Limits: Above 250.9
Modelo 70 – $\beta=1.24$	Modelo 82 – $\beta=2.11$
 Output Set (Step 1, Sub 44 - 44) Deformed(S217) Total Translation Criteria: Plate Top vonmises Stress Criteria Limits: Above 250.9	Tipo de enrijecedor: Cantoneira Número de enrijecedores: 8 Razão de aspecto (α): 3.5 Largura/altura do painel: 2
Modelo 73 – $\beta=1.45$	

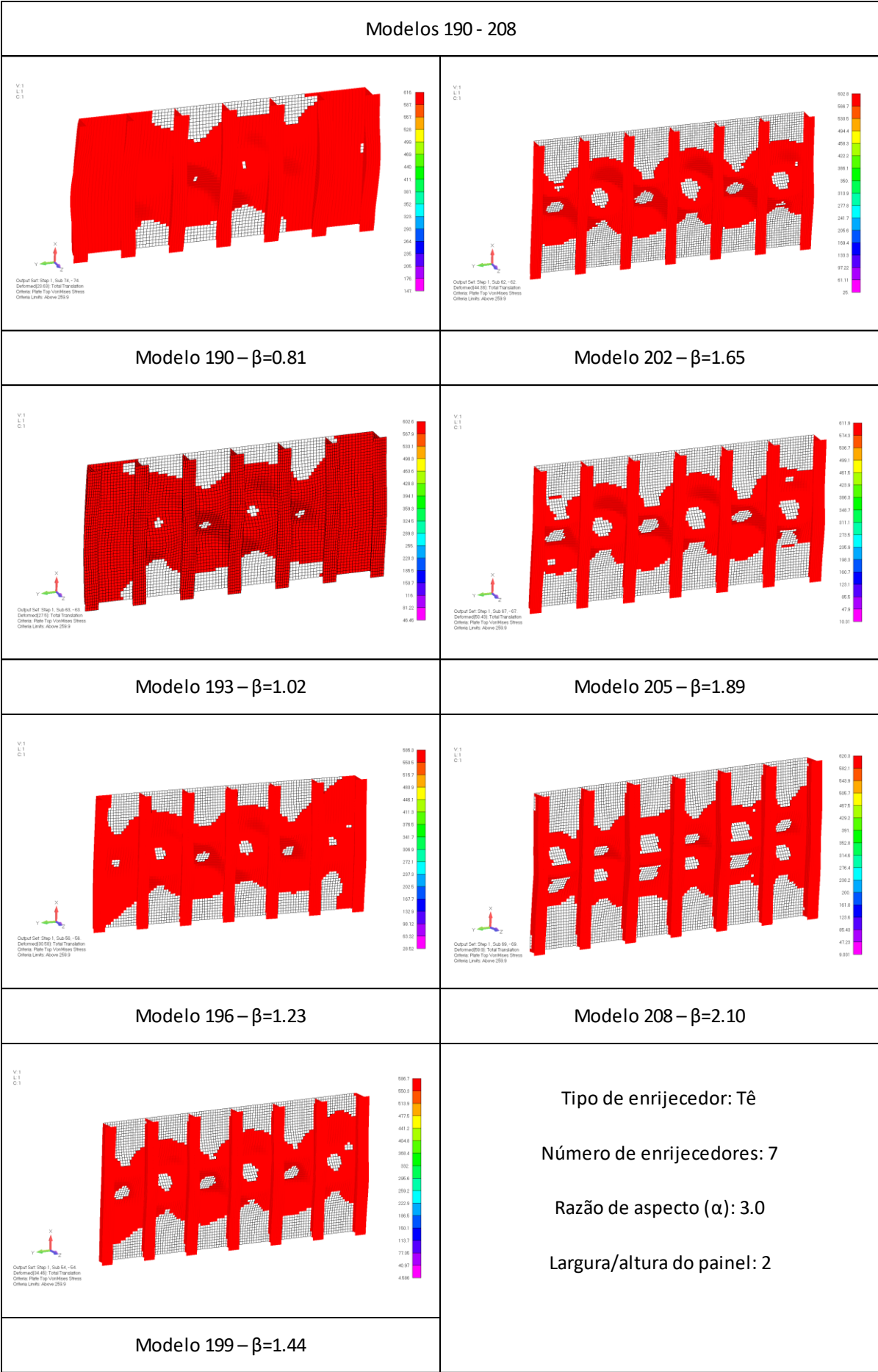


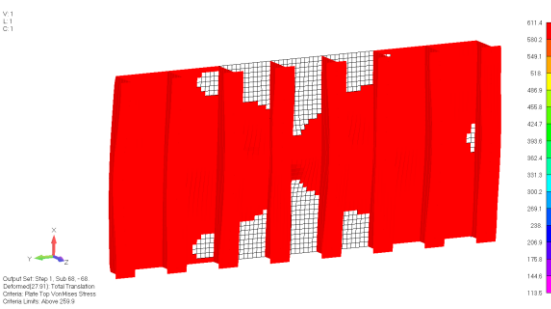
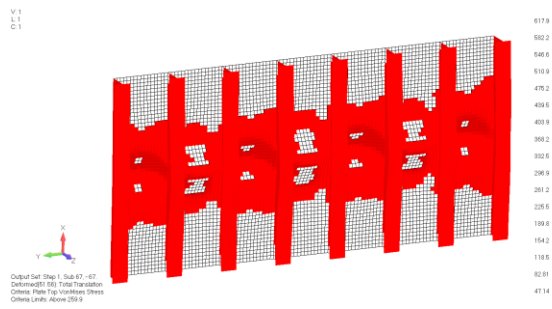
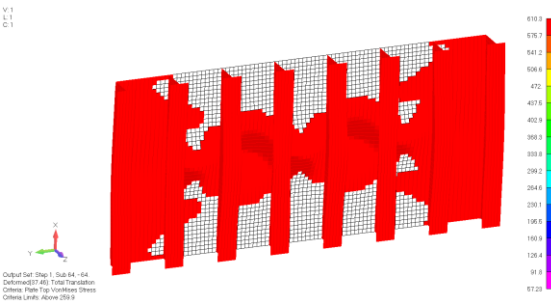
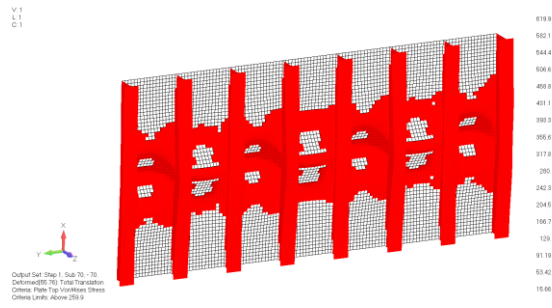
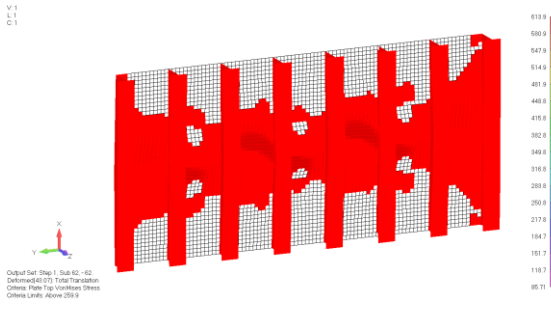
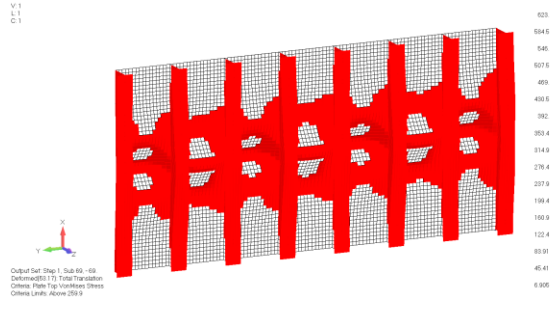
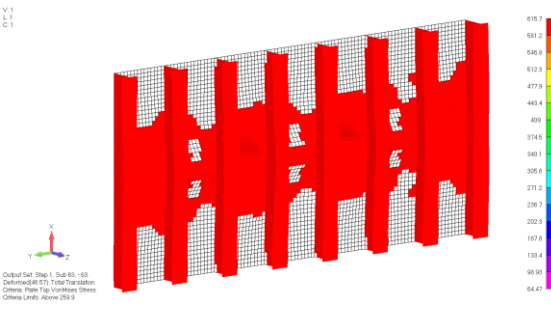
Modelos 106 - 124	
	
Modelo 106 – $\beta=0.83$	Modelo 118 – $\beta=1.72$
	
Modelo 109 – $\beta=1.04$	Modelo 121 – $\beta=1.98$
	
Modelo 112 – $\beta=1.25$	Modelo 124 – $\beta=2.19$
	Tipo de enrijecedor: Cantoneira Número de enrijecedores: 10 Razão de aspecto (α): 4.5 Largura/altura do painel: 2
Modelo 115 – $\beta=1.50$	

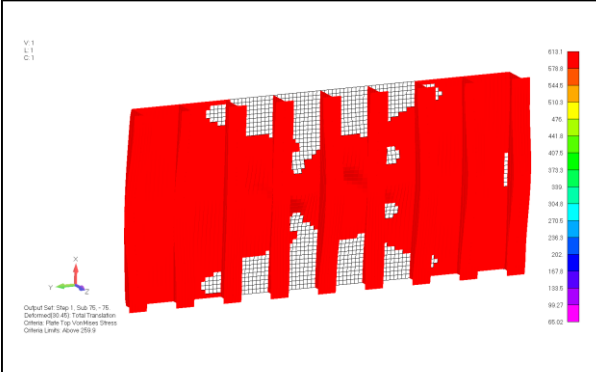
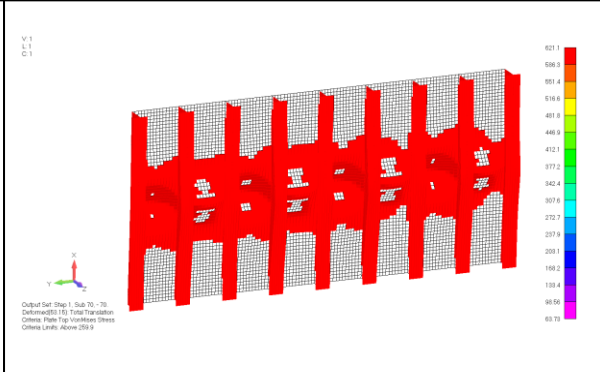
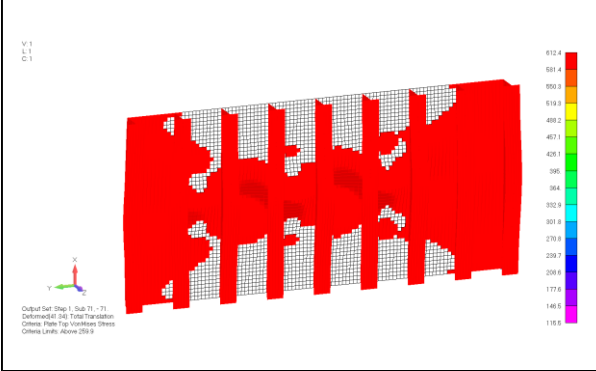
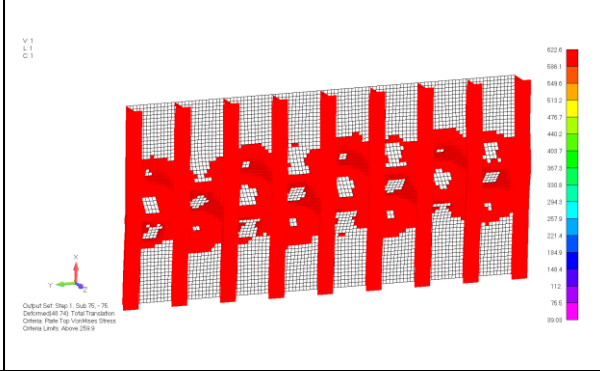
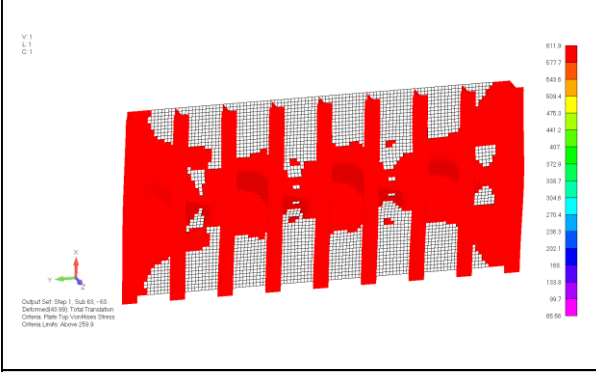
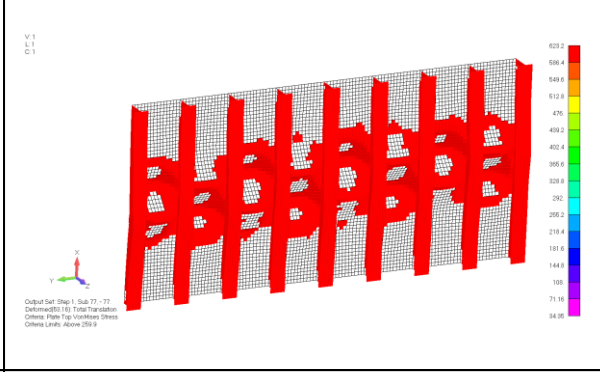
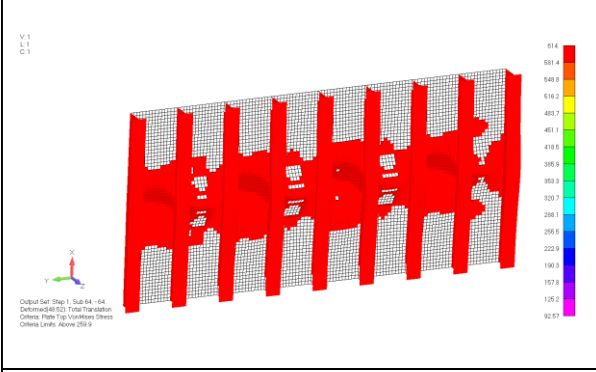
Modelos 127 - 145	
	
Modelo 127 – $\beta=0.88$	Modelo 139 – $\beta=1.80$
	
Modelo 130 – $\beta=1.10$	Modelo 142 – $\beta=2.01$
	
Modelo 133 – $\beta=1.31$	Modelo 145 – $\beta=2.26$
	Tipo de enrijecedor: Cantoneira Número de enrijecedores: 12 Razão de aspecto (α): 5.5 Largura/altura do painel: 2
Modelo 136 – $\beta=1.53$	

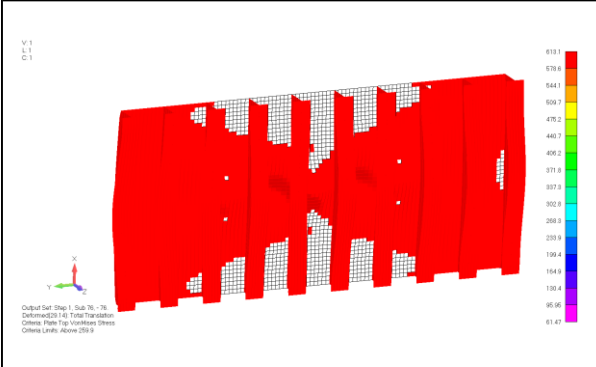
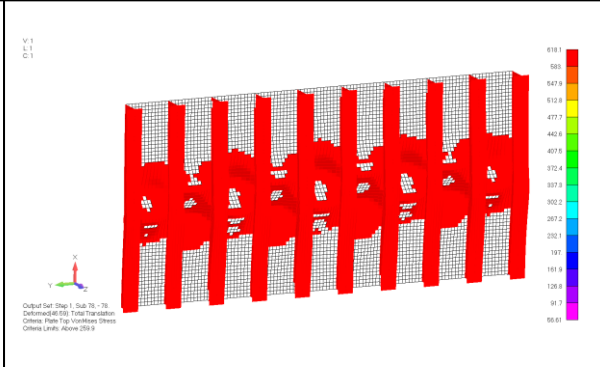
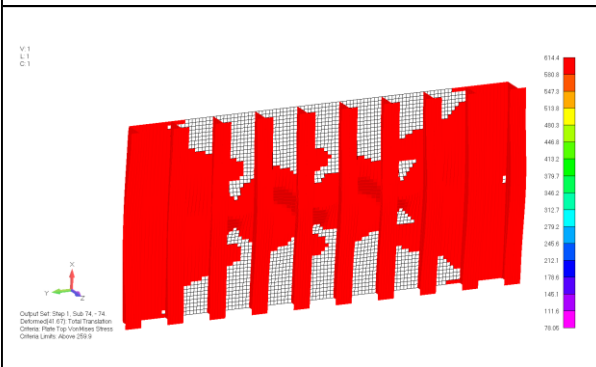
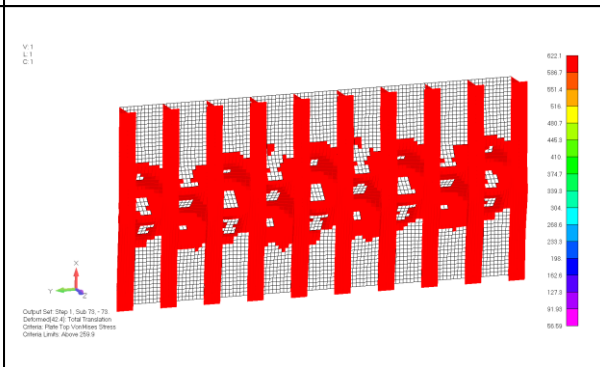
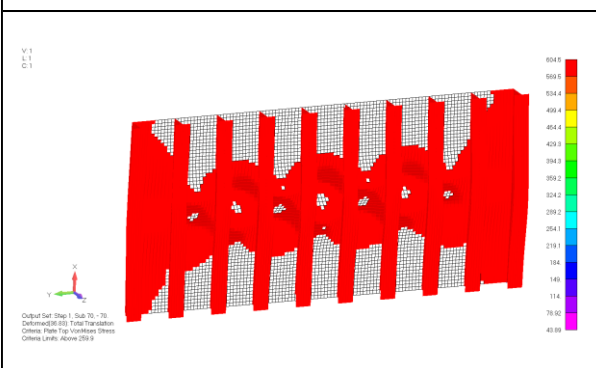
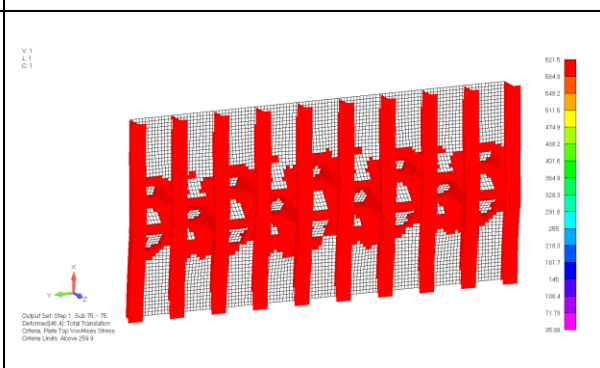
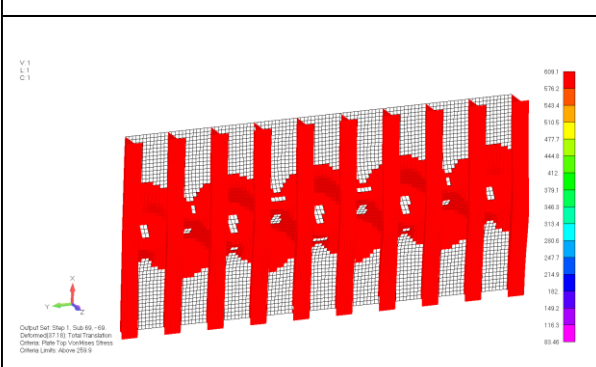
Modelos 148 - 166	
 Output Set (Step 1, Sub 95 - 95) Deformed(S95) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 250.0	 Output Set (Step 1, Sub 95 - 95) Deformed(S95) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 250.0
Modelo 148 – $\beta=0.77$	Modelo 160 – $\beta=1.57$
 Output Set (Step 1, Sub 95 - 95) Deformed(S95) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 250.0	 Output Set (Step 1, Sub 95 - 95) Deformed(S95) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 250.0
Modelo 151 – $\beta=0.95$	Modelo 163 – $\beta=1.80$
 Output Set (Step 1, Sub 95 - 95) Deformed(S95) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 250.0	 Output Set (Step 1, Sub 95 - 95) Deformed(S95) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 250.0
Modelo 154 – $\beta=1.14$	Modelo 166 – $\beta=2.04$
 Output Set (Step 1, Sub 95 - 95) Deformed(S95) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 250.0	Tipo de enrijecedor: Tê Número de enrijecedores: 5 Razão de aspecto (α): 2.0 Largura/altura do painel: 2
Modelo 157 – $\beta=1.34$	

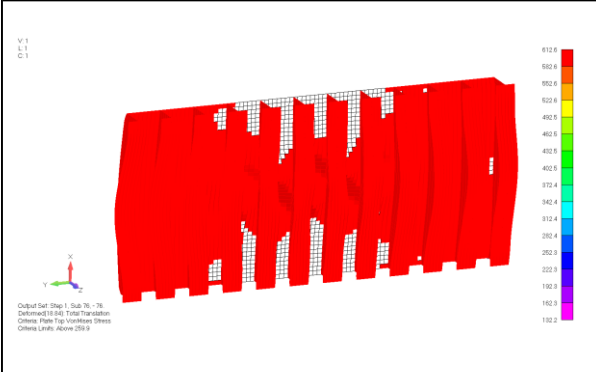
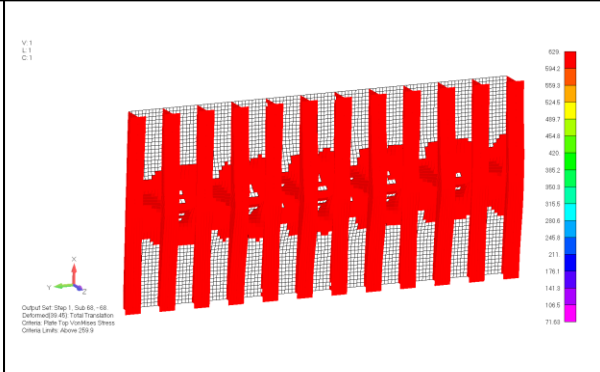
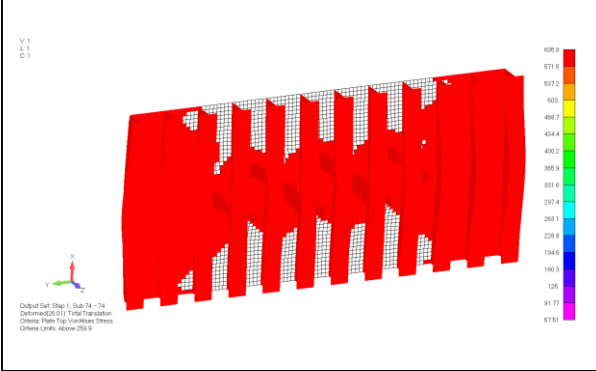
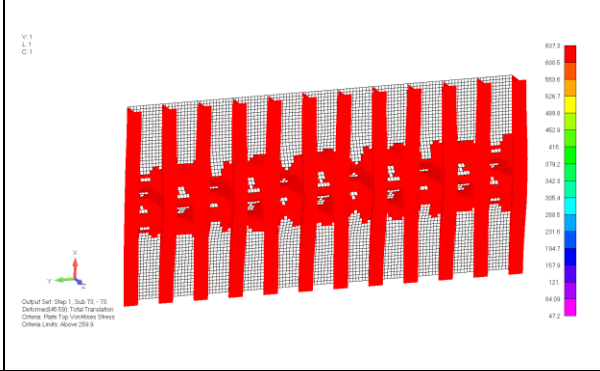
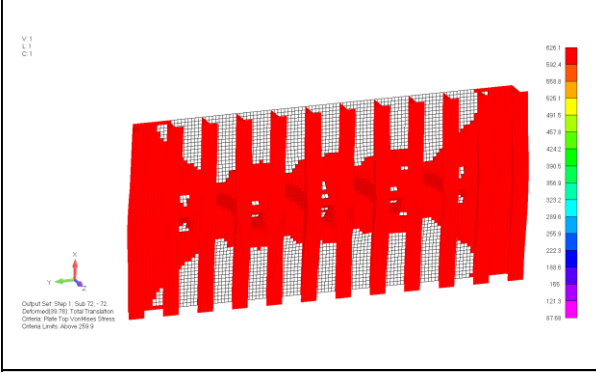
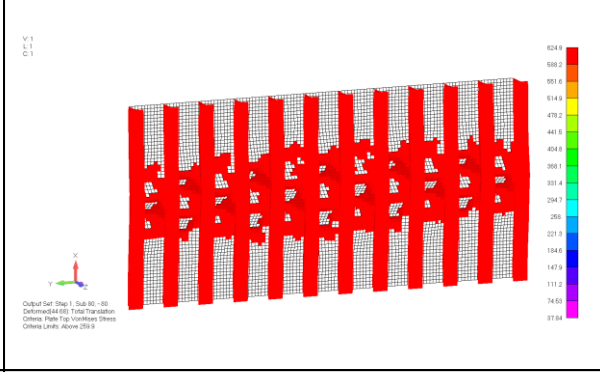
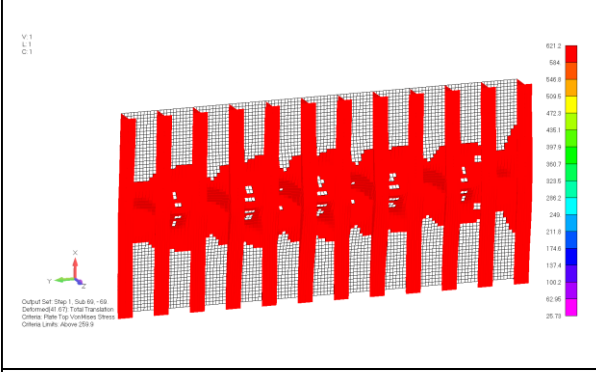


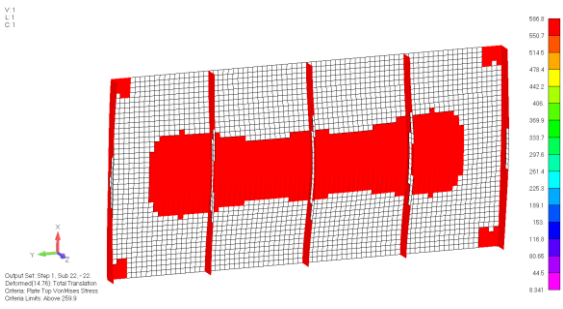
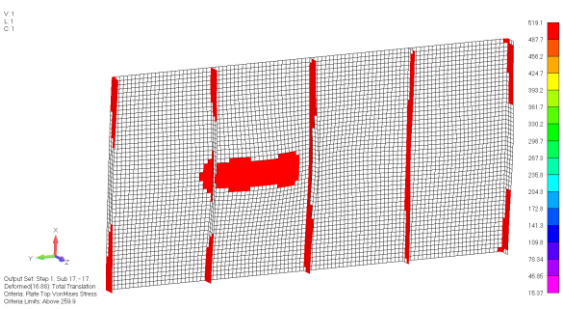
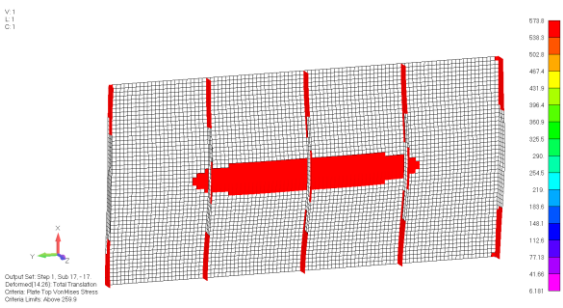
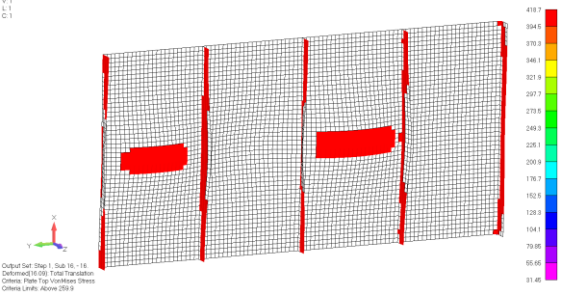
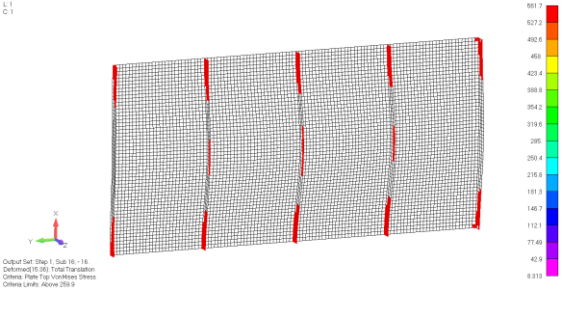
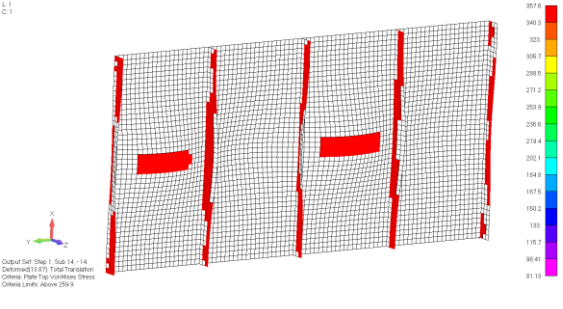
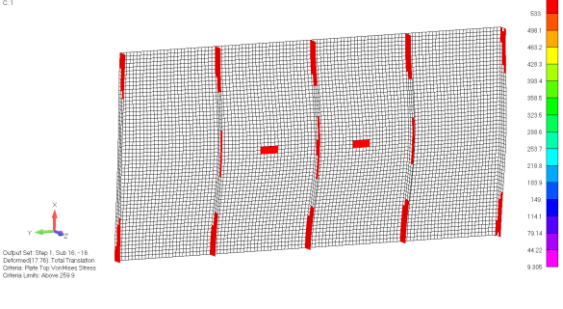


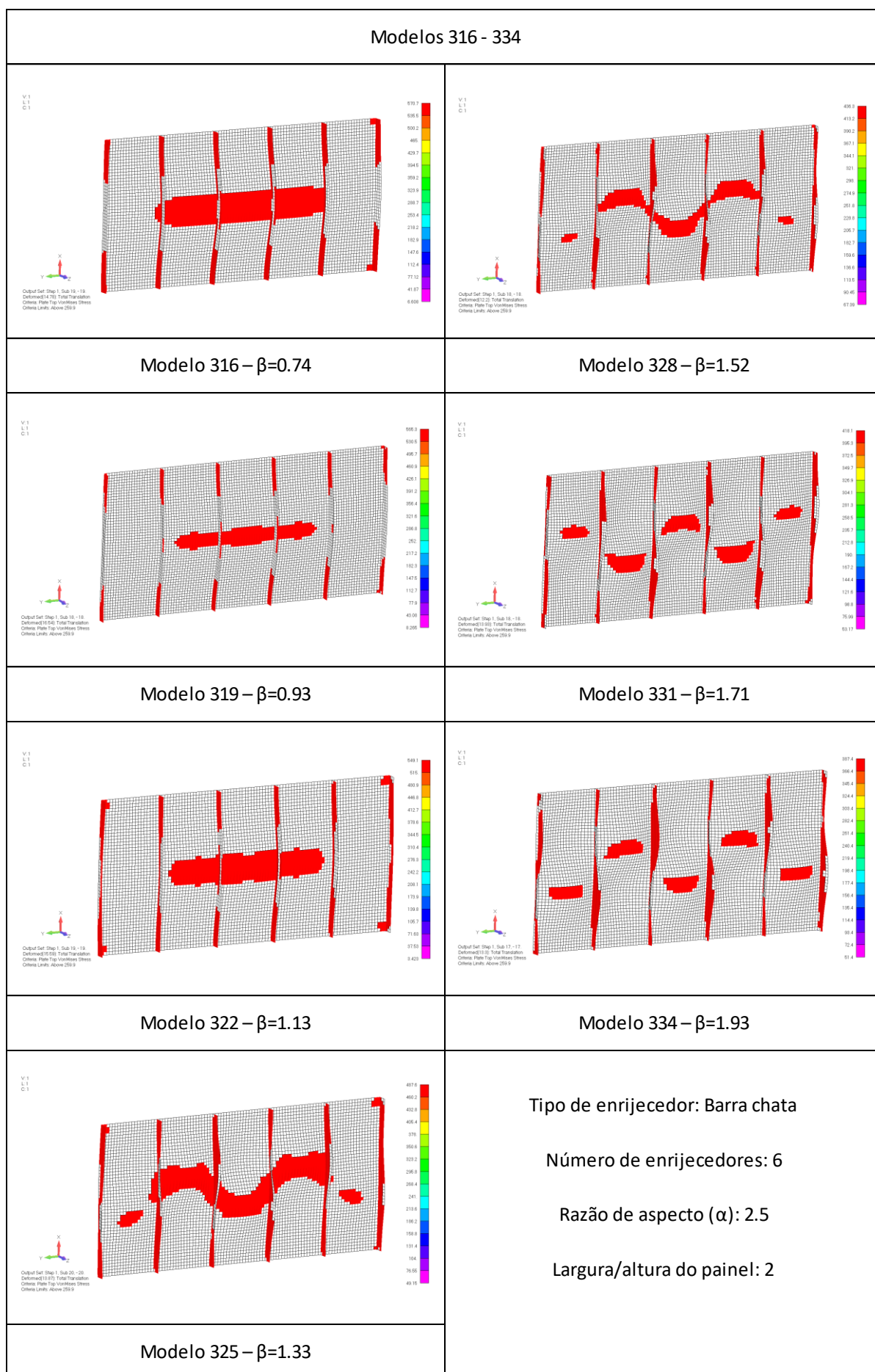
Modelos 211 - 229	
 Output Set: Step 1, Sub 65 - 65 Deformed(27.5) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9	 Output Set: Step 1, Sub 67 - 67 Deformed(27.5) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9
Modelo 211 – $\beta=0.84$	Modelo 223 – $\beta=1.70$
 Output Set: Step 1, Sub 64 - 64 Deformed(27.4) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9	 Output Set: Step 1, Sub 70 - 70 Deformed(29.7) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9
Modelo 214 – $\beta=1.06$	Modelo 226 – $\beta=1.91$
 Output Set: Step 1, Sub 62 - 62 Deformed(24.0) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9	 Output Set: Step 1, Sub 69 - 69 Deformed(29.1) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9
Modelo 217 – $\beta=1.27$	Modelo 229 – $\beta=2.17$
 Output Set: Step 1, Sub 65 - 65 Deformed(24.0) Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9	Tipo de enrijecedor: Tê Número de enrijecedores: 8 Razão de aspecto (α): 3.5 Largura/altura do painel: 2
Modelo 220 – $\beta=1.49$	

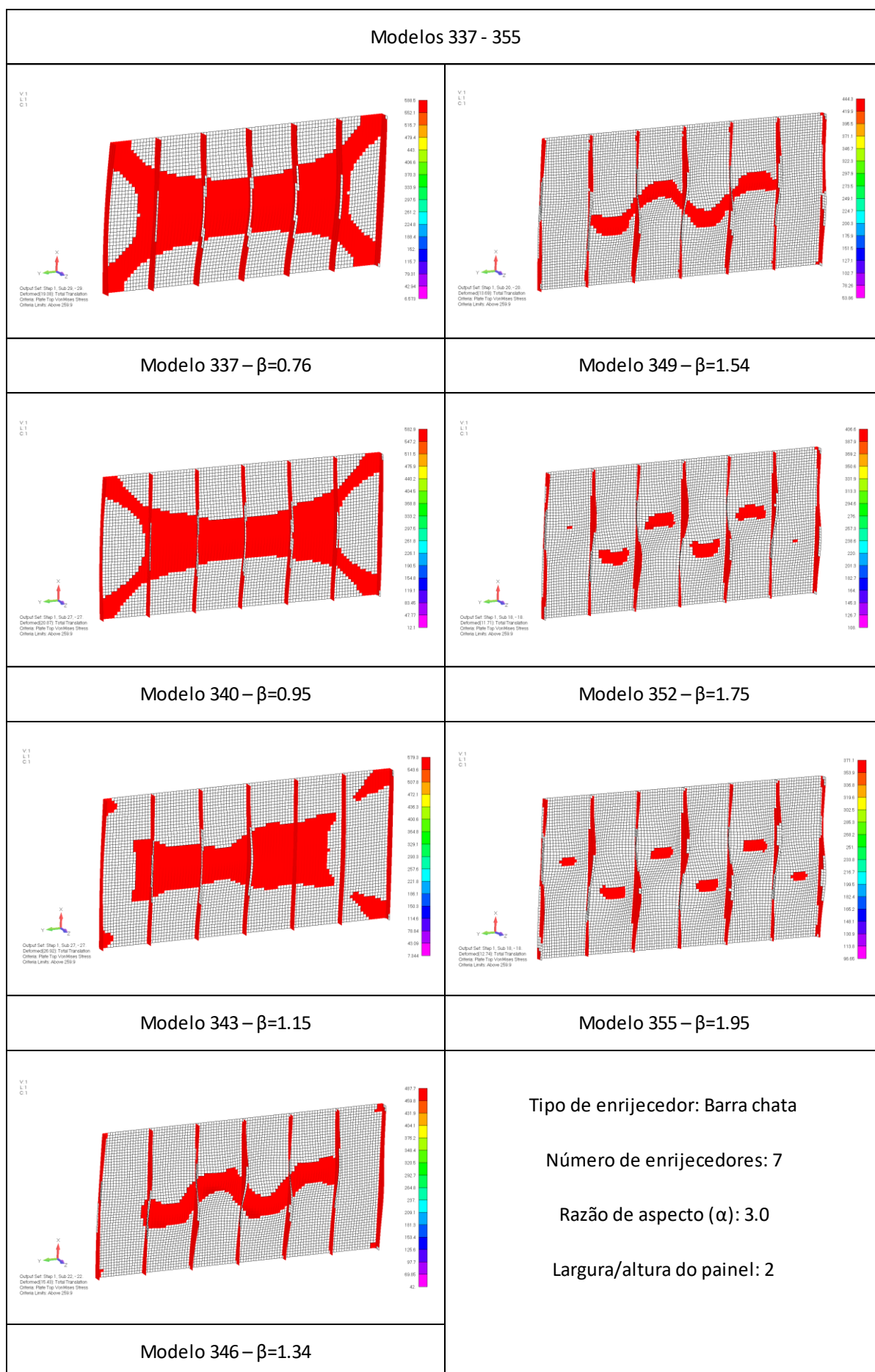
Modelos 232 - 250	
	
Modelo 232 – $\beta=0.84$	Modelo 244 – $\beta=1.72$
	
Modelo 235 – $\beta=1.05$	Modelo 247 – $\beta=1.98$
	
Modelo 238 – $\beta=1.27$	Modelo 250 – $\beta=2.19$
	Tipo de enrijecedor: Tê Número de enrijecedores: 9 Razão de aspecto (α): 4.0 Largura/altura do painel: 2
Modelo 241 – $\beta=1.48$	

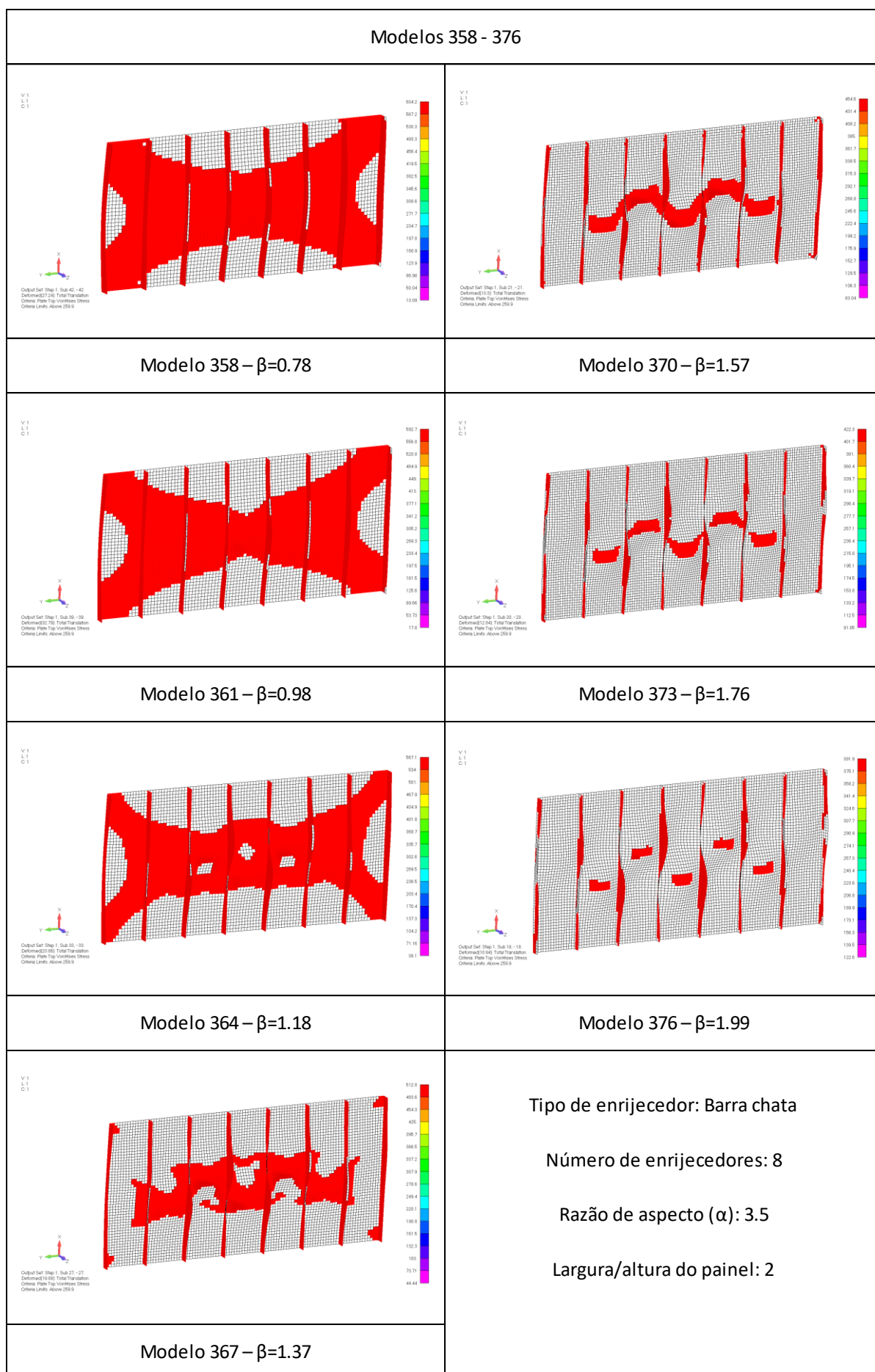
Modelos 253 - 271	
	
Modelo 253 – $\beta=0.85$	Modelo 265 – $\beta=1.76$
	
Modelo 256 – $\beta=1.07$	Modelo 268 – $\beta=2.03$
	
Modelo 259 – $\beta=1.29$	Modelo 271 – $\beta=2.25$
	Tipo de enrijecedor: Tê Número de enrijecedores: 10 Razão de aspecto (α): 4.5 Largura/altura do painel: 2
Modelo 262 – $\beta=1.55$	

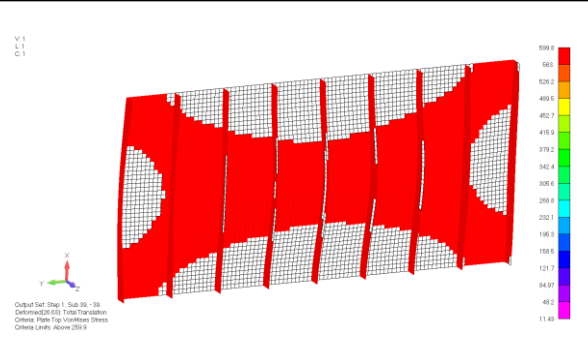
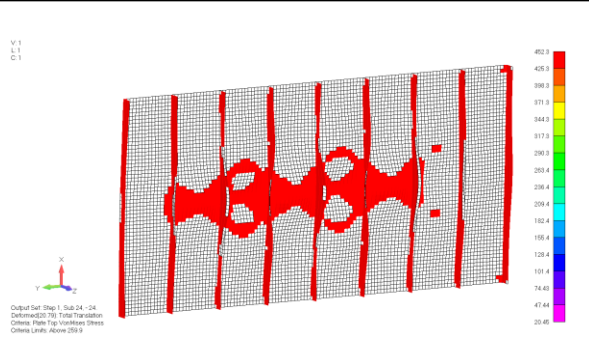
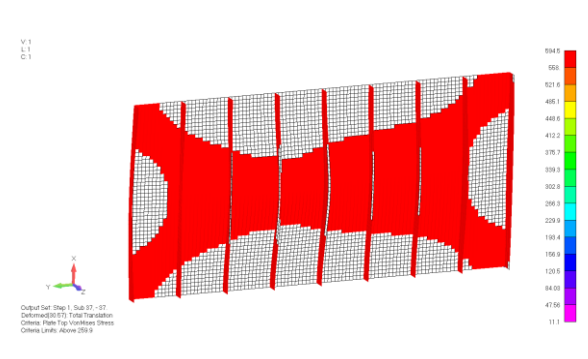
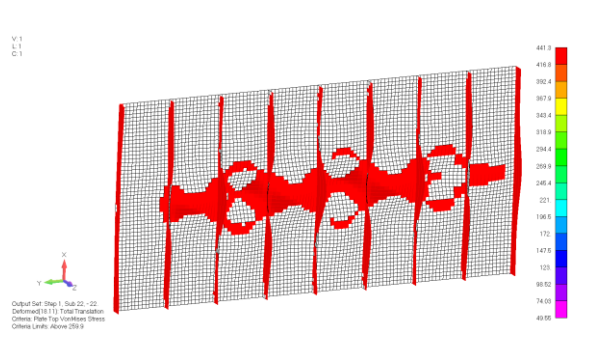
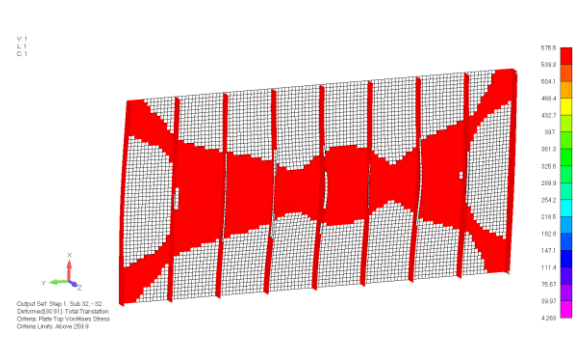
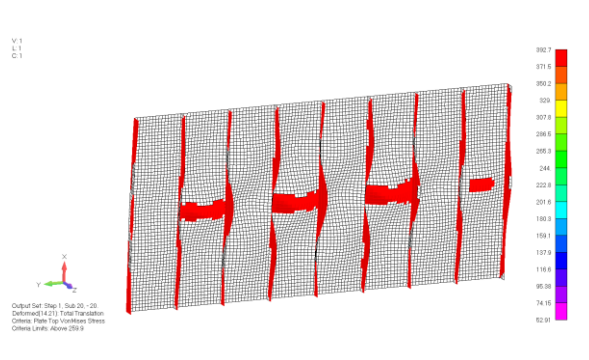
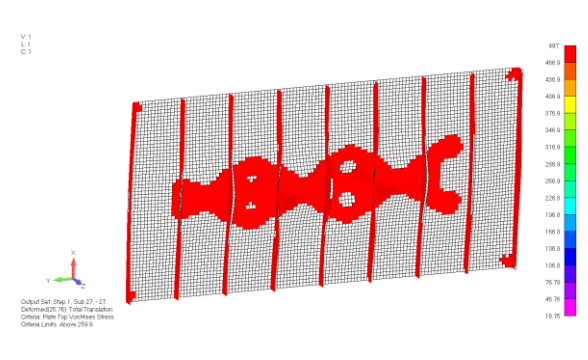
Modelos 274 - 292	
	
Modelo 274 – $\beta=0.90$	Modelo 286 – $\beta=1.85$
	
Modelo 277 – $\beta=1.13$	Modelo 289 – $\beta=2.06$
	
Modelo 280 – $\beta=1.35$	Modelo 292 – $\beta=2.31$
	Tipo de enrijecedor: Tê Número de enrijecedores: 12 Razão de aspecto (α): 5.5 Largura/altura do painel: 2
Modelo 283 – $\beta=1.57$	

Modelos 295 - 313	
	
Modelo 295 – $\beta=0.74$	Modelo 307 – $\beta=1.50$
	
Modelo 298 – $\beta=0.92$	Modelo 310 – $\beta=1.70$
	
Modelo 301 – $\beta=1.11$	Modelo 313 – $\beta=1.92$
	Tipo de enrijecedor: Barra chata Número de enrijecedores: 5 Razão de aspecto (α): 2.0 Largura/altura do painel: 2
Modelo 304 – $\beta=1.30$	

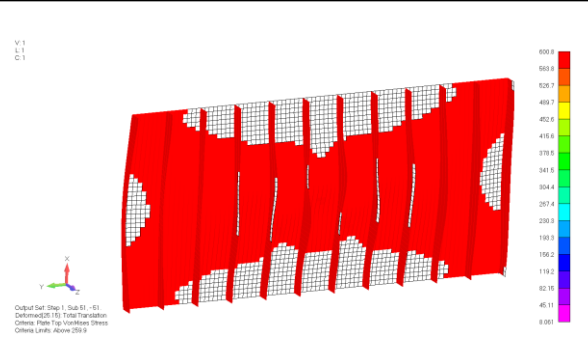
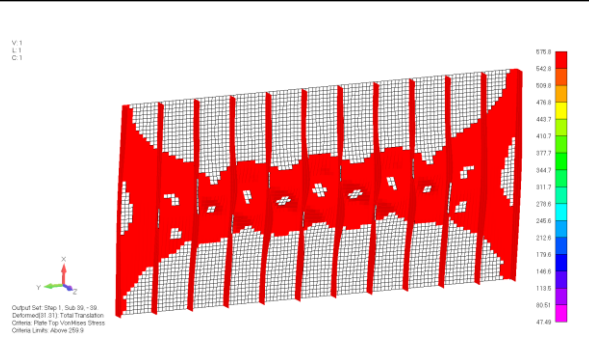
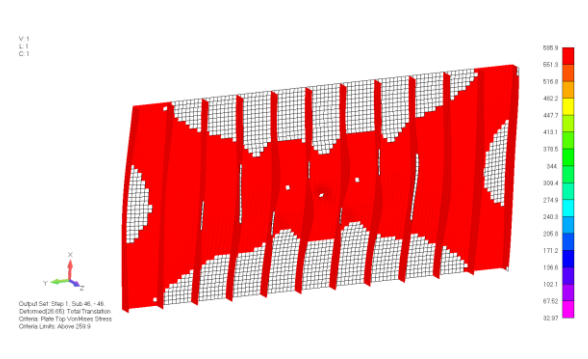
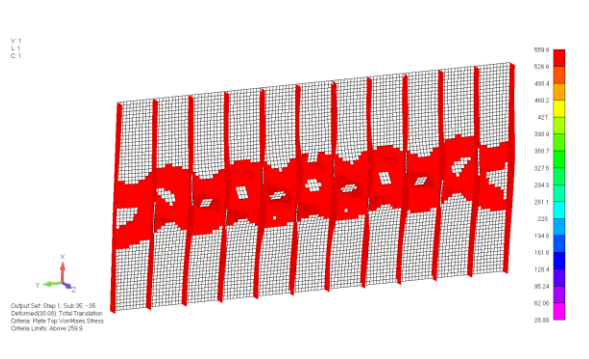
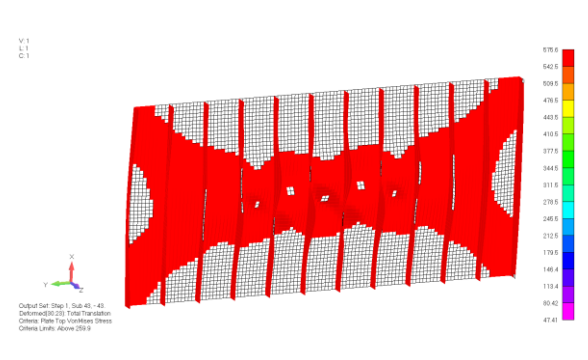
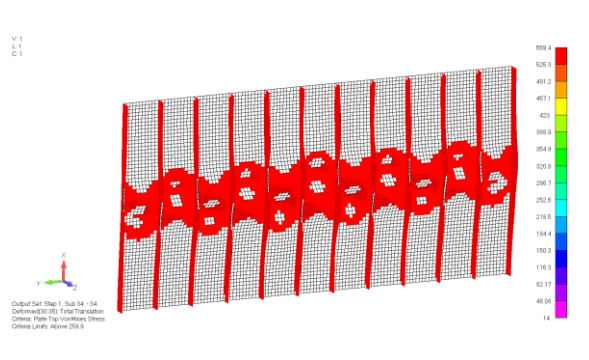
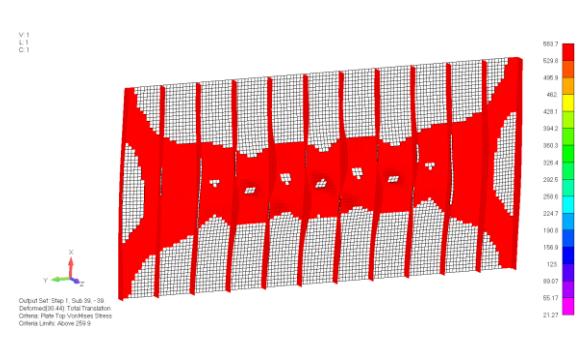






Modelos 379 - 397	
 Output Set: Step 1, Sub 30 - 38 Deformed(D379) Total Translation Criteria: Plot Top VonMises Stress Criteria Limits: Above 250.9	 Output Set: Step 1, Sub 24 - 24 Deformed(D391) Total Translation Criteria: Plot Top VonMises Stress Criteria Limits: Above 250.9
Modelo 379 – $\beta=0.78$	Modelo 391 – $\beta=1.58$
 Output Set: Step 1, Sub 27 - 27 Deformed(D382) Total Translation Criteria: Plot Top VonMises Stress Criteria Limits: Above 250.9	 Output Set: Step 1, Sub 22 - 22 Deformed(D394) Total Translation Criteria: Plot Top VonMises Stress Criteria Limits: Above 250.9
Modelo 382 – $\beta=0.98$	Modelo 394 – $\beta=1.82$
 Output Set: Step 1, Sub 32 - 32 Deformed(D385) Total Translation Criteria: Plot Top VonMises Stress Criteria Limits: Above 250.9	 Output Set: Step 1, Sub 26 - 26 Deformed(D397) Total Translation Criteria: Plot Top VonMises Stress Criteria Limits: Above 250.9
Modelo 385 – $\beta=1.17$	Modelo 397 – $\beta=2.01$
 Output Set: Step 1, Sub 27 - 27 Deformed(D388) Total Translation Criteria: Plot Top VonMises Stress Criteria Limits: Above 250.9	Tipo de enrijecedor: Barra chata Número de enrijecedores: 9 Razão de aspecto (α): 4.0 Largura/altura do painel: 2
Modelo 388 – $\beta=1.37$	

Modelos 400 - 418	
Output Set Step 1, Sub 42 - 42 Deformed(D3) D3 Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9	Output Set Step 1, Sub 38 - 38 Deformed(D3) D3 Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9
Modelo 400 – $\beta=0.79$	Modelo 412 – $\beta=1.62$
Output Set Step 1, Sub 35 - 35 Deformed(D3) D3 Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9	Output Set Step 1, Sub 31 - 31 Deformed(D3) D3 Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9
Modelo 403 – $\beta=0.99$	Modelo 415 – $\beta=1.86$
Output Set Step 1, Sub 36 - 36 Deformed(D3) D3 Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9	Output Set Step 1, Sub 24 - 24 Deformed(D3) D3 Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9
Modelo 406 – $\beta=1.19$	Modelo 418 – $\beta=2.06$
Output Set Step 1, Sub 37 - 37 Deformed(D3) D3 Total Translation Criteria: Plate Top VonMises Stress Criteria Units: Above 259.9	Tipo de enrijecedor: Barra chata Número de enrijecedores: 10 Razão de aspecto (α): 4.5 Largura/altura do painel: 2
Modelo 409 – $\beta=1.42$	

Modelos 421 - 439	
	
Modelo 421 – $\beta=0.83$	Modelo 433 – $\beta=1.69$
	
Modelo 424 – $\beta=1.03$	Modelo 436 – $\beta=1.89$
	
Modelo 427 – $\beta=1.24$	Modelo 439 – $\beta=2.12$
	Tipo de enrijecedor: Barra chata Número de enrijecedores: 12 Razão de aspecto (α): 5.5 Largura/altura do painel: 2
Modelo 430 – $\beta=1.44$	

APÊNDICE F – RESULTADOS DA RELAÇÃO P_U/P_0 VERSUS β

Este apêndice exibe gráficos da relação $\frac{P_U}{P_0}$ versus β , comparando-se os resultados para uma dada família de razão de aspecto das placas entre enrijecedores dos painéis. Desta forma, para uma determinada razão de aspecto α , foi feita uma comparação entre os resultados verificados para os painéis com enrijecedores do tipo cantoneira, perfil T e barra chata, mantendo-se o número de enrijecedores e relação largura/altura do painel constante em cada comparação. O significado dos parâmetros P_U e P_0 está exibido abaixo:

P_U – Carga última do painel enrijecido;

P_0 – Carga de plastificação teórica utilizando-se a tensão $\sigma_{0.2\%}$, para uma relação elasto-plástica perfeita entre tensão e deformação.

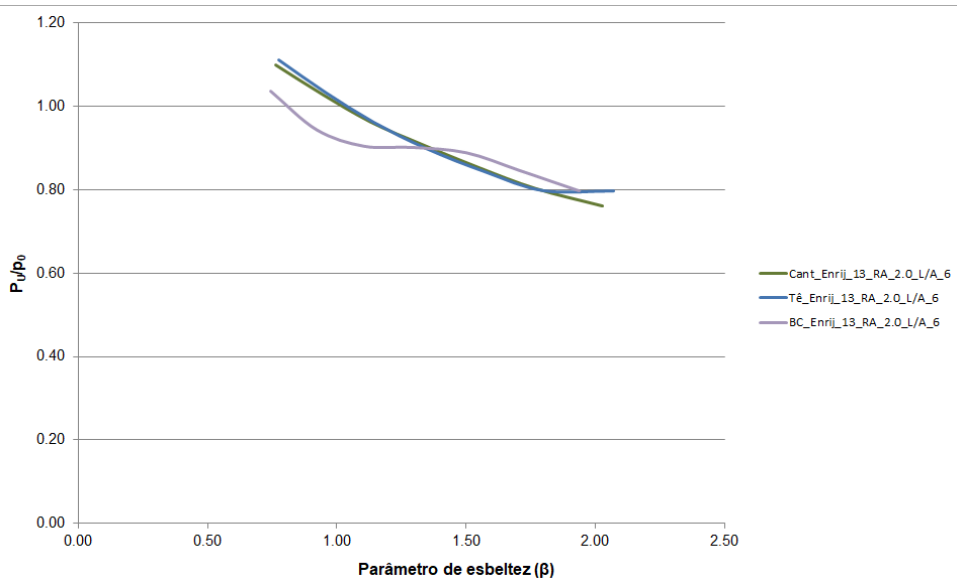
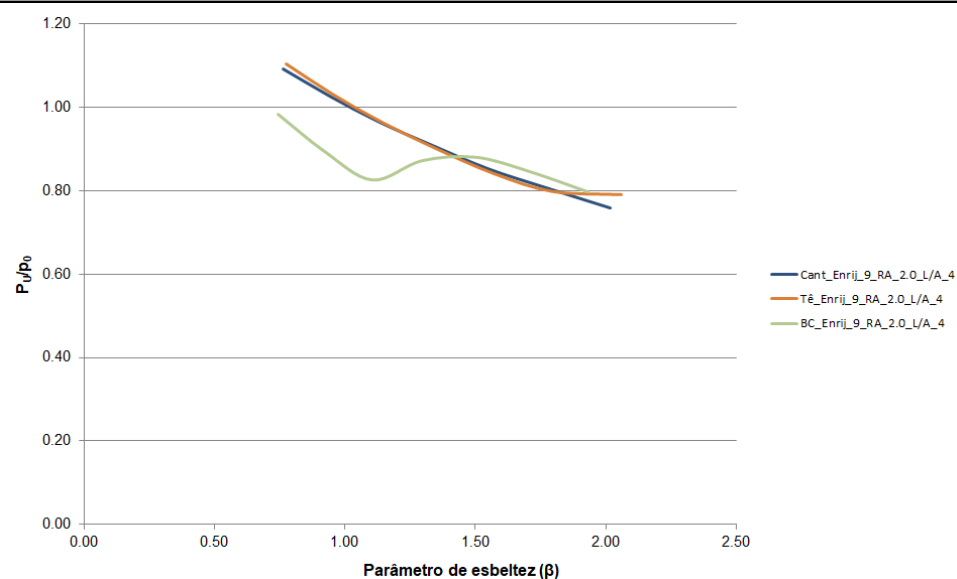
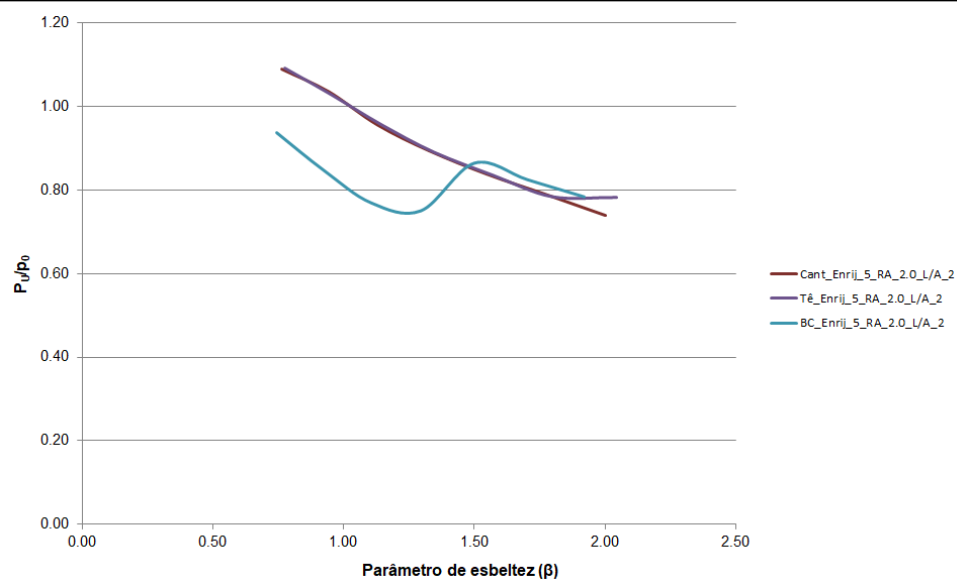
O significado dos rótulos dos gráficos está exemplificado a seguir:

Cant_Enrij_5_RA_2.0_L/A_2 – Modelo com 5 enrijecedores do tipo cantoneira, razão de aspecto igual a 2.0 e relação largura/altura do painel enrijecido igual a 2;

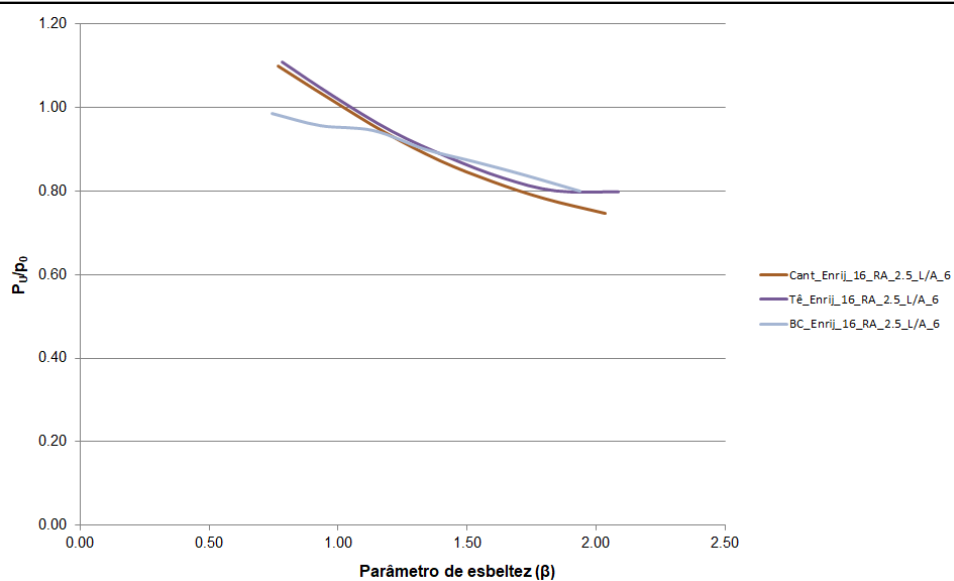
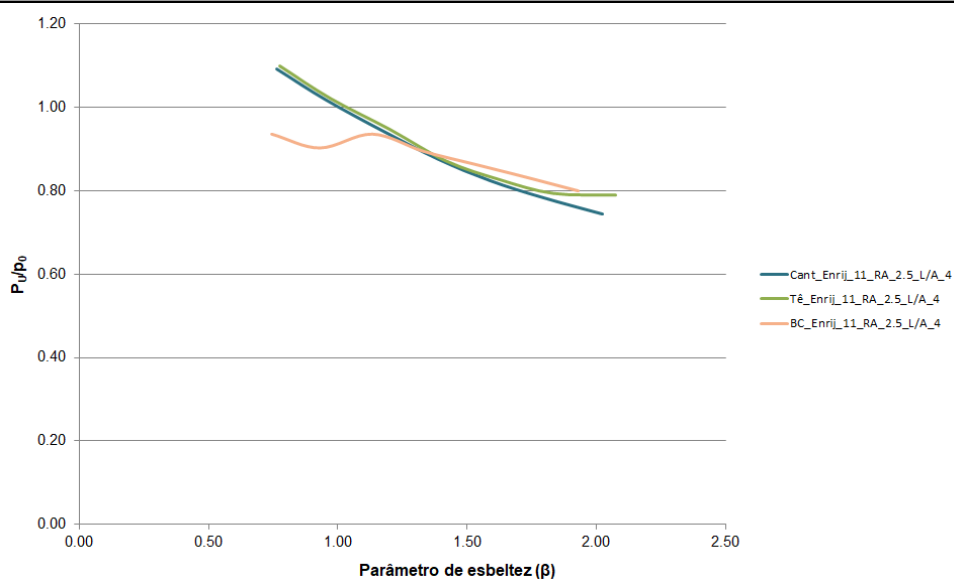
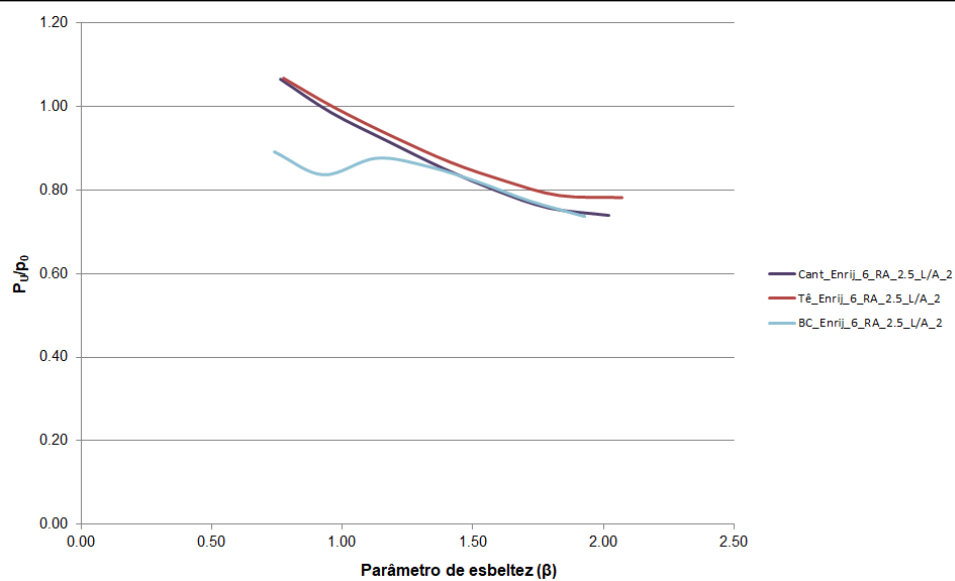
Tê_Enrij_5_RA_2.0_L/A_2 – Modelo com 5 enrijecedores do tipo tê, razão de aspecto igual a 2.0 e relação largura/altura do painel enrijecido igual a 2;

BC_Enrij_5_RA_2.0_L/A_2 – Modelo com 5 enrijecedores do tipo barra chata, razão de aspecto igual a 2.0 e relação largura/altura do painel enrijecido igual a 2.

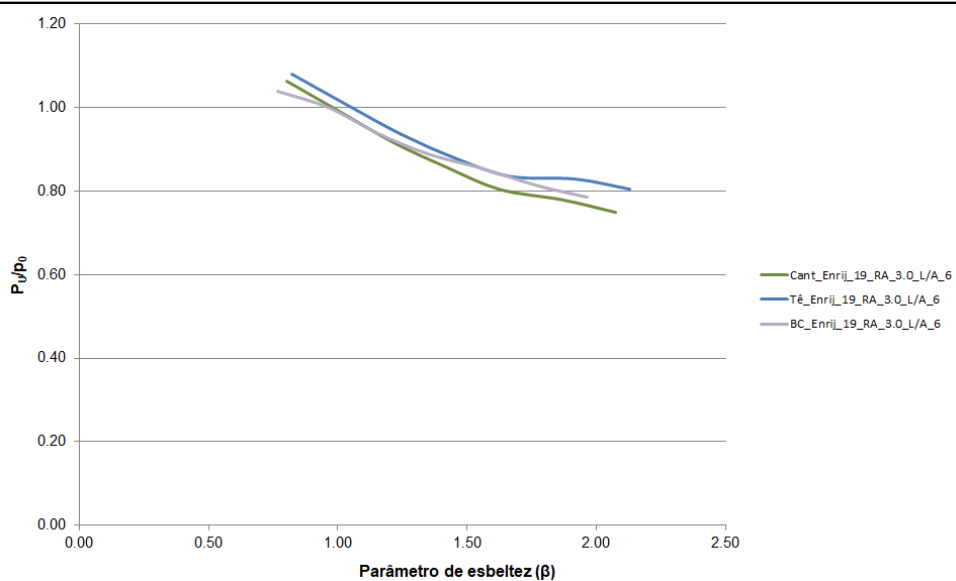
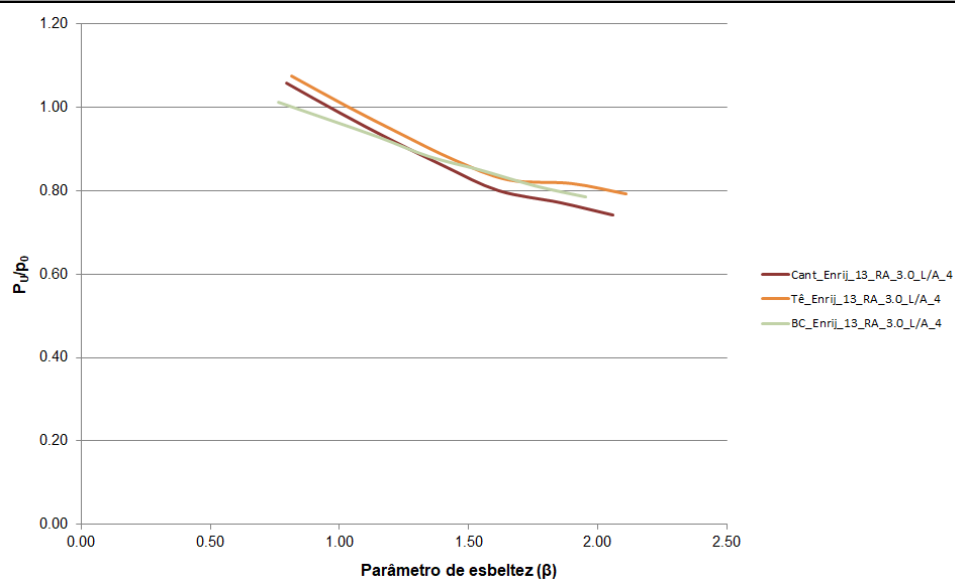
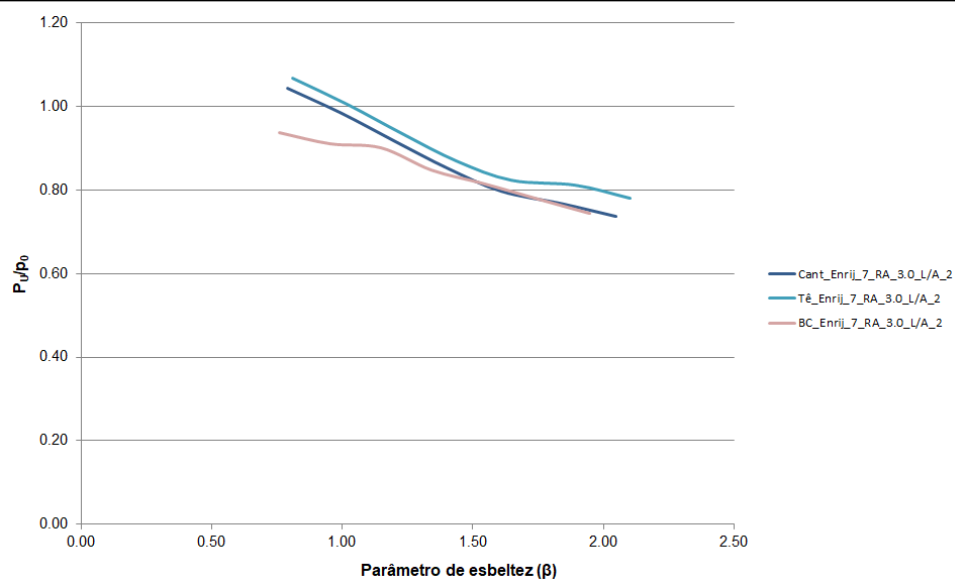
Razão de aspecto: 2.0



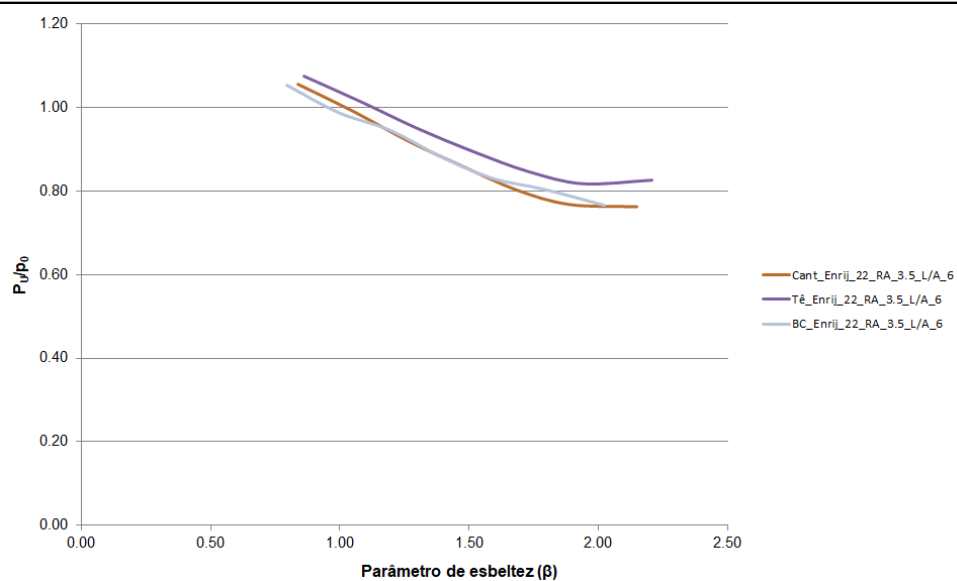
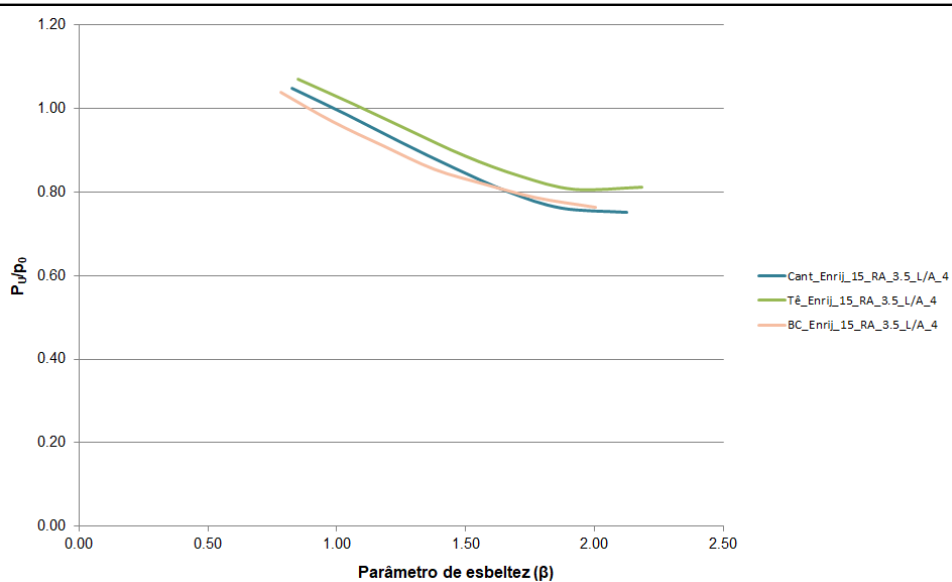
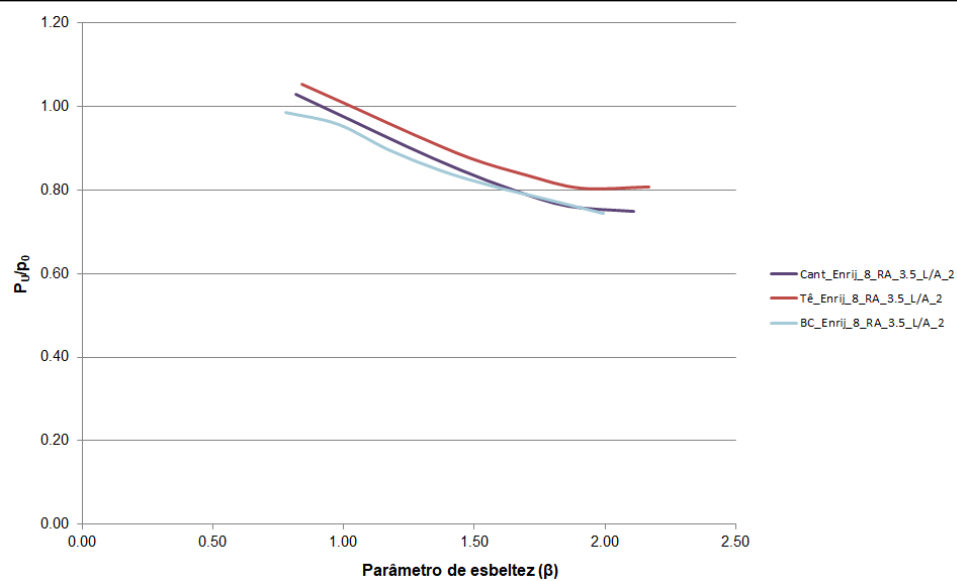
Razão de aspecto: 2.5



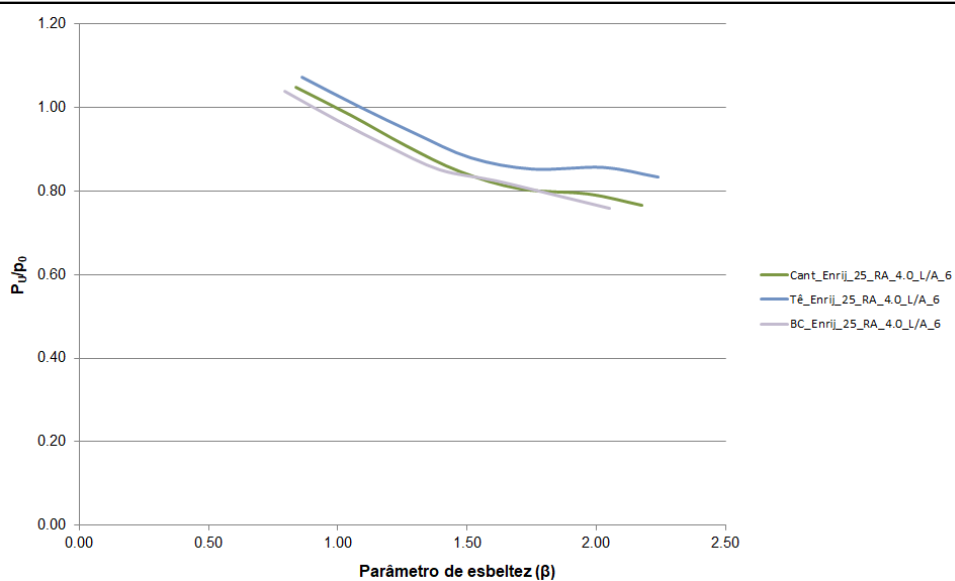
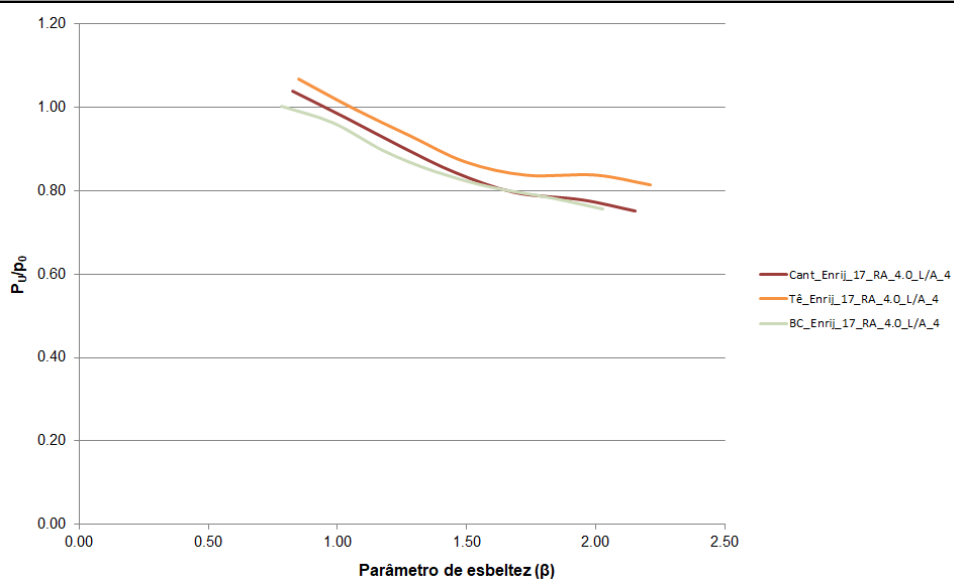
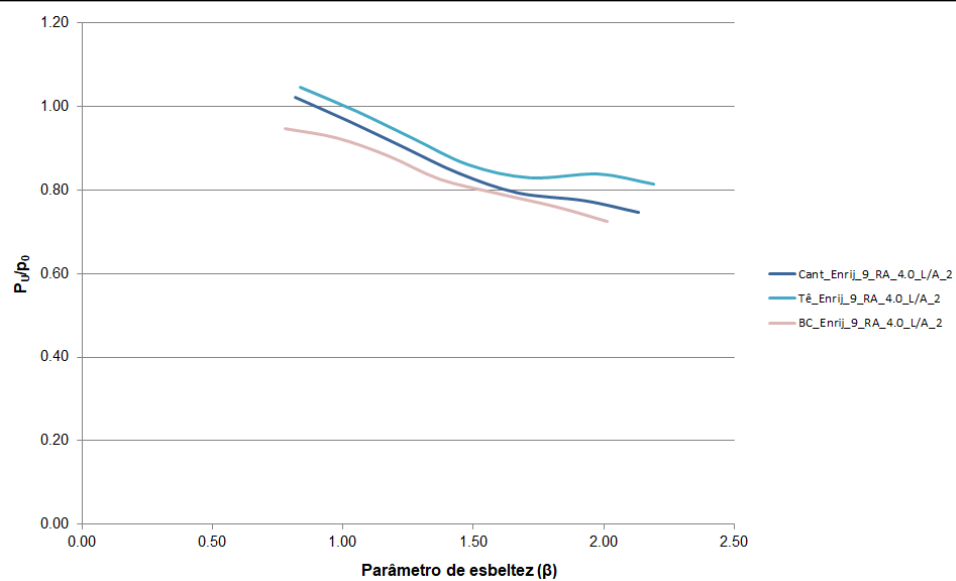
Razão de aspecto: 3.0



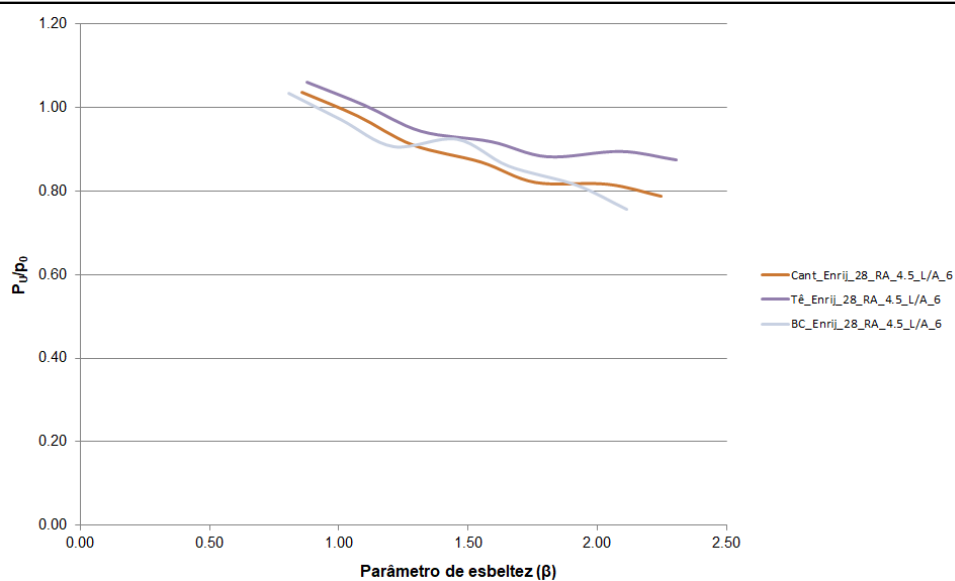
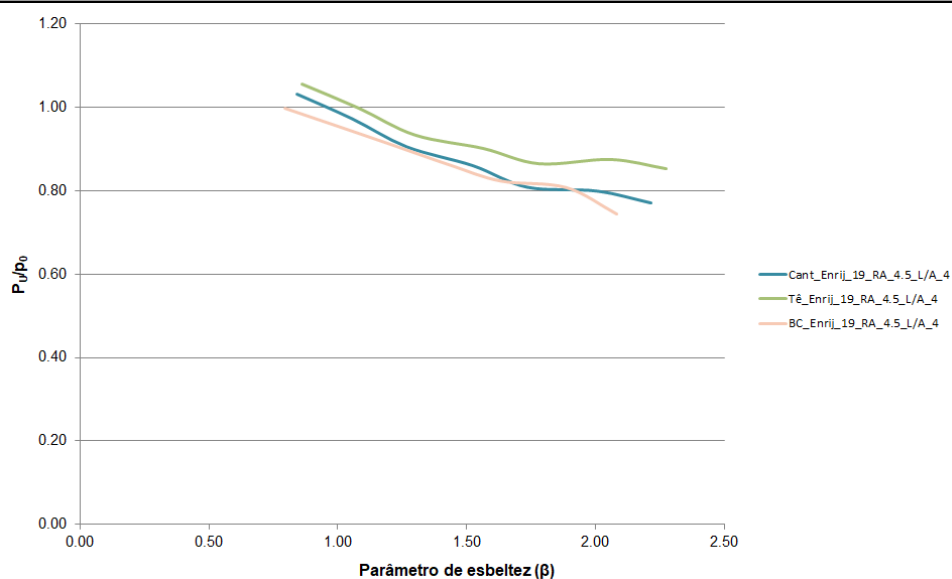
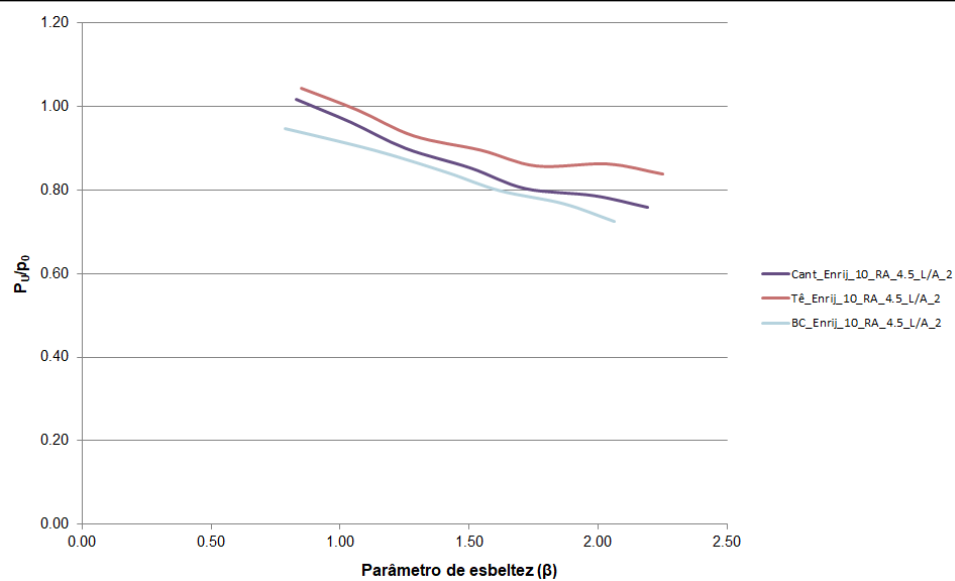
Razão de aspecto: 3.5



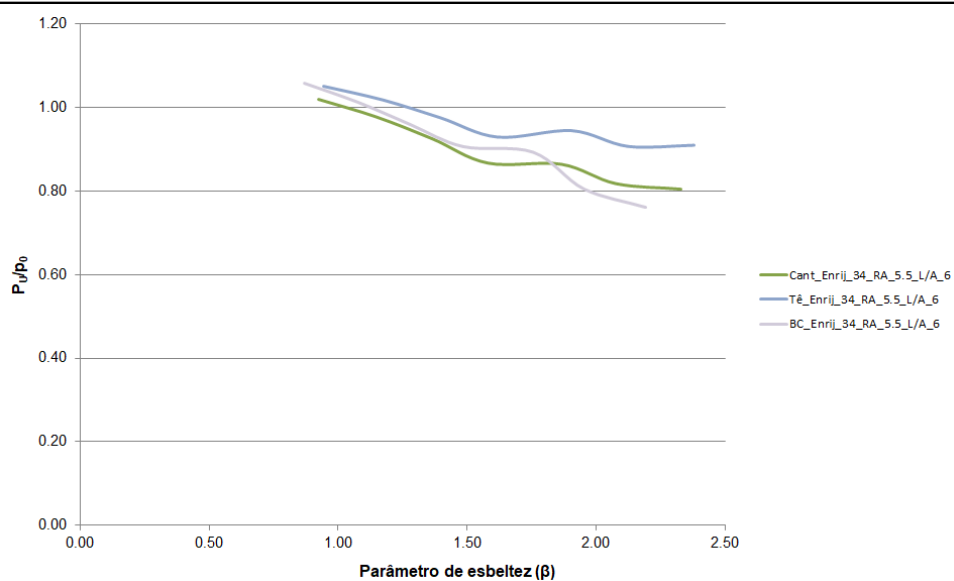
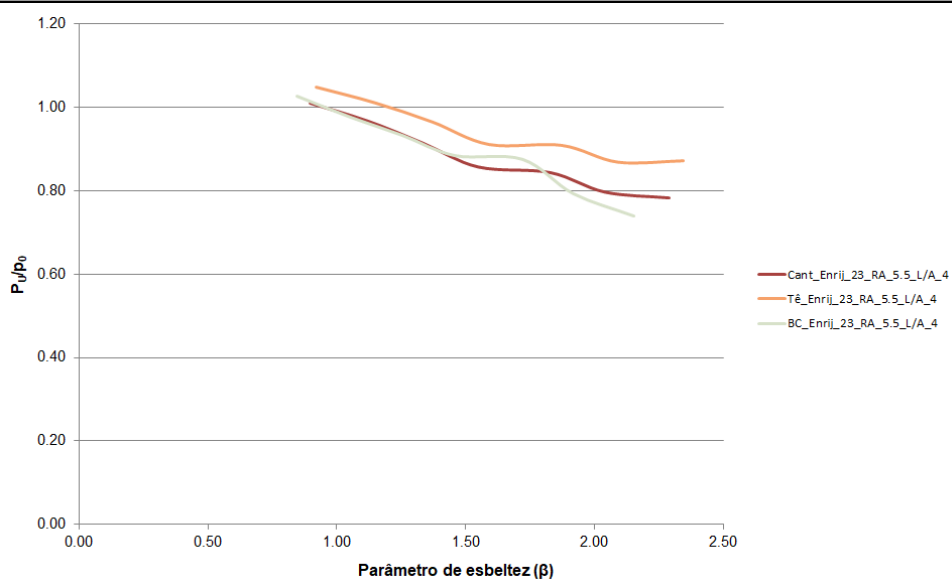
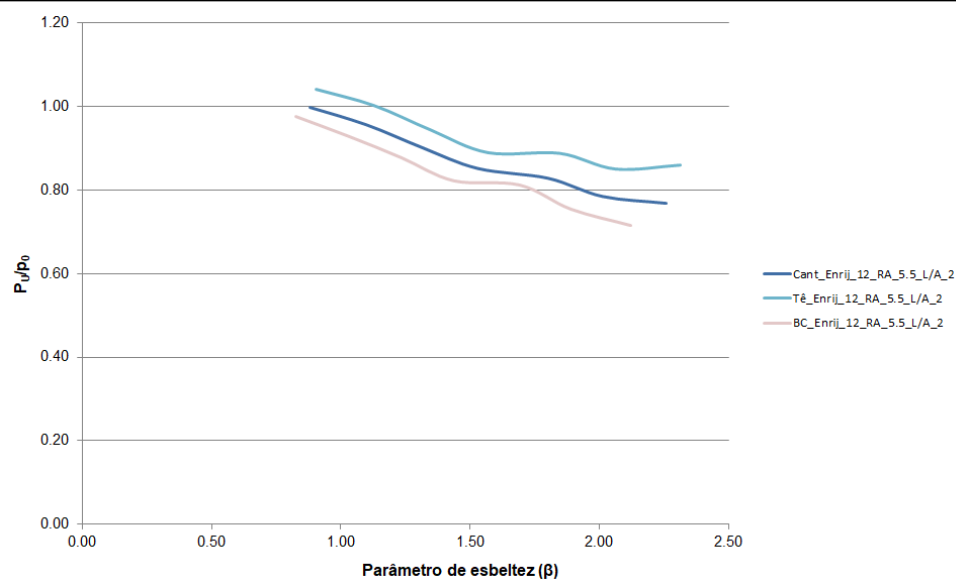
Razão de aspecto: 4.0



Razão de aspecto: 4.5



Razão de aspecto: 5.5



APÊNDICE G – VERIFICAÇÕES MANUAIS DE RESISTÊNCIA

Neste apêndice, está realizada a título de ilustração, a verificação da resistência última da placa 6.1.1 do Modelo 19 deste trabalho, conforme as recomendações do ABS [1]. A equação (27) é resolvida de forma manual e todos os parâmetros para o seu cálculo são apresentados de maneira explícita.

$$\left(\frac{\sigma_{x \max}}{\eta \sigma_{Ux}}\right)^2 - \phi \left(\frac{\sigma_{x \max}}{\eta \sigma_{Ux}}\right) \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\eta \sigma_{Uy}}\right) + \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\eta \sigma_{Uy}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\eta \tau_U}\right)^2 \leq 1 \quad (27)$$

Placa	Comprimento da placa (mm)	Largura da placa (mm)	Espessura da placa (mm)	Tensão normal na direção x (MPa)	Tensão normal na direção y (MPa)	Tensão cisalhante xy (MPa)	Tensão de von Mises (MPa)	Verificação da equação (27)
1..Placa 6.1.1 (X = 1100; Y= 550)	2200.00	1100.00	22.00	-133.46	-8.49	13.33	131.47	0.36

Tensão de flambagem elástica na direção x:

$$\sigma_{Ex} = k_s \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 = 4.4 \frac{\pi^2 203600}{12(1 - 0.3^2)} \left(\frac{22}{1100}\right)^2 = 323.9 \text{ MPa}$$

$$k_s = C_1 \frac{8.4}{k + 1.1} = 1.1 \frac{8.4}{1 + 1.1} = 4.4$$

Tensão de flambagem elástica na direção y:

$$\sigma_{Ey} = k_s \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 = 1.875 \frac{\pi^2 203600}{12(1 - 0.3^2)} \left(\frac{22}{1100}\right)^2 = 138.0 \text{ MPa}$$

$$k_s = C_2 \left(1 + \frac{1}{\alpha^2}\right)^2 (1.675 - 0.675\kappa) = 1.2 \left(1 + \frac{1}{2^2}\right)^2 (1.675 - 0.675 \times 1) = 1.875$$

Tensão de flambagem elástica por cisalhamento:

$$\tau_E = k_s \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 = 6.974 \frac{\pi^2 203600}{12(1 - 0.3^2)} \left(\frac{22}{1100}\right)^2 = 513.3 MPa$$

$$k_s = C_1 \left[4.0 \left(\frac{s}{l}\right)^2 + 5.34 \right] = 1.1 \left[4.0 \left(\frac{1100}{2200}\right)^2 + 5.34 \right] = 6.974$$

Tensão crítica de flambagem na direção x:

$$\sigma_{Cx} = \sigma_0 \left[1 - P_r(1 - P_r) \frac{\sigma_0}{\sigma_{Ex}} \right] = 259.9 \left[1 - 0.6(1 - 0.6) \frac{259.9}{323.9} \right] = 209.8 MPa$$

Tensão crítica de flambagem na direção y:

$$\sigma_{Cy} = \sigma_{Ey} = 138.0 MPa$$

Tensão crítica de flambagem por cisalhamento:

$$\tau_c = \tau_0 \left[1 - P_r(1 - P_r) \frac{\tau_0}{\tau_E} \right] = 150.1 \left[1 - 0.6(1 - 0.6) \frac{150.1}{513.3} \right] = 139.6 MPa$$

Tensão última na direção x:

$$\beta = \frac{s}{t} \sqrt{\frac{\sigma_0}{E}} = \frac{1100}{22} \sqrt{\frac{259.9}{203600}} = 1.79$$

$$C_x = \frac{2}{\beta} - \frac{1}{\beta^2} = \frac{2}{1.79} - \frac{1}{1.79^2} = 0.81$$

$$\sigma_{Ux} = C_x \sigma_0 = 0.81 \times 259.9 = 210.5 MPa$$

Tensão última na direção y:

$$\sigma_{Uy} = C_y \sigma_0 = 0.491 \times 259.9 = 127.6 MPa \Rightarrow \sigma_{Uy} = \sigma_{Cy} = 138.0 MPa$$

$$C_y = C_x \frac{s}{l} + 0.1 \left(1 - \frac{s}{l}\right) \left(1 + 1/\beta^2\right)^2 = 0.81 \frac{1100}{2200} + 0.1 \left(1 - \frac{1100}{2200}\right) \left(1 + 1/1.79^2\right)^2 = 0.491$$

Tensão última por cisalhamento:

$$\tau_U = \tau_c + \frac{0.5(\sigma_0 - \sqrt{3}\tau_c)}{(1 + \alpha + \alpha^2)^{1/2}} = 139.6 + \frac{0.5(259.9 - 139.6\sqrt{3})}{(1 + 2 + 2^2)^{1/2}} = 143.0 MPa$$

Cálculo da resistência última sob estado de tensões combinadas:

$$\left(\frac{\sigma_{x \max}}{\eta \sigma_{Ux}}\right)^2 - \varphi \left(\frac{\sigma_{x \max}}{\eta \sigma_{Ux}}\right) \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\eta \sigma_{Uy}}\right) + \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\eta \sigma_{Uy}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\eta \tau_U}\right)^2 \leq 1 \quad (27)$$

$$\left(\frac{133.5}{1.0 \times 210.5}\right)^2 - 0.105 \left(\frac{133.5}{1.0 \times 210.5}\right) \left(\frac{8.5}{1.0 \times 138.0}\right) + \left(\frac{8.5}{1.0 \times 138.0}\right)^2 + \left(\frac{13.3}{1.0 \times 143.0}\right)^2 \leq 1$$

$$0.40 - 0.00 + 0.00 + 0.00 = 0.40 < 1.00$$

$$\varphi = 1.0 - \frac{\beta}{2} = 1.0 - \frac{1.79}{2} = 0.105$$

Desta forma, a resolução manual da equação (27) conforme as recomendações do ABS [1], para a placa 6.1.1 do Modelo 19 deste trabalho, conduziu a um resultado de 0.40. O resultado da verificação automática com o *code check* embutido no *software* NX Nastran [56], apresentou o resultado de 0.36, conforme pode ser observado na Tabela 9 e na Figura 105. Vale lembrar, que as equações do ABS [1], foram calibradas para os painéis enrijecidos fabricados em aço carbono. O resultado obtido com a equação (27) do ABS [1], apresentou uma condição desfavorável à segurança, uma vez que está indicando que apenas 40% da capacidade da placa entre enrijecedores está sendo utilizada. Contudo, a placa 6.1.1 do Modelo 19 atingiu

sua capacidade resistente última, uma vez que o estado de tensões utilizado no cálculo da equação (27), levou em conta os resultados da análise numérica em elementos finitos quando da resistência máxima do painel enrijecido.

A seguir, será feita a resolução manual da equação (58) proposta neste trabalho, para os painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304, para a placa 6.1.1 do Modelo 19.

$$\left(\frac{\sigma_{x \max}}{\eta \sigma_{Ux}}\right)^2 + \left(\frac{A}{\eta^2}\right) + \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\eta \sigma_{Uy}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\eta \tau_U}\right)^2 \leq 1 \quad (58)$$

Placa	Comprimento da placa (mm)	Largura da placa (mm)	Espessura da placa (mm)	Tensão normal na direção x (MPa)	Tensão normal na direção y (MPa)	Tensão cisalhante xy (MPa)	Tensão de von Mises (MPa)	Verificação da equação (58)
1..Placa 6.1.1 (X = 1100; Y= 550)	2200.00	1100.00	22.00	-133.46	-8.49	13.33	131.47	0.91

Tensão de flambagem elástica na direção x:

$$\sigma_{Ex} = k_s \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 = 4.4 \frac{\pi^2 203600}{12(1 - 0.3^2)} \left(\frac{22}{1100}\right)^2 = 323.9 MPa$$

$$k_s = C_1 \frac{8.4}{k + 1.1} = 1.1 \frac{8.4}{1 + 1.1} = 4.4$$

Tensão de flambagem elástica na direção y:

$$\sigma_{Ey} = k_s \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 = 1.875 \frac{\pi^2 203600}{12(1 - 0.3^2)} \left(\frac{22}{1100}\right)^2 = 138.0 MPa$$

$$k_s = C_2 \left(1 + \frac{1}{\alpha^2}\right)^2 (1.675 - 0.675\kappa) = 1.2 \left(1 + \frac{1}{2^2}\right)^2 (1.675 - 0.675 \times 1) = 1.875$$

Tensão de flambagem elástica por cisalhamento:

$$\tau_E = k_s \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 = 6.974 \frac{\pi^2 203600}{12(1 - 0.3^2)} \left(\frac{22}{1100}\right)^2 = 513.3 MPa$$

$$k_s = C_1 \left[4.0 \left(\frac{s}{l} \right)^2 + 5.34 \right] = 1.1 \left[4.0 \left(\frac{1100}{2200} \right)^2 + 5.34 \right] = 6.974$$

Tensão crítica de flambagem na direção x:

$$\sigma_{Cx} = \sigma_0 \left[1 - P_r(1 - P_r) \frac{\sigma_0}{\sigma_{Ex}} \right] = 259.9 \left[1 - 0.6(1 - 0.6) \frac{259.9}{323.9} \right] = 209.8 MPa$$

Tensão crítica de flambagem na direção y:

$$\sigma_{Cy} = \sigma_{Ey} = 138.0 MPa$$

Tensão crítica de flambagem por cisalhamento:

$$\tau_c = \tau_0 \left[1 - P_r(1 - P_r) \frac{\tau_0}{\tau_E} \right] = 150.1 \left[1 - 0.6(1 - 0.6) \frac{150.1}{513.3} \right] = 139.6 MPa$$

Tensão última na direção x:

$$\beta = \frac{s}{t} \sqrt{\frac{\sigma_0}{E}} = \frac{1100}{22} \sqrt{\frac{325.7}{203200}} = 2.00$$

$$\sigma_0 = \frac{259.9 \times 4400 \times 22.0 + 5 \times 560.2 \times (300 \times 13 + 90 \times 17)}{(4400 \times 22.0) + 5 \times (300 \times 13 + 90 \times 17)} = 325.7 MPa$$

$$E = \frac{203.6 \times 4400 \times 22.0 + 5 \times 201.9 \times (300 \times 13 + 90 \times 17)}{(4400 \times 22.0) + 5 \times (300 \times 13 + 90 \times 17)} = 203.2 GPa$$

$$C_x = 1.00 \text{ para } \beta \leq 0.90$$

$$C_x = 0.94\beta^{-0.55} \text{ para } \beta > 0.90$$

$$C_x = 0.94 \times 2.00^{-0.55} = 0.64$$

$$\sigma_{Ux} = C_x \sigma_0 = 0.64 \times 259.9 = 166.3 MPa \Rightarrow \sigma_{Ux} = \sigma_{Cx} = 209.8 MPa$$

(55)

Tensão última na direção y:

$$\sigma_{Uy} = C_y \sigma_0 = 0.398 \times 259.9 = 103.4 MPa \Rightarrow \sigma_{Uy} = \sigma_{Cy} = 138.0 MPa$$

$$C_y = C_x \frac{s}{l} + 0.1 \left(1 - \frac{s}{l}\right) \left(1 + \frac{1}{\beta^2}\right)^2 = 0.64 \frac{1100}{2200} + 0.1 \left(1 - \frac{1100}{2200}\right) \left(1 + \frac{1}{2.00^2}\right)^2 = 0.398$$

Tensão última por cisalhamento:

$$\tau_U = \tau_c + \frac{0.5(\sigma_0 - \sqrt{3}\tau_c)}{(1 + \alpha + \alpha^2)^{1/2}} = 139.6 + \frac{0.5(259.9 - 139.6\sqrt{3})}{(1 + 2 + 2^2)^{1/2}} = 143.0 MPa$$

Cálculo da resistência última sob estado de tensões combinadas:

$$\left(\frac{\sigma_{x \max}}{\eta \sigma_{Ux}}\right)^2 + \left(\frac{A}{\eta^2}\right) + \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\eta \sigma_{Uy}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\eta \tau_U}\right)^2 \leq 1 \quad (58)$$

$$\left(\frac{133.5}{1.0 \times 209.8}\right)^2 + \left(\frac{0.51}{1.0^2}\right) + \left(\frac{8.5}{1.0 \times 138.0}\right)^2 + \left(\frac{13.3}{1.0 \times 143.0}\right)^2 \leq 1$$

$$0.40 + 0.51 + 0.00 + 0.00 = 0.91 < 1$$

$$A(K) = -2.15K + 0.59 \quad (56)$$

$$K = \left(\frac{\sigma_{x \max}}{\sigma_{Ux}}\right) \left(\frac{\sigma_{y \max}}{\sigma_{Uy}}\right) \quad (57)$$

$$K = \left(\frac{133.5}{209.8}\right) \left(\frac{8.5}{138.0}\right) = 0.039$$

$$A(K) = -2.15 \times 0.039 + 0.59 = 0.51$$

Desta forma, a utilização das equações (55), (56), (57) e (58), propostas neste trabalho, conduz a um resultado de 0.91. Houve uma melhoria significativa na previsão da carga última da placa 6.1.1 do Modelo 19, quando se utilizam as equações propostas neste trabalho de pesquisa, uma vez que as mesmas foram calibradas para painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável austenítico 304.