

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

**ANÁLISE NUMÉRICA NÃO-LINEAR DE PAINÉIS COM ENRIJECEDORES SOB
FLAMBAGEM**

PATRÍCIA BORGES RACKOW

Dissertação apresentada à Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Fundação Universidade do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Mauro de Vasconcellos Real, Dr.

Coorientador: Liércio André Isoldi, Dr.

Rio Grande, julho de 2015.

Página elaborada pela Secretaria da Comissão de Curso

Aos meus pais, Vera e Wilson, e ao meu namorado,
Rodrigo, pelo apoio, incentivo e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Mauro Real, que acreditou em mim, oferecendo-me grandes oportunidades e segue me incentivando a vencer novos desafios, dividindo comigo seu conhecimento com paciência, dedicação, respeito e confiança há mais de quatro anos, desde a minha iniciação científica. Sem a sua experiência para me conduzir, não seria possível o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Vera e Wilson, que me proporcionaram condições de seguir estudando, muitas vezes abdicando de suas vontades e deixando suas vidas um pouco de lado para me ajudarem no que fosse possível. Pais que não apenas me presentearam com a vida, mas com muito amor, compreensão e zelo, fazendo com que eu sentisse cada vez mais orgulho em ser filha deles.

Ao meu namorado, Rodrigo, pela paciência de ouvir meus medos e dificuldades ao longo do curso, sempre me aconselhando, me encorajando, me tranquilizando e acreditando em mim mais que eu mesma. Sua companhia, amor, amizade e compreensão foram essenciais no meu amadurecimento, fazendo com que eu me sentisse mais forte e esperançosa para encarar meus problemas.

Ao meu coorientador, Prof. Liércio, que, em especial na fase de conclusão deste trabalho, demonstrou grande dedicação, empenhando-se em melhorar ao máximo esta dissertação.

Aos meus familiares, que muito contribuíram para a formação de meu caráter.

Aos professores desta instituição que tive o prazer de conviver não só na pós-graduação, como também na graduação, os quais tiveram a grandeza de transmitir seus conhecimentos de forma respeitosa, compartilhando sugestões, críticas, amizades e histórias de vida que me engrandeceram de alguma forma.

Aos amigos e colegas que dividiram experiências comigo ao longo do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica.

À Universidade Federal do Rio Grande – FURG, por dar condições para o desenvolvimento desta pesquisa.

A essa energia, que chamamos de Deus, à qual sou grata por simplesmente tudo.

RESUMO

Estruturas navais e offshore são constituídas, basicamente, de painéis enrijecidos. Quando submetidos a carregamentos compressivos, surge a preocupação em relação ao comportamento desses sob flambagem. O fenômeno da flambagem ocorre em componentes estruturais esbeltos que, quando submetidas à compressão axial, após atingida a carga crítica, sofrem uma deflexão transversal. Esses elementos sob flambagem podem perder sua estabilidade sem que o material tenha atingido sua tensão de escoamento. O objetivo do presente trabalho é realizar, através da análise numérica não-linear de painéis enrijecidos, um estudo paramétrico para avaliar o efeito da variação da espessura da chapa, espessura da alma do enrijecedor e espessura do flange do enrijecedor, individualmente e em conjunto, na resistência à flambagem dos mesmos. Para isto, foi considerado um painel base constituído por uma chapa plana e seis reforços longitudinais no formato de ângulo. Este estudo foi feito através de um modelo computacional desenvolvido no software ANSYS®, o qual se baseia no Método dos Elementos Finitos (MEF). Os resultados mostram que o parâmetro cuja variação mais influencia a determinação da resistência à flambagem dos painéis é a espessura da chapa, seguida da espessura da alma do enrijecedor. A variação da espessura do flange do enrijecedor pouco influi no valor da carga última de flambagem. Através dos estudos realizados neste trabalho, concluiu-se que é de extrema importância para o desenvolvimento da indústria naval e offshore o estudo do comportamento de painéis enrijecidos sem negligenciar os efeitos da flambagem, visto que estas peças são a base da estrutura de navios e plataformas.

Palavras-chave: estruturas metálicas, flambagem, Método dos Elementos Finitos, painel enrijecido, análise numérica não-linear.

ABSTRACT

Naval and offshore structures are formed, basically, by stiffened plates. When under compressive loads, there is the concern about the behavior of these plates in relation to buckling. Buckling phenomenon happens in slender structural components that, subjected to axial compression, when a critical load is reached, suddenly suffer a lateral deflection. These elements under buckling may lose its stability before the material has reached its yield stress. The objective of this paper is to carry out, through nonlinear numerical analysis of stiffened panels, a parametric study to evaluate effects of variation in plate thickness, stiffener web thickness and stiffener flange thickness, individually and together, in their buckling strength. To do this, it was considered panel formed by a plate and six longitudinal angled stiffeners. This study was made through a computational model developed in ANSYS® software, which is based on the Finite Element Method (FEM). Results show that the parameter whose variation most influences the ultimate buckling load of the panels is the plate thickness, then the stiffener web thickness. The variation of the stiffener flange thickness almost doesn't affect buckling strength. Through this study, was concluded that it is extremely important to the development of naval and offshore industry to study stiffened panels' behavior without neglecting the effects of buckling, considering that these elements are the basis of ships and platforms' structure.

Keywords: metallic structures, buckling, Finite Element Method, stiffened panel, nonlinear numerical analysis.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	10
LISTA DE ABREVIATURAS	12
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE FIGURAS	14
1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Considerações Iniciais.....	17
1.2. Estado da Arte	22
1.3. Objetivos	26
1.3.1. Objetivo Geral	26
1.3.2. Objetivos Específicos	26
1.4. Organização da Dissertação	26
2. MODELAGEM DE PAINÉIS ENRIJECIDOS.....	28
2.1. Solução Analítica	28
2.2. Método dos Elementos Finitos (MEF).....	30
2.2.1. Escolha do Software de Elementos Finitos	31
2.2.2. Escolha do Elemento	31
2.3. Flambagem de Painéis Enrijecidos	32
2.3.1. Flambagem Linear.....	33
2.3.2. Flambagem Não-Linear	35
3. ANÁLISE COMPUTACIONAL DE PAINÉIS ENRIJECIDOS.....	39
3.1. Geometria	39
3.2. Material	41

3.3.	Procedimentos da Modelagem de Painéis Enrijecidos no ANSYS.....	42
3.3.1.	Introdução	42
3.3.2.	Definição dos Parâmetros	43
3.3.3.	Tipo de Elemento.....	44
3.3.4.	Propriedades do Material no Comportamento Elástico	44
3.3.5.	Criação da Estrutura	45
3.3.6.	Malha de Elementos Finitos	45
3.3.7.	Condições de Contorno e Carregamento	45
3.3.8.	Solução Linear Estática	47
3.3.9.	Atualização da Geometria	49
3.3.10.	Propriedades do Material no Comportamento Plástico	49
3.3.11.	Alterações nas Condições de Contorno e no Carregamento	50
3.3.12.	Solução Não-Linear Estática.....	51
3.4.	Teste de Malha	52
3.5.	Verificação do Modelo Linear	54
3.5.1.	Painel com Um Enrijecedor.....	54
3.5.2.	Painel com Dois Enrijecedores.....	56
3.5.3.	Painel com Vários Enrijecedores.....	58
3.6.	Verificação e Validação do Modelo Não-Linear	61
3.7.	Identificação do Modo de Flambagem.....	65
4.	ESTUDOS PARAMÉTRICOS.....	66
4.1.	Variação da Espessura da Placa (t_p)	66
4.2.	Variação da Espessura da Alma do Reforço (t_w).....	69
4.3.	Variação da Espessura do Flange do Reforço (t_f)	71
4.4.	Combinações dos Parâmetros.....	74
4.5.	Comparação dos Resultados.....	78

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	81
5.1. Conclusões	81
5.2. Sugestões de Trabalhos Futuros	83
 ANEXOS.....	 84
 ANEXO A.1 - VALORES DO FATOR k PARA PAINÉIS ENRIJECIDOS COM UM REFORÇO LONGITUDINAL	 85
ANEXO A.2 - VALORES DO FATOR k PARA PAINÉIS ENRIJECIDOS COM DOIS REFORÇOS LONGITUDINAIS	86
 ANEXO B - SCRIPT DA MODELAGEM DE UM PAINEL ENRIJECIDO NO ANSYS	 87
 ANEXO C	 95
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 111

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da seção transversal do enrijecedor (mm^2)
D	variável que depende das propriedades do material e da espessura da placa (N.mm)
E	Módulo de Elasticidade (N/mm^2)
I	momento de inércia do enrijecedor (mm^4)
R_x	rotação em torno no eixo x (N.mm)
R_y	rotação em torno no eixo y (N.mm)
R_z	rotação em torno no eixo z (N.mm)
U_x	translação no eixo x (mm)
U_y	translação no eixo y (mm)
U_z	translação no eixo z (mm)
$[K]$	matriz de rigidez total
$[K_E]$	matriz de rigidez convencional para pequenas deformações
$[K_G]$	matriz de rigidez geométrica
$\{P\}$	vetor de cargas
$\{P_{cr}\}$	vetor de carga crítica
$\{P_0\}$	vetor de carregamento inicial
$\{U\}$	vetor de deslocamentos total
a	comprimento do painel (mm)
b	distância entre dois enrijecedores consecutivos (mm)
b_p	largura do trecho do painel reforçado (mm)
b_f	largura do flange do reforço (mm)
c	fator para o cálculo de k
d	fator para o cálculo de k
h_w	altura da alma do enrijecedor (mm)
k	fator que depende das proporções da placa e do reforço
r	raio de giração (mm)
t_f	espessura do flange do reforço (mm)
t_p	espessura da placa (mm)
t_w	espessura da alma do enrijecedor (mm)
w_0	imperfeição inicial máxima (mm)

β	fator para o cálculo de k
β_p	razão de esbeltez da placa
γ	fator para o cálculo de k
δ	fator para o cálculo de k
ε	Deformação (mm)
λ_1	menor autovalor
λ_s	razão de esbeltez do enrijecedor
ν	Coeficiente de Poisson
π	constante numérica igual a 3,14159265
σ	tensão (N/mm ²)
σ_{cr}	tensão crítica de flambagem elástica (N/mm ²)
σ_o	tensão de escoamento (N/mm ²)
σ_u	tensão normal última de flambagem inelástica (N/mm ²)

LISTA DE ABREVIATURAS

MEF	Método dos Elementos Finitos
UEPs	Unidades Estacionárias de Produção

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Passos de carga e deslocamentos impostos.....	51
Tabela 3.2	Tamanhos dos elementos do teste de malha.....	53
Tabela 4.1	Efeito da variação da espessura da placa, t_p , no valor da tensão última.....	67
Tabela 4.2	Efeito da variação da espessura da alma do reforço, t_w , no valor da tensão última.....	69
Tabela 4.3	Efeito da variação da espessura do flange do reforço, t_f , no valor da tensão última.....	72
Tabela 4.4	Combinações de parâmetros (Continua).....	74
Tabela 4.4	Combinações de parâmetros (Conclusão).....	75
Tabela 4.5	Tensão última, σ_u , dos casos.....	75
Tabela 4.6	Comparação dos resultados.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Estaleiro Rio Grande (Foto: Ronaldo Bernardi/Agência RBS).....	17
Figura 1.2	Estaleiro Honório Bicalho (Fonte: http://www.pac.gov.br).....	18
Figura 1.3	Imperfeições geométricas iniciais (Amante, 2009).....	19
Figura 1.4	Painéis enrijecidos utilizados em plataformas de extração de petróleo (Foto: Kelly Costa Ribeiro/Acervo Pessoal).....	20
Figura 1.5	Tipos de reforços mais comuns em placas planas.....	20
Figura 1.6	Tipos de flambagem em painéis com enrijecedores (Chujutalli, 2010).....	21
Figura 2.1	Parâmetros geométricos utilizados na solução analítica.....	28
Figura 2.2	Elemento SHELL93 (ANSYS, 1994).....	32
Figura 2.3	Relação não-linear entre tensão e deformação (Adaptado de Bathe, 1982).....	36
Figura 2.4	Incrementos de carga em função do tempo (Adaptado de ANSYS, 1994).....	37
Figura 2.5	Processo iterativo do Método de Newton Raphson (Adaptado de Real, 2000).....	38
Figura 3.1	Projeto de caverna do costado superior de uma plataforma petrolífera.....	39
Figura 3.2	Visão geral do painel estudado.....	40
Figura 3.3	Trecho do painel enrijecido com nomenclatura.....	40
Figura 3.4	Critérios de plastificação.....	42
Figura 3.5	Análise do tipo estrutural no ANSYS.....	43
Figura 3.6	Biblioteca de elementos do ANSYS.....	44
Figura 3.7	Modelo com as condições de contorno e carregamento aplicados.....	46
Figura 3.8	Ativação do armazenamento de tensões iniciais no ANSYS.....	47

Figura 3.9	Estrutura deformada após análise linear.....	48
Figura 3.10	Atualização da geometria no ANSYS.....	49
Figura 3.11	Curva bilinear do material (Adaptado de ANSYS, 1994).....	50
Figura 3.12	Curva multilinear do material (Adaptado de ANSYS, 1994).....	50
Figura 3.13	Processamento da solução não-linear no ANSYS.....	52
Figura 3.14	Curvas “tensão–deformação” do teste de malha.....	53
Figura 3.15	Malha de elementos finitos do painel enrijecido.....	54
Figura 3.16	Geometria do painel com um enrijecedor.....	55
Figura 3.17	Modo de flambagem elástica do painel com um enrijecedor.....	55
Figura 3.18	Geometria do painel com dois enrijecedores.....	56
Figura 3.19	Modo de flambagem elástica do painel com dois enrijecedores.....	57
Figura 3.20	Modo de flambagem elástica da placa.....	58
Figura 3.21	Reprodução do modelo de Stamatelos, Labeas e Tserpes (2010).....	59
Figura 3.22	Trecho do modelo reproduzido de Stamatelos, Labeas e Tserpes (2010).....	59
Figura 3.23	Modo de flambagem elástica do painel com vários enrijecedores.....	60
Figura 3.24	Modo de flambagem elástica do painel na modelagem dos autores...	60
Figura 3.25	Reprodução do modelo reduzido de Chujutalli (2010).....	61
Figura 3.26	Trecho do modelo reduzido de Chujutalli reproduzido.....	62
Figura 3.27	Verificação e validação do modelo numérico não-linear.....	63
Figura 3.28	Modo pós-colapso encontrado por Chujutalli (2010).....	64
Figura 3.29	Distribuição de tensões.....	64
Figura 3.30	Curvas características de “tensão–deformação” dos diferentes modos de falha de painéis enrijecidos (Grondin, Sheikh e Elwi, 2001).....	65
Figura 4.1	Efeito da variação da espessura da placa, t_p , na curva “tensão– deformação” do painel enrijecido.....	67

Figura 4.2	Efeito da variação da espessura da placa, t_p , na tensão última, σ_u	68
Figura 4.3	Efeito da variação da espessura da placa, t_p , na resistência à flambagem.....	68
Figura 4.4	Efeito da variação da espessura da alma do enrijecedor, t_w , na curva “tensão–deformação” do painel enrijecido.....	70
Figura 4.5	Efeito da variação da espessura da alma, t_w , na tensão última, σ_u	70
Figura 4.6	Efeito da variação da espessura da alma, t_w , na resistência à flambagem.....	71
Figura 4.7	Efeito da variação da espessura do flange do enrijecedor, t_f , na curva “tensão–deformação” do painel enrijecido.....	72
Figura 4.8	Efeito da variação da espessura do flange, t_f , na tensão última, σ_u ...	73
Figura 4.9	Efeito da variação da espessura do flange, t_f , na resistência à flambagem.....	73
Figura 4.10	Curvas “tensão–deformação” dos casos com espessura $t_p = 9$ mm.....	76
	Curvas “tensão–deformação” dos casos com espessura $t_p = 13$ mm.....	76
	Curvas “tensão–deformação” dos casos com espessura $t_p = 15$ mm.....	77
Figura 4.7	Curvas “tensão–deformação” dos casos com espessura $t_p = 17$ mm.....	77

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A partir do ano de 2007, a cidade de Rio Grande passou por significativas modificações estruturais, culturais e financeiras. Tal fato se deve à implantação de um novo empreendimento no município, o Polo Naval de Rio Grande. Esta instalação portuária consiste em uma infraestrutura destinada à construção naval e offshore, que tem seu complexo dotado principalmente de dique seco, oficinas estruturais, oficinas de tubulação, cais de atracação, pórtilco de grande capacidade e demais funcionalidades capazes de atender a construção e reforma de plataformas petrolíferas e de navios petroleiros, sendo este conjunto denominado Unidades Estacionárias de Produção (UEPs).

O Polo Naval de Rio Grande é formado por um conjunto de áreas do Porto do Rio Grande, dentre as quais se pode citar o Estaleiro Rio Grande, Figura 1.1, e o Estaleiro Honório Bicalho, Figura 1.2, sendo esse pertencente ao grupo QGI (ex-Quip).



Figura 1.1 – Estaleiro Rio Grande (Foto: Ronaldo Bernardi/Agência RBS)



Figura 1.2 – Estaleiro Honório Bicalho (Fonte: <http://www.pac.gov.br>)

No ano de 2011 foi aberto o processo de licenciamento prévio para a instalação de um estaleiro em São José do Norte, município vizinho de Rio Grande. Desde então, a pequena cidade começou a sentir o impacto da chegada da indústria naval, que se deu de forma mais brusca em abril de 2013, com o efetivo começo das obras.

Estima-se que, até o final de 2015, Rio Grande e São José do Norte terão recebido investimentos no montante de R\$ 14 bilhões e R\$ 300 milhões, respectivamente, no setor naval.

A necessidade da existência de estruturas cada vez mais resistentes recebeu maior destaque no Brasil com a expansão da indústria naval e offshore. As características do projeto de navios e plataformas, tais como dimensões e forma, são determinadas de acordo com o seu tipo de serviço e sua finalidade. As embarcações devem ser projetadas de forma que resistam a todos os carregamentos existentes no ambiente marítimo e suas estruturas possuem características distintas, não encontradas em outros ambientes e indústrias.

Estruturas navais e offshore exigem membros estruturais relativamente esbeltos e capazes de resistir a grandes carregamentos. Sendo assim, a relação resistência/peso torna-se muito importante.

Os painéis são componentes estruturais constituídos por paredes finas com uma elevada relação entre resistência e peso, apresentando vantagens em seu uso devido ao baixo custo de fabricação e à facilidade de construção, dados a partir de processos de corte e soldagem.

O processo de fabricação destes painéis causa imperfeições geométricas iniciais que, de acordo com Amante (2009), são deformações dimensionais permanentes na estrutura e representam um afastamento da superfície real da idealizada em projeto. Estas imperfeições apresentam grande influência na resistência à flambagem dos painéis e, por este motivo, é de extrema importância considerá-las nos cálculos destes elementos. Na Figura 1.3 são exemplificadas imperfeições geométricas de fabricação e montagem.



Figura 1.3 –Imperfeições geométricas iniciais (Amante, 2009)

Devido à esbeltez destas placas, faz-se necessária a utilização de reforços, aumentando sua capacidade de carga.

Os painéis reforçados por enrijecedores, Figura 1.4, são constituídos por chapas e reforços longitudinais, podendo ser ambos de mesmo material ou diferentes, que geralmente são colocados com espaçamento constante entre si e perpendiculares ao bordo do painel, acompanhando a direção dominante da carga.

A Figura 1.5 mostra os tipos de reforços mais utilizados para o enrijecimento de placas planas em estruturas de navios.

Dependendo das solicitações às quais o navio está submetido, os painéis que o compõem podem sofrer tração ou compressão. Tensões de compressão fazem com que estes painéis esbeltos sofram os efeitos da flambagem.

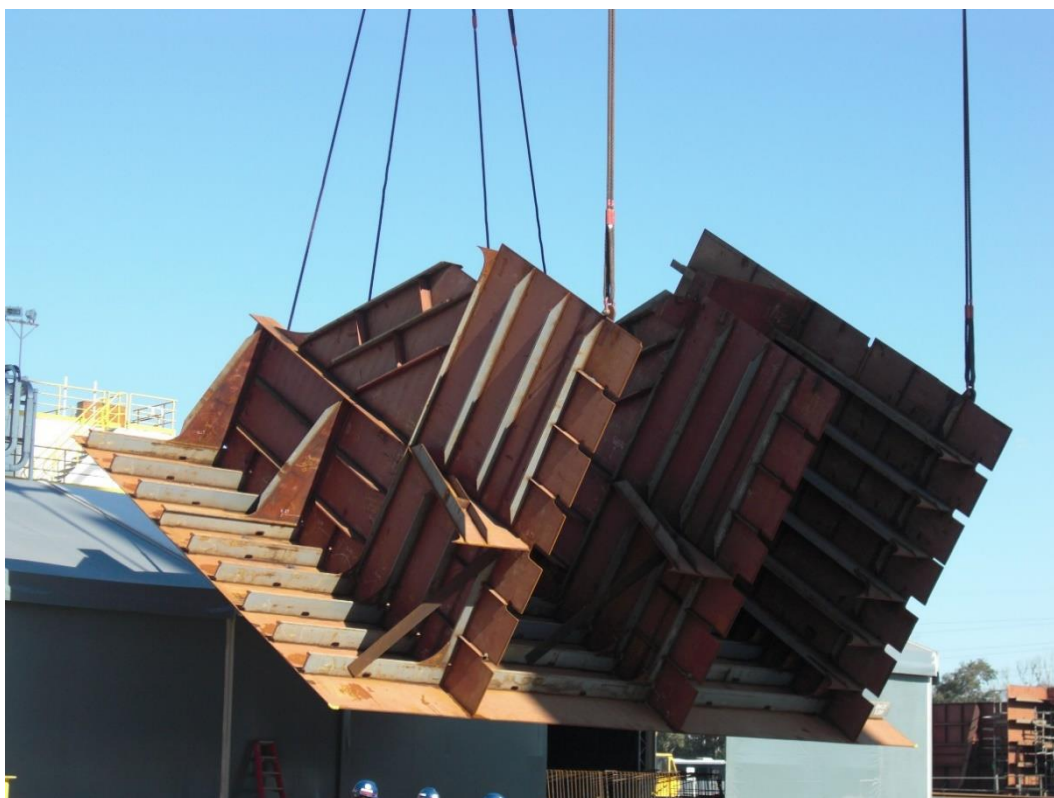


Figura 1.4 – Painéis enrijecidos utilizados em plataformas de extração de petróleo (Foto: Kelly Costa Ribeiro/Acervo Pessoal)

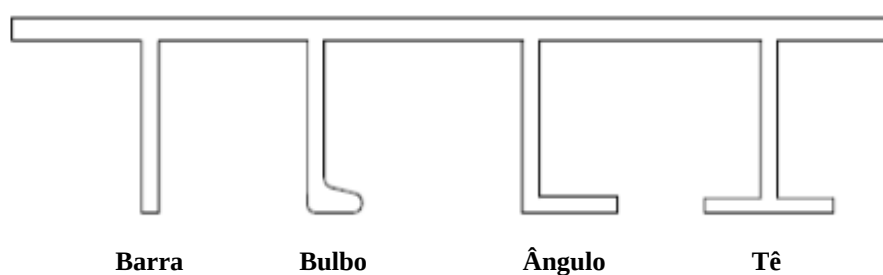


Figura 1.5 – Tipos de reforços mais comuns em placas planas

Segundo Hibbeler (2004), o fenômeno da flambagem ocorre em peças esbeltas que, quando submetidas à flexão transversal devido à compressão axial, sofrem uma deflexão. Timoshenko e Gere (1963) e Chajes (1974) ressaltam que, por se tratarem de elementos bidimensionais, a flambagem em placas envolve flexão em dois planos. Peças sob flambagem podem perder sua

estabilidade sem que o material tenha atingido sua tensão de escoamento, sendo, por isso, considerada uma instabilidade elástica.

Além das cargas de tração e compressão, Chujutalli (2010) cita que existem cargas excêntricas atuando nos painéis enrijecidos, que causam momentos fletores podendo gerar compressão na placa e tração no reforço, ou vice-versa. A diferença de pressões hidrostáticas do navio e o empuxo causam cargas laterais que, por sua vez, também geram momentos fletores.

Painéis com enrijecedores podem falhar, segundo Chujutalli (2010), de acordo com as formas ilustradas na Figura 1.6.

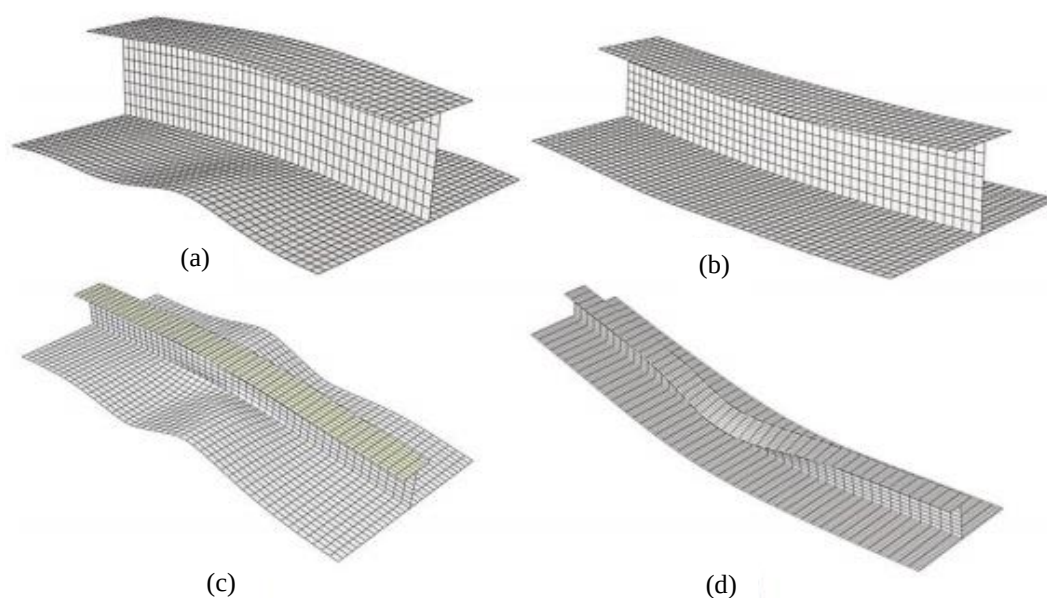


Figura 1.6 – Tipos de flambagem em painéis com enrijecedores (Chujutalli, 2010)

Chujutalli (2010) define os tipos de flambagem como sendo:

a. Flambagem global induzida pela placa: falha simultânea do reforço e da placa, provocada por uma flambagem inicial da placa. Após a falha, o reforço encontra-se no lado convexo da chapa (Figura 1.6.a).

b. Flambagem global induzida pelo reforço: falha simultânea do reforço e da placa, provocada por uma flambagem inicial no reforço. Após a falha, o reforço encontra-se no lado côncavo da chapa (Figura 1.6.b).

c. Flambagem da placa: flambagem local da placa sem afetar os reforços, que permanecem retos, ocasionando uma redistribuição de carga entre os mesmos. Ocorre quando a chapa tem uma tensão crítica inferior à do reforço e/ou o reforço é muito robusto em relação à chapa (Figura 1.6.c).

d. Flambagem torcional dos reforços (*tripping*): rotação do reforço no local onde o mesmo é unido à chapa. É considerado o mais perigoso, uma vez que leva a estrutura a uma queda brusca e repentina da capacidade de carga, devido à falta de rigidez torcional do reforço, o que faz com que apenas a chapa suporte a carga total (Figura 1.6.d).

Chujutalli (2010) ainda ressalta que o primeiro e o segundo modos de falha tratam-se de flambagem global e o terceiro e o quarto modos caracterizam flambagem local.

Não apenas a indústria naval e offshore faz larga utilização de painéis enrijecidos, mas também a indústria aeroespacial, nas asas de aviões e estruturas de lançamento de foguetes. De acordo com Srivastava, Pandey e Kumar (2013), esses painéis ainda são empregados, em menor escala, em pontes, constituindo seus tabuleiros, lajes em geral, contêineres, vagões etc.

Visando obter uma maior economia de peso sem perder capacidade de carga, surge o interesse na otimização destes painéis.

A prática de reforçar chapas com enrijecedores é muito comum, mas seu dimensionamento é uma tarefa bastante complexa para ser feita analiticamente. Tal complexidade se deve ao fato de que a análise da flambagem desses elementos esbeltos sob grandes carregamentos axiais envolve uma grande quantidade de parâmetros geométricos. Sendo assim, a simulação numérica torna-se uma importante ferramenta para a análise desses comportamentos estruturais.

Dentre as soluções numéricas existentes, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é o mais indicado em se tratando de painéis enrijecidos. O MEF é amplamente utilizado nas análises estruturais em geral, dada sua capacidade de resolver problemas com geometrias, carregamentos e condições de contorno complexas (Taysi, 2010).

1.2. Estado da Arte

Em tempos que antecederam a era dos métodos computacionais, alguns autores dedicaram-se à busca por soluções analíticas. A primeira solução de análise de placas planas foi

apresentada por Saint-Venant (1883), e teve início na observação do comportamento das mesmas em embarcações. Alguns anos depois, Bryan (1891) propôs a primeira solução de equação diferencial para placas, através da análise da tensão crítica elástica de um elemento retangular apoiado em suas quatro bordas submetido a uma tensão de compressão uniforme no sentido longitudinal.

Um dos autores mais clássicos, Chajes (1974), ressalta as diferenças entre a flambagem de colunas e de placas. Colunas sob flambagem não são mais capazes de resistir à carga axial e, portanto, a carga crítica é igual à carga de ruptura do membro. Para placas, esta teoria não é aplicável. Estes elementos, mesmo após terem atingido sua carga crítica, podem continuar resistindo a um aumento de carga axial sem apresentar falhas, até que esta seja consideravelmente maior que sua carga crítica. Desta forma, a carga crítica não é igual à carga de ruptura.

Além de apresentar a solução analítica para a carga crítica de placas através dos métodos de energia, Galerkin, diferenças finitas e elementos finitos, ele realizou a análise do comportamento pós-flambagem de placas comprimidas axialmente e chegou às seguintes conclusões:

1. Placas possuem resistência pós-flambagem, a qual permite o aumento de carga após atingir o valor crítico.
2. As tensões de tração transversais que surgem após o início da deformação das placas são o principal fator responsável pela resistência pós-flambagem.
3. As áreas próximas às bordas longitudinais das placas resistem à maior parte do aumento de carga que ocorre na fase pós-flambagem.

Timoshenko e Gere (1963) e Bares (1981) desenvolveram analiticamente soluções para o cálculo de painéis enrijecidos. Assim, apresentaram seus resultados em forma de equações e tabelas, considerando diferentes condições de contorno, carregamento e número de reforços.

Atualmente, diversos pesquisadores realizam trabalhos referentes a painéis com enrijecedores. As obras clássicas, que apresentam soluções analíticas, são consultadas até hoje para o desenvolvimento de testes, experimentos e modelagens computacionais.

Paik, Thayamballi e Kim (2001) desenvolveram formulações mais avançadas e sofisticadas para a determinação de carga crítica em painéis de navios que as, até então, existentes. Para isto, foram consideradas combinações entre quatro tipos de carregamentos, que são eles:

compressão/tração longitudinal, compressão/tração transversal, cisalhamento nas bordas e pressão lateral. Nestas formulações, considerou-se a influência das imperfeições iniciais que surgem no processo de solda e resultam em deflexões iniciais e tensões residuais. Sabendo que uma única equação não é capaz de representar o estado limite último em todas as combinações possíveis, os autores apresentaram três conjuntos de formulações para o cálculo da carga última de placas, que são combinações das equações individuais para cada tipo de carregamento. Para a validação do estudo, foi feita uma comparação dos resultados obtidos analiticamente com a solução não-linear gerada pelo MEF.

Com o intuito de realizar a verificação e a validação de modelos numéricos, muitos pesquisadores buscaram comparar seus resultados com os obtidos de forma experimental.

Wang, Grondin e Elwi (2006) investigaram experimentalmente e numericamente o comportamento de quatro painéis enrijecidos longitudinalmente, com reforços do tipo T, em escala real. O objetivo destas análises era observar a flambagem considerando diferentes excentricidades de carga, imperfeições iniciais e tensões residuais. Após os testes, os autores concluíram que a análise numérica era capaz de prever satisfatoriamente a capacidade de carga e os modos de falha dos modelos estudados.

Choi et al. (2009) realizaram um estudo experimental a fim de validar equações propostas para determinar a menor rigidez requerida em enrijecedores para reforçar longitudinalmente placas comprimidas. Foram modeladas experimentalmente nove placas enrijecidas e testadas aplicando-se sua carga última. Os resultados mostraram uma significativa correlação com as equações propostas.

Kumar et al. (2009) conduziu testes experimentais em seis painéis enrijecidos. Foram utilizados macacos hidráulicos e balões infláveis com mecanismos de controle de carga, capazes de aplicar cargas axiais e laterais sobre as amostras. Estes painéis também foram analisados pelo MEF, através de modelagens no software ANSYS, que permitiu considerar as não-linearidades geométricas e do material. Os resultados obtidos a partir do MEF foram bastante similares aos observados nos testes.

Chujutalli (2010) analisou a influência da flambagem torcional dos reforços de painéis, chamada de *tripping*, no comportamento estrutural de uma seção média de um navio tanque. Para tal, realizou um estudo paramétrico para diferentes relações geométricas dos enrijecedores, variando-se individualmente as espessuras da chapa, da alma e do flange dos reforços. A modelagem numérica pelo MEF considerou as não linearidades da geometria e do material e

incorporou as imperfeições geométricas iniciais. Com o objetivo de ajustar o modelo numérico para utilização em simulações na seção média do navio, foi feita uma correlação numérico-experimental com modelos reduzidos.

Stamatelos, Labeas e Tserpes (2010) apresentaram uma metodologia para a avaliação analítica do comportamento durante a flambagem e pós-flambagem de painéis enrijecidos de material isotrópico e ortotrópico. A abordagem considerou o trecho do painel localizado entre dois enrijecedores, substituindo os segmentos restantes por apoios elásticos, que representam condições de contorno equivalentes à da estrutura em sua forma integral. Através da comparação dos resultados encontrados com os obtidos pelo MEF, pôde-se concluir que a metodologia leva a soluções satisfatórias tanto no comportamento durante a flambagem quanto no comportamento pós-flambagem.

Kwon e Park (2011) descreveram uma série de ensaios de compressão realizados em painéis enrijecidos longitudinalmente, levando-os à ruptura. A resistência à flambagem foi investigada, além de experimentalmente, também teoricamente. Os testes mostraram que o modo de falha dos painéis depende, principalmente, da rigidez dos reforços. Através do experimento, foram feitas adaptações nas curvas teóricas, levando a resultados mais próximos da realidade.

Real e Isoldi (2011) estudaram o comportamento de placas com furos, através do MEF. No estudo em questão, foi investigado o efeito da dimensão do furo e a localização da flambagem elástica de placas retangulares quando submetidas a cargas de compressão uniaxial uniforme.

Baptista (2014) analisou o comportamento pós-flambagem de placas de aço quadradas e retangulares, sem furos e com furos circulares centrados, sob compressão uniaxial em estruturas navais e offshore.

Sentano (2014) analisou 300 modelos de placas com furos circulares, quadrangulares e losangulares sob compressão uniaxial em estruturas navais e oceânicas. Na análise elástica, foi observado que o modo de flambagem varia de acordo com a relação entre comprimento e largura da placa. Na análise inelástica, foi possível verificar que a resistência última da placa não sofre influência significativa com a variação dessa relação. Ambas análises mostraram que a geometria do furo não apresenta influência significativa na resistência da placa.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar, através de análise numérica não-linear, a variação da carga última de flambagem de painéis reforçados, concluindo qual combinação de parâmetros leva ao melhor comportamento estrutural.

1.3.2. Objetivos Específicos

Para atingir a meta proposta, é preciso desenvolver os seguintes objetivos:

- Realizar a simulação numérica de painéis de aço enrijecidos, utilizando um modelo computacional baseado no MEF, capaz de considerar as não-linearidades geométricas e do material.
- Verificar e validar o modelo proposto, modelando painéis analisados anteriormente por outros autores e comparando os resultados obtidos.
- Elaborar estudos paramétricos, a partir de um modelo padrão, variando individualmente as espessuras dos componentes do painel enrijecido. Identificando, desta forma, a influência de cada parâmetro na carga de flambagem. Os parâmetros investigados foram: espessura da placa, espessura da alma do enrijecedor e espessura do flange do enrijecedor.

1.4. Organização da Dissertação

O presente trabalho é dividido em cinco capítulos.

No capítulo 1, uma introdução sobre o assunto abordado no trabalho foi feita.

No capítulo 2 é feita uma descrição do MEF, de sua aplicação no programa ANSYS e do modelo escolhido a ser usado nele, bem como as devidas justificativas. Também há uma breve apresentação das soluções analíticas antigamente usadas para o problema de painéis enrijecidos. Ainda neste capítulo, são exibidas as diferenças entre as flambagens linear e não-linear e seus métodos de solução.

No capítulo 3 é apresentado o painel base estudado, suas propriedades geométricas, as características do material constituinte e é feita a descrição dos procedimentos de modelagem no software ANSYS. No mesmo capítulo, também é mostrado o teste de malha, a verificação e a validação feita para o modelo de análise de flambagem linear e não-linear.

No capítulo 4 são apresentados estudos a fim de avaliar o efeito da variação de cada parâmetro na resistência à flambagem e também são realizadas combinações destes parâmetros com o objetivo de melhorar esta resistência última de painéis enrijecidos.

No capítulo 5, apresentam-se as conclusões do presente estudo e sugestões a serem desenvolvidas em trabalhos futuros.

2. MODELAGEM DE PAINÉIS ENRIJECIDOS

2.1. Solução Analítica

Autores como Timoshenko e Gere (1963) e Bares (1981) apresentam equações e tabelas, de acordo com as condições de contorno, carregamento e número de reforços, as quais permitem a solução analítica de painéis enrijecidos.

Timoshenko e Gere (1963) propõem soluções simplificadas para os casos de placas simplesmente apoiadas com um reforço longitudinal central e com dois reforços longitudinais equidistantes e apresenta uma solução geral para o caso de mais de dois enrijecedores equidistantes.

Os parâmetros geométricos utilizados nas equações propostas por Timoshenko e Gere (1963) são ilustrados na Figura 2.1.

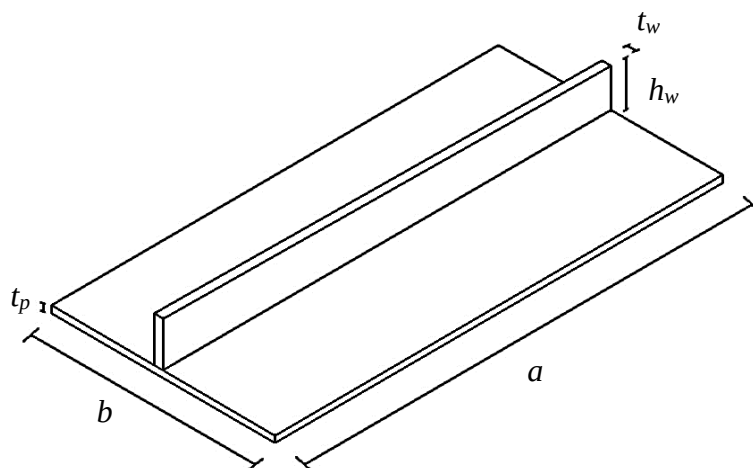


Figura 2.1 – Parâmetros geométricos utilizados na solução analítica

A equação (2.1) exhibe a solução analítica dos autores para a tensão crítica de uma placa retangular simplesmente apoiada com um reforço longitudinal:

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 D}{b^2 t_p} \quad (2.1)$$

Na equação (2.1), σ_{cr} é a tensão crítica, k é um fator que depende das proporções da placa e do reforço, π é a constante numérica igual a 3,14159265, b é a distância entre dois enrijecedores consecutivos, t_p é a espessura da placa e D é uma variável que depende das propriedades do material e da espessura da placa, conforme a equação (2.2):

$$D = \frac{t_p^3 E}{12(1 - \nu^2)} \quad (2.2)$$

Na equação (2.2), E é o módulo de elasticidade do material e ν é o coeficiente de Poisson.

Para determinar o fator k , faz-se necessário calcular as seguintes variáveis:

$$\beta = \frac{a}{b} \quad (2.3)$$

$$\delta = \frac{t_w h_w}{b t_p} \quad (2.4)$$

$$\gamma = \frac{EI}{bD} \quad (2.5)$$

Nas expressões (2.3), (2.4) e (2.5), a é o comprimento do painel, t_w é a espessura da alma do enrijecedor, h_w é a altura da alma do enrijecedor e I é o momento de inércia do enrijecedor.

Por fim, devem ser calculados os parâmetros c e d , conforme as equações (2.6) e (2.7):

$$c = (1 + \beta^2)^2 + 2\gamma \quad (2.6)$$

$$d = (1 + 9\beta^2)^2 + 2\gamma \quad (2.7)$$

O valor de k pode ser calculado através da seguinte equação de segundo grau:

$$(k\beta^2)^2(1 + 4\delta) - k\beta^2[(1 + 2\delta)(c + d) - 8\gamma\delta] + cd - 4\gamma^2 = 0 \quad (2.8)$$

Quando os valores de β , δ e γ estão dentro dos limites da tabela de valores para k , este parâmetro pode ser encontrado de forma mais rápida e fácil através do Anexo A.1.

Já a solução analítica proposta por Timoshenko e Gere (1963) para a tensão crítica de uma placa retangular simplesmente apoiada com dois ou mais reforços longitudinais equidistantes é exibida na equação (2.9).

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 D}{b^2 t_p} \frac{(1 + \beta^2)^2 + 3\gamma}{\beta^2(1 + 3\delta)} \quad (2.9)$$

Para o caso com dois enrijecedores, os valores de k podem ser extraídos através do Anexo A.2. Para o caso de mais de dois enrijecedores, o valor de k deve ser calculado de acordo com a equação (2.8).

2.2. Método dos Elementos Finitos (MEF)

Antigamente, o Método das Diferenças Finitas era muito usado na análise de flambagem. Hoje, o Método dos Elementos Finitos (MEF) não-linear é considerado o modo mais indicado para avaliar o comportamento estrutural de placas e de estruturas em geral. A modelagem computacional de painéis em programas de elementos finitos é capaz de gerar respostas significativamente mais verossímeis quando comparadas às obtidas através de soluções analíticas.

O MEF é uma solução numérica amplamente utilizada nas análises estruturais em geral, dada sua capacidade de resolver problemas com geometrias, carregamentos e condições de contorno complexas. Através dele, são geradas soluções aproximadas para diversos problemas em análises de engenharia com uma considerável precisão. Maiores informações a respeito do

MEF podem ser encontradas em Bathe (1982), Zienkiewicz e Taylor (1989 e 1991) e Przemieniecki (2009).

O método consiste em dividir uma estrutura contínua em pequenas regiões chamadas de elementos finitos. Esses elementos são interconectados entre si, através de nós localizados em seus limites, e o comportamento de cada um deles é determinado de forma que a malha formada pelo conjunto se comporte de forma semelhante ao contínuo original.

Para determinar os deslocamentos nodais, existe uma série de equações algébricas de equilíbrio, formando um sistema de equações equivalente à malha utilizada. A solução pode ser obtida aplicando-se condições de contorno externas.

Os deslocamentos no interior do elemento são obtidos por interpolações dos deslocamentos nodais. As deformações são obtidas através das relações deformação-deslocamento do problema. As tensões em um ponto são calculadas a partir das deformações, empregando-se a equação constitutiva do material.

2.2.1. Escolha do Software de Elementos Finitos

O software escolhido para ser utilizado neste estudo é o ANSYS Mechanical[®], o qual responde satisfatoriamente não apenas às modelagens de problemas lineares, mas também às de estruturas não-lineares.

2.2.2. Escolha do Elemento

O ANSYS possui uma base de dados com vários tipos de elementos indicados para diferentes tipos de análises. O elemento finito escolhido para as análises do presente trabalho é o SHELL93, mostrado na Figura 2.2, um elemento casca estrutural 3-D de oito nós, os quais podem ser definidos no espaço.

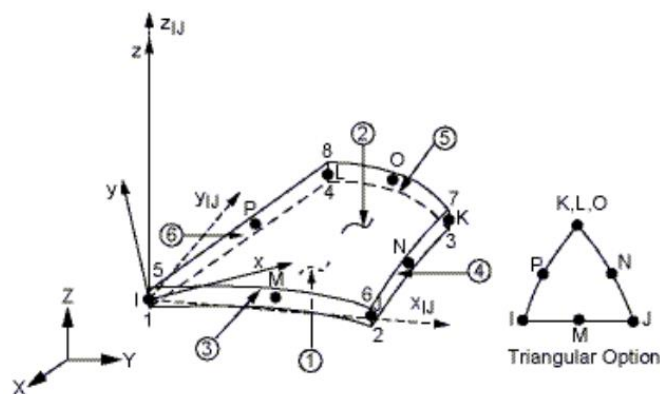


Figura 2.2 – Elemento SHELL93 (Ansys, 1994)

A escolha do uso do SHELL93, justificada por Rocha et al. (2012), Rocha et al. (2013), Isoldi et al. (2013a) e Isoldi et al. (2013b), deve-se ao fato deste elemento ser indicado para modelar superfícies do tipo casca e à vantagem do uso de oito nós, que fornece resultados mais precisos em um tempo razoável.

Este elemento possui seis graus de liberdade em cada nó, que são: translações nas direções x , y e z , e rotações em torno dos eixos x , y e z .

2.3. Flambagem de Painéis Enrijecidos

Placas de aço possuem diversas aplicações e, diferentemente de vigas e colunas, que têm o comprimento consideravelmente maior que suas demais dimensões, estas apresentam largura e comprimento de mesma grandeza e pequena espessura. Por este motivo, vigas e colunas são modeladas como membros lineares e, placas, como membros bidimensionais. Ao contrário de vigas e colunas, placas podem resistir a um aumento de carga axial sem apresentar falha, ainda que o valor deste carregamento supere a carga crítica do membro. Sendo assim, as tensões no regime pós-flambagem, especialmente no caso de placas finas, podem ser substancialmente maiores do que a tensão crítica correspondente à flambagem (Chajes, 1974).

A flambagem gera uma mudança repentina na forma de membros estruturais esbeltos, que se dá devido ao surgimento de grandes deslocamentos decorrentes de variações no

carregamento. Além desta alteração de configuração, a flambagem também leva a uma queda brusca na rigidez de uma peça comprimida (Timoshenko e Gere, 1963).

Navios e plataformas são feitos de painéis enrijecidos, que são placas reforçadas longitudinalmente. É de extrema importância o conhecimento da tensão de flambagem de cada painel, visto que são eles que determinam a resistência da estrutura do navio/plataforma como um todo. Desta forma, o comportamento pós-flambagem propicia uma reserva na resistência após a flambagem inicial, quando surgem os primeiros deslocamentos na estrutura.

2.3.1. Flambagem Linear

O modelo matemático do comportamento de cada material, o qual descreve a relação entre tensão e deformação, é formado a partir de equações constitutivas. Estas equações são lineares com parâmetros constantes, feitas para materiais ideais, os quais apresentam apenas as principais características reais e relevantes para o estudo visado. Admite-se que tais materiais trabalham em regime elástico-linear, onde as tensões variam proporcionalmente com as deformações e as deformações são totalmente reversíveis.

O comportamento linear dos materiais pode ser descrito descrito pela Lei de Hooke, considerando, por simplificação, um estado unidimensional de tensões. Esta lei estabelece a relação entre tensão e deformação, de acordo com a equação (2.11), é apresentada por Hibbeler (2004).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.11)$$

Na expressão (2.11), σ é a tensão, E é o módulo de elasticidade (também chamado de módulo de Young) e ε é a deformação.

No entanto, esta simplificação de comportamento nem sempre se torna possível. Alguns projetos de estruturas metálicas, por exemplo, baseiam-se no Estado Limite Último, quando, conforme Hibbeler (2004), o material não apresenta mais um comportamento elástico-linear, já que as deformações presentes neste estado são irreversíveis.

No MEF, a flambagem linear é representada por um problema de autovalores e autovetores. Segundo Madenci e Guven (2006), essa análise envolve a solução de um conjunto de equações algébricas homogêneas cujo menor autovalor corresponde à carga crítica de flambagem e o autovetor associado representa o modo primário de flambagem.

De acordo com Przemieniecki (2009), a matriz de rigidez total, $[K]$, é obtida através da soma da matriz de rigidez convencional para pequenas deformações, $[K_E]$, com a matriz de rigidez geométrica, $[K_G]$, que não depende apenas da geometria, mas também do esforço interno existente no início do carregamento, $\{P_0\}$. Desta forma, a matriz de rigidez total de uma placa para um nível de carga $\{P_0\}$ é dada por:

$$[K] = [K_E] + [K_G] \quad (2.12)$$

Na expressão (2.12), $[K]$ é a matriz de rigidez global; $[K_E]$ é a matriz de rigidez convencional para pequenas deformações e $[K_G]$ é a matriz de rigidez geométrica.

Quando a carga atinge o nível de $\{P\} = \lambda\{P_0\}$, onde λ é um escalar, a matriz de rigidez pode ser definida como:

$$[K] = [K_E] + \lambda[K_G] \quad (2.13)$$

Assim, as equações de equilíbrio governantes para o comportamento da placa podem ser escritas como:

$$[[K_E] + \lambda[K_G]]\{U\} = \lambda\{P_0\} \quad (2.14)$$

Na expressão (2.14), $\{U\}$ é o vetor de deslocamentos total, que pode ser determinado pela expressão (2.15):

$$\{U\} = [[K_E] + \lambda[K_G]]^{-1} \lambda\{P_0\} \quad (2.15)$$

Sob flambagem, a placa apresenta um grande crescimento nos seus deslocamentos sem aumento de carga. Da definição matemática de matriz inversa como sendo a matriz adjunta

dividida pelo determinante dos coeficientes, é possível notar que os deslocamentos, $\{U\}$, tendem ao infinito quando:

$$\det[[K_E] + \lambda[K_G]] = 0 \quad (2.16)$$

A equação (2.16) representa um problema de autovalores, cuja solução gera o menor autovalor, que corresponde à carga crítica em que ocorre flambagem:

$$\{P_{cr}\} = \lambda_1 \{P_0\} \quad (2.17)$$

Na expressão (2.17), $\{P_{cr}\}$ é a carga crítica e λ_1 corresponde ao menor autovalor gerado.

Além disso, o vetor de deslocamento escalar associado, $\{U\}$, define o formato do membro na flambagem. No ANSYS, o problema de autovalor é resolvido usando o método numérico de Lanczos.

2.3.2. Flambagem Não-Linear

A análise não-linear de uma estrutura se torna necessária quando a carga sobre a mesma provoca significativas alterações em sua rigidez. Este tipo de análise envolve dois fatores: a não-linearidade física, associada ao material que a compõe, e a não-linearidade geométrica.

A não-linearidade física ocorre, segundo Bathe (1982), quando, em um ponto qualquer da estrutura, a relação entre tensão e deformação não segue uma linearidade, conforme a Figura 2.3. Sendo assim, esta não-linearidade está associada às propriedades do material componente da estrutura.

Grande parte dos metais apresentam, para valores pequenos de deformação, uma relação linear entre tensão e deformação, apresentando um comportamento elástico. Porém, é comum que estes materiais, em suas aplicações, sofram altas deformações e, com isso, ocorre o escoamento. Segundo Hibbeler (2004), a partir deste ponto, que representa o limite para o comportamento elástico do material, a relação entre tensão e deformação torna-se não-linear e

irreversível. Este comportamento, a partir do ponto de escoamento, representa o regime plástico.

Ou seja, até atingir o ponto de escoamento, caso o material sofra um descarregamento, o elemento retorna à sua configuração original sem deformações. Porém, quando é atingida uma tensão superior ao valor de escoamento, o material sofre deformações permanentes e é incapaz de retornar à sua forma inicial caso o carregamento seja desfeito. A deformação permanente após o descarregamento pode ser determinada traçando-se uma reta paralela à que descreve o comportamento elástico.

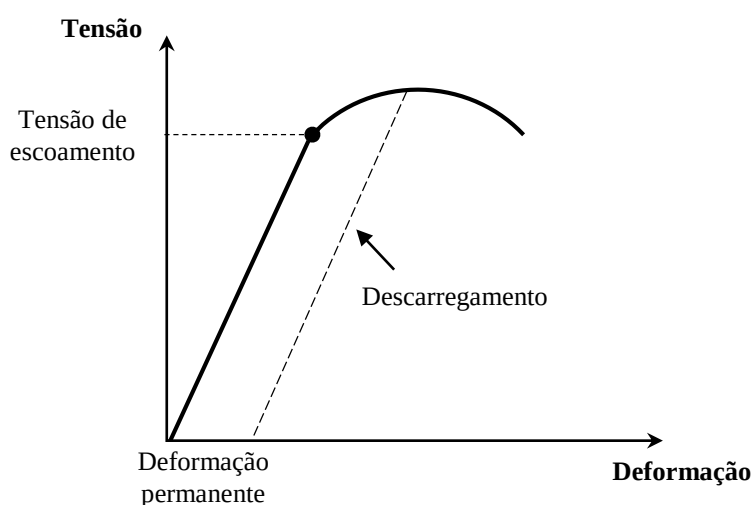


Figura 2.3 – Relação não-linear entre tensão e deformação (Adaptado de Bathe, 1982)

A não-linearidade geométrica surge no instante em que é aplicado o primeiro incremento de carga à estrutura. Kumar et al. (2010) afirmam que esta não-linearidade está diretamente associada às dimensões da estrutura, às suas condições de apoio e ao carregamento a que a mesma está submetida. De modo simples, pode-se dizer que os efeitos devidos à não-linearidade geométrica são aqueles oriundos da mudança de posição da estrutura no espaço.

Na prática, uma análise não-linear é realizada computacionalmente de modo incremental. Isto significa que em cada passo do processo incremental é feita uma análise linear.

O método utilizado pelo ANSYS para análises estáticas não-lineares é o Método de Newton-Raphson, cuja solução é do tipo iterativa/incremental. Este é um dos métodos mais eficazes e, por isso, também um dos mais utilizados para problemas de cascas.

Neste método, as condições de contorno e as cargas externas são aplicadas através de um ou mais passos de carga no ANSYS, procedimento que ocorre tanto nas análises lineares quanto nas não-lineares (ANSYS, 1994).

O ANSYS permite que se aplique a carga gradativamente e, em cada incremento de carga, o programa executa iterações de equilíbrio, até que a carga seja aplicada à estrutura em sua totalidade. Estes incrementos de carga são chamados de sub-passos. Nas análises lineares, existe apenas um sub-passo, que representa a carga total, e não há a necessidade da realização de iteração de equilíbrio (ANSYS, 1994).

Cada passo de carga e sub-passo está associado a um valor de tempo, conforme a Figura 2.4. Este tempo, na maioria das análises estáticas não-lineares, é usado simplesmente como um contador, não representando o tempo cronológico real (ANSYS, 1994).

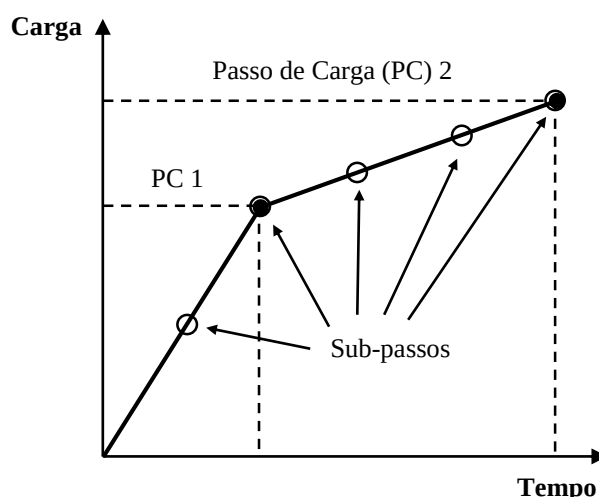


Figura 2.4 – Incrementos de carga em função do tempo (Adaptado de ANSYS, 1994)

Antes de cada solução, o Método de Newton-Raphson avalia o vetor de carga em desequilíbrio, o qual é a diferença entre as forças de restauração (cargas correspondentes às tensões de elementos) e as cargas aplicadas. Em seguida, o ANSYS executa uma solução linear e verifica se ocorreu convergência. Caso, em uma dada iteração, não ocorra convergência, o ANSYS realiza uma nova iteração com a tentativa de equilibrar as forças internas e externas (ANSYS, 1994).

Segundo Real (2000), este processo iterativo, ilustrado na Figura 2.5, é continuado até que o critério de convergência adotado seja satisfeito.

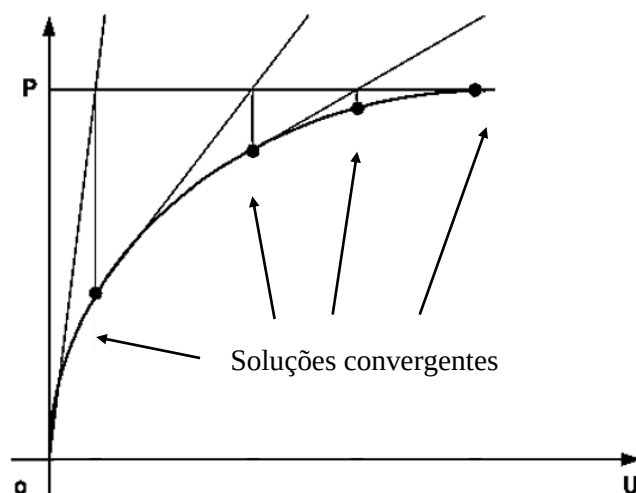


Figura 2.5 – Processo iterativo do Método de Newton-Raphson (Adaptado de Real, 2000)

Em uma análise não-linear, para cada iteração, o programa forma uma matriz de rigidez e resolve o sistema de equações. Sendo assim, Junior (2009) ressalta que o custo computacional para resolver cada iteração de um problema não-linear é semelhante a uma solução linear completa, ou seja, o gasto computacional de análises não-lineares é significativamente maior que o de análises lineares.

No caso do presente estudo, por exemplo, a solução linear é dada de forma instantânea pelo software, enquanto que a solução não-linear leva entre 20 e 30 minutos para gerar resultados, variando de acordo com as configurações do hardware usado.

3. ANÁLISE COMPUTACIONAL DE PAINÉIS ENRIJECIDOS

3.1. Geometria

Conforme dito anteriormente, o objetivo do presente trabalho é avaliar numericamente a influência das variações dos parâmetros geométricos de um painel enrijecido na determinação da carga última de flambagem do mesmo. Para aproximar este estudo da realidade da indústria naval e offshore, optou-se por modelar um painel existente e utilizado na montagem de plataformas de extração de petróleo.

O painel a ser apresentado, o qual foi tido como base para os estudos do presente trabalho, é pertencente a uma caverna do costado superior de uma plataforma petrolífera, exibida na Figura 3.1. Segundo Fonseca (2005), as cavernas são peças que se fixam na quilha perpendicularmente, servindo para dar forma ao casco e sustentar o chapeamento exterior.

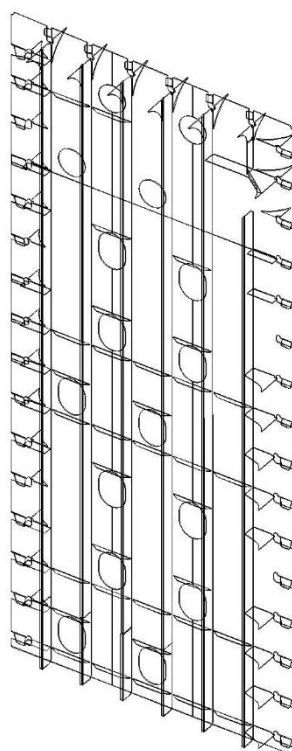


Figura 3.1 – Projeto de caverna do costado superior de uma plataforma petrolífera

O painel base deste estudo é composto por uma chapa plana com seis enrijecedores longitudinais do tipo ângulo, vide Figura 3.2.

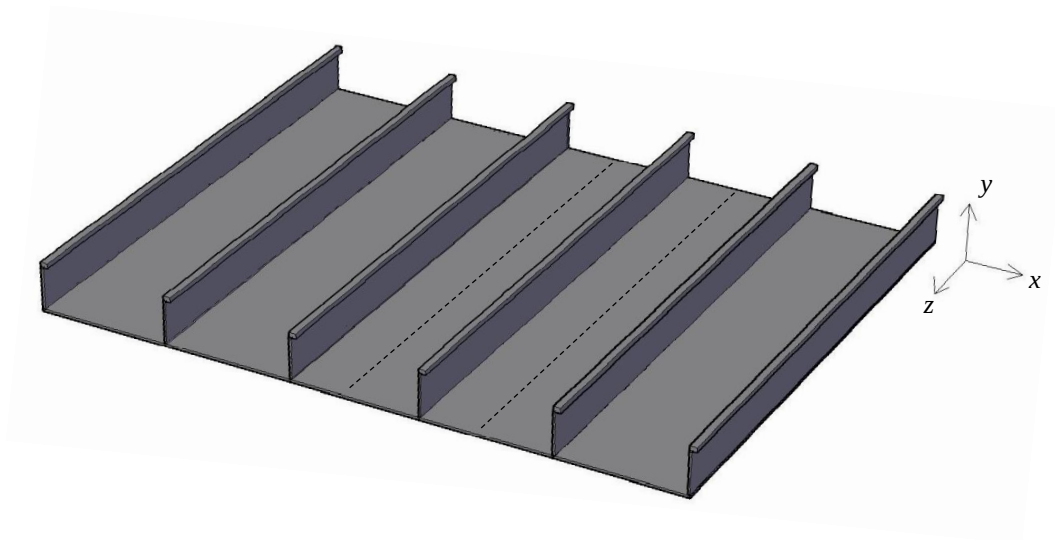


Figura 3.2 – Visão geral do painel estudado

Para facilitar a modelagem, as dimensões e os parâmetros geométricos do painel estudado serão apresentados para um trecho de placa enrijecida, referente à região entre as linhas tracejadas na Figura 3.2, composto pelo reforço do tipo ângulo e sua sucessiva porção de chapa plana, ilustrado na Figura 3.3.

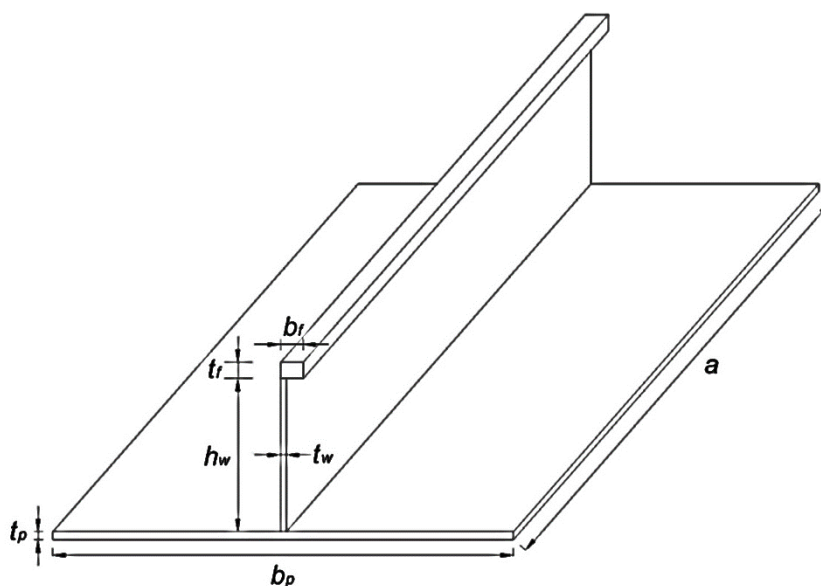


Figura 3.3 – Trecho do painel enrijecido com nomenclatura

Também na Figura 3.3, pode-se observar a nomenclatura apresentada a seguir:

a : comprimento do painel reforçado

b_p : largura do trecho do painel reforçado (o mesmo que espaçamento entre reforços)

t_p : espessura da placa

h_w : altura da alma do reforço

t_w : espessura da alma do reforço

b_f : largura do flange do reforço

t_f : espessura do flange do reforço

O painel real, tido como base para a variação paramétrica, possui as seguintes dimensões e parâmetros geométricos:

$$a = 3600 \text{ mm}$$

$$b_p = 900 \text{ mm}$$

$$t_p = 15 \text{ mm}$$

$$h_w = 300 \text{ mm}$$

$$t_w = 11 \text{ mm}$$

$$b_f = 44 \text{ mm}$$

$$t_f = 32 \text{ mm}$$

3.2. Material

Empregou-se o aço AH-36 nas modelagens, tanto como material constituinte da placa, quanto do reforço. Este aço é comumente utilizado na construção naval e offshore.

Da mesma forma que Baptista (2014) e Sentano (2014), admitiu-se que o aço AH-36 possui módulo de elasticidade (E) igual a 210 GPa, tensão de escoamento (σ_0) com valor de 355 MPa e coeficiente de Poisson (ν) igual 0,30. Neste projeto, assume-se que o aço AH-36 possui comportamento elasto-plástico perfeito. O critério de plastificação adotado é o de von Mises, ilustrado na Figura 3.4.

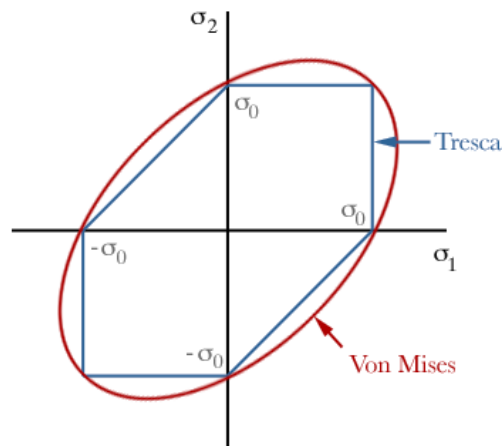


Figura 3.4 – Critérios de plastificação

A inserção das propriedades do material no programa ANSYS, para traçar o comportamento do material, é dividida em duas partes. A primeira refere-se ao comportamento elástico e, nesta etapa, são fornecidos o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Na segunda parte, é necessário fornecer os dados plásticos, que se referem à tensão de escoamento como uma função da deformação plástica, que é nula neste ponto.

3.3. Procedimentos da Modelagem de Painéis Enrijecidos no ANSYS

3.3.1. Introdução

Conforme exposto anteriormente, o software de elementos finitos usado para as análises é o ANSYS. O programa grava todos os comandos na sequência em que foram executados

durante uma sessão em um arquivo de registro do banco de dados. Este arquivo, chamado de LGW, permite que sejam feitas alterações e edições de comandos através de um leitor do tipo Bloco de Notas. Pode-se abrir um arquivo LGW no ANSYS, fazendo com que sejam executados todos os comandos nele contidos, facilitando as análises.

Para que sejam realizadas as modelagens no programa, primeiramente define-se o tipo de análise como estrutural, conforme Figura 3.5.

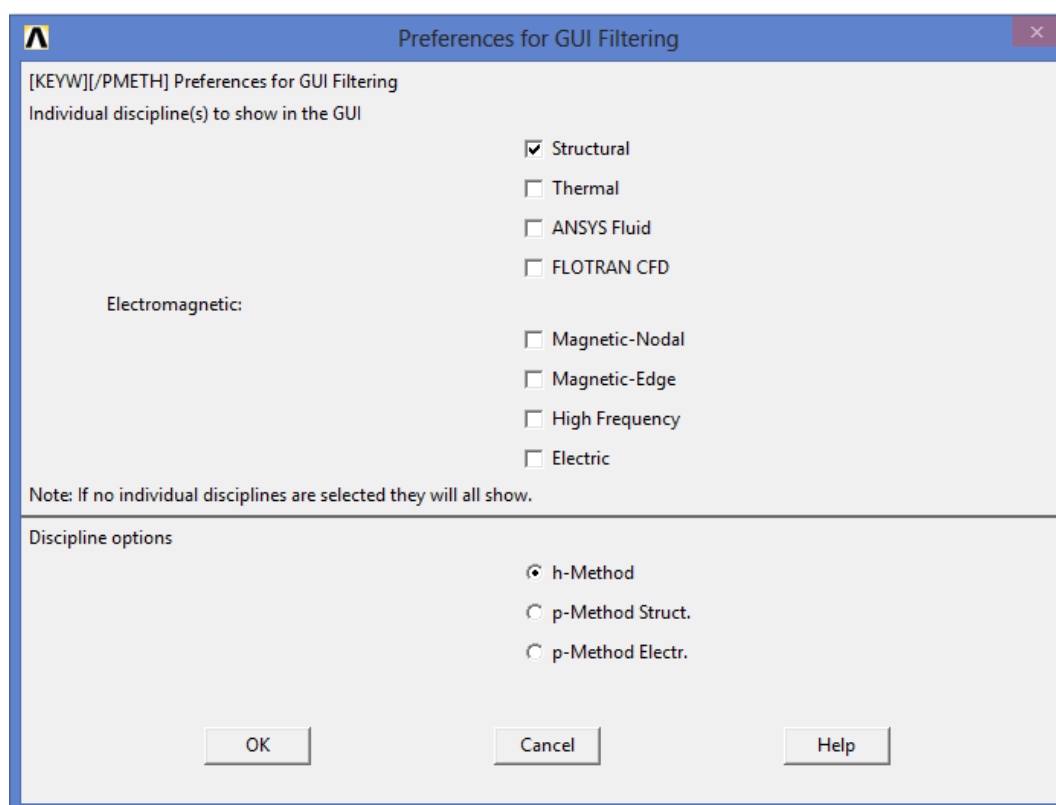


Figura 3.5 – Análise do tipo estrutural no ANSYS

3.3.2. Definição dos Parâmetros

Tendo em vista que os parâmetros sofrem variações ao longo do trabalho, optou-se por parametrizar as informações fornecidas ao programa. Para isto, foram definidos nomes e valores para cada parâmetro, dado geométrico e dado do material. Assim, em vez de fornecer os valores, quando solicitados em cada etapa da modelagem, foram fornecidos os nomes das variáveis.

Quando se fez necessário alterar alguma ou algumas destas variáveis para as análises seguintes, trocaram-se os valores atribuídos para cada uma delas. Esta modificação nos valores pode ser feita facilmente no arquivo LGW.

3.3.3. Tipo de Elemento

Depois de definidos os parâmetros, é a vez de determinar o tipo de elemento adotado que, conforme citado anteriormente, é o elemento finito de casca estrutural 3-D com 8 nós SHELL93, de acordo com a Figura 3.6. Este elemento exige a informação de sua espessura. Como o painel enrijecido apresenta três espessuras diferentes de casca, uma para a placa, uma para a alma do enrijecedor e outra para o flange do enrijecedor, foram inseridos três elementos separados, todos do tipo SHELL93, mas cada um com sua respectiva espessura.

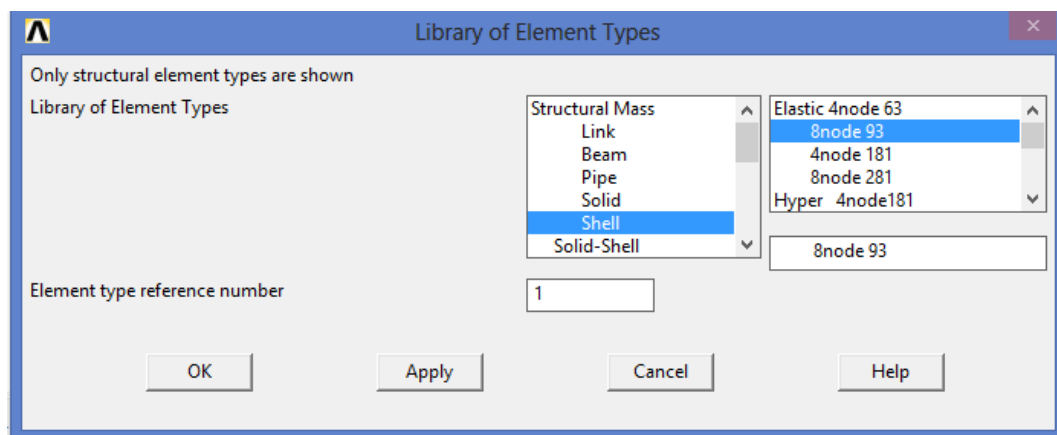


Figura 3.6 – Biblioteca de elementos do ANSYS

3.3.4. Propriedades do Material no Comportamento Elástico

Na sequência, definem-se as propriedades do material utilizado. Para a primeira parte da análise, admite-se que o material apresenta comportamento elástico linear e é isotrópico, ou

seja, possui as mesmas propriedades físicas independente da direção considerada. Nesta etapa são fornecidos o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, que são respectivamente 210 GPa e 0,3.

3.3.5. Criação da Estrutura

A seguir, parte-se para a parte de desenho da estrutura. Na presente modelagem, primeiramente foram inseridos os pontos do perfil do enrijecedor e, logo após, traçadas as linhas que ligam estes pontos. Tendo o desenho do perfil, foi feita a extrusão do mesmo através do comprimento da placa. Esta parte desenhada da estrutura foi copiada cinco vezes, completando, assim, os seis enrijecedores. Logo, foi desenhada a placa unindo os reforços.

3.3.6. Malha de Elementos Finitos

Com a estrutura completamente desenhada, deve-se definir a malha utilizada. O ANSYS permite que seja informado o tamanho do elemento ou a quantidade de elementos. Optou-se por informar o tamanho do elemento que, para cada direção, recebeu um valor diferente.

3.3.7. Condições de Contorno e Carregamento

Os painéis estão, geralmente, apoiados em membros significativamente robustos, que possuem maior rigidez à flexão quando comparada com a rigidez dos painéis. Então, os deslocamentos normais dos membros de apoio na direção das deflexões do painel podem ser

considerados muito pequenos até ser atingida a carga crítica de flambagem. Assim, os apoios são tratados como indeformáveis para as chapas e reforços longitudinais.

Desta forma, em uma das extremidades, os deslocamentos e rotações são restringidos nos seis graus de liberdade ($U_x = U_y = U_z = R_x = R_y = R_z = 0$), sendo considerada completamente engastada. Na extremidade oposta à completamente engastada, são restritos todos deslocamentos e rotações com exceção do deslocamento longitudinal U_z ($U_x = U_y = R_x = R_y = R_z = 0$). Neste bordo com deslocamento longitudinal livre, aplica-se uma pressão unitária tanto na placa, quanto no enrijecedor.

As condições de contorno consideradas na parte linear da análise são apresentadas na Figura 3.7.

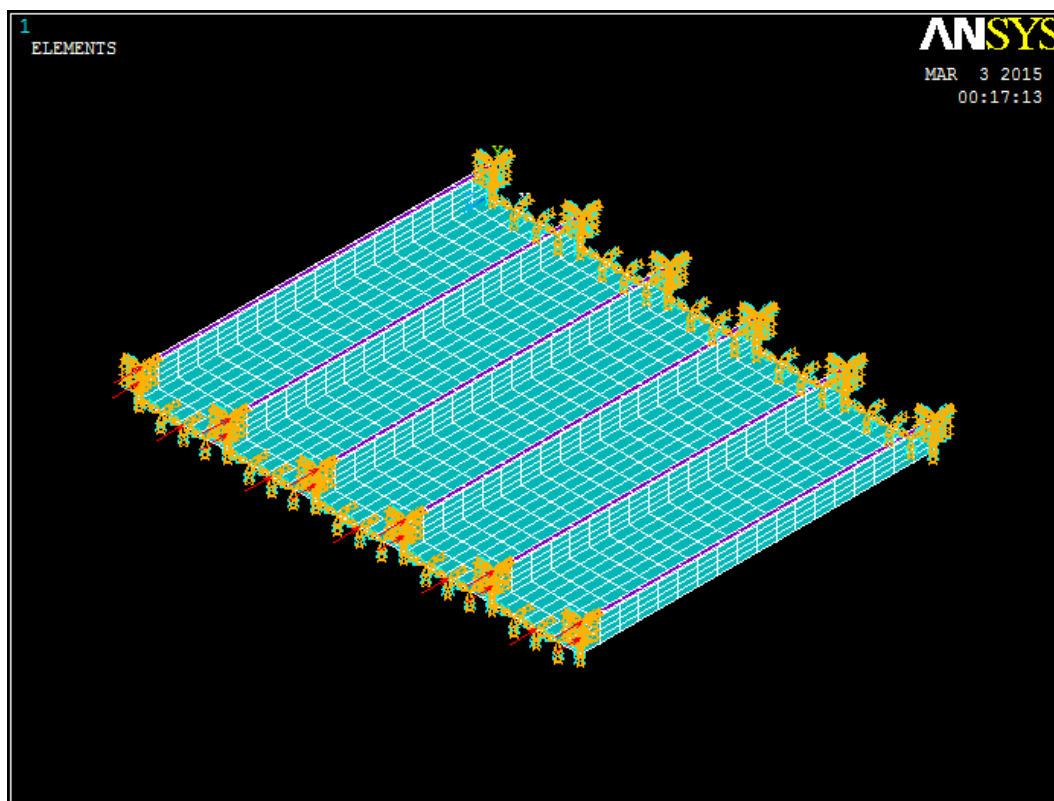


Figura 3.7 – Modelo com as condições de contorno e carregamento aplicados

3.3.8. Solução Linear Estática

O passo seguinte é rodar a solução linear estática para a carga distribuída unitária que foi aplicada sobre o bordo já indicado. Para obter a carga crítica de flambagem, finaliza-se a análise linear estática e, logo após, inicia-se outra solução linear do tipo *Eigen Buckling*, ou seja, solução elástica sob flambagem através dos autovalores e autovetores. O método escolhido para resolver o problema de autovalores e autovetores é o de Lanczos. Nesta etapa, solicita-se que a análise gere dois modos de flambagem, um primário e um secundário.

Nesta fase da solução linear estática, é importante que a opção de armazenamento do estado inicial de tensões seja ativada, conforme Figura 3.8, pois assim, calculando os efeitos das mesmas na análise, torna-se possível a solução do problema de autovalores.

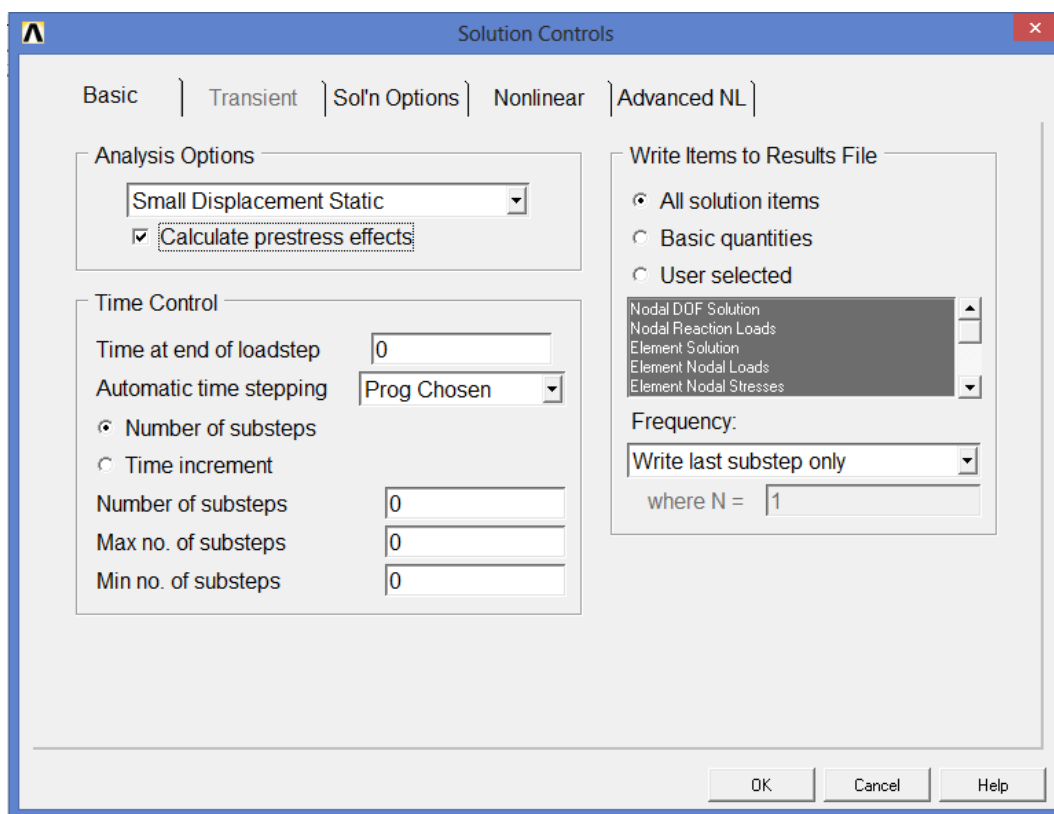


Figura 3.8 – Ativação do armazenamento de tensões iniciais no ANSYS

Em simulações com não-linearidades geométricas e físicas pouco significativas em que se faz possível não considerá-las, a solução estaria concluída, sendo uma análise linear de flambagem. O primeiro autovalor encontrado corresponde à carga crítica elástica linear de flambagem do painel, P_{cr} . Dividindo-se este valor pela área da seção transversal do painel, determina-se a tensão crítica de flambagem, σ_{cr} . Como o objetivo do presente trabalho é realizar a análise não-linear de painéis enrijecidos sob flambagem, ainda deve ser executada a parte da modelagem referente a este tipo de análise.

A fase da solução linear é necessária porque o primeiro modo de flambagem do painel é utilizado como imperfeição inicial na etapa de análise não-linear. A deformada da estrutura obtida através da análise linear é apresentada na Figura 3.9.

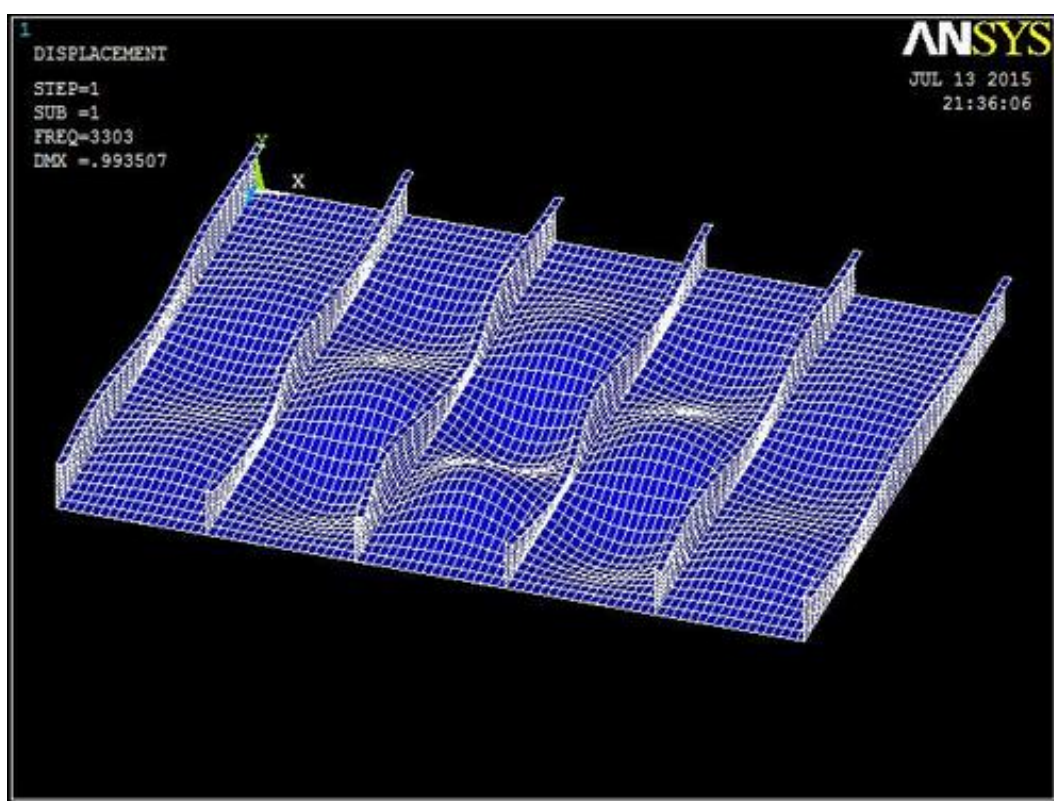


Figura 3.9 – Estrutura deformada após análise linear

3.3.9. Atualização da Geometria

O primeiro passo para a parte da análise não-linear, é atualizar a geometria, através de um arquivo de resultados originado na primeira parte da análise, ilustrado na Figura 3.10. Esta atualização faz com que a estrutura assuma sua configuração deformada, gerada na primeira fase da análise, como sendo o primeiro modo de flambagem da estrutura.

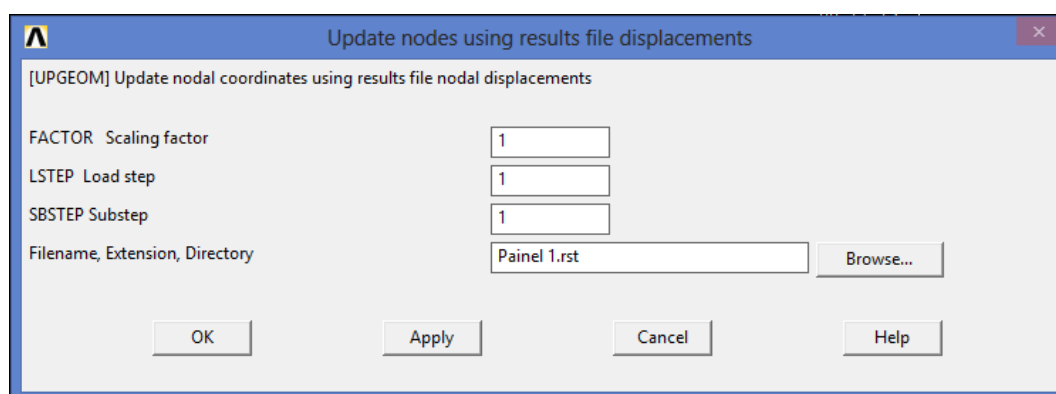


Figura 3.10 – Atualização da geometria no ANSYS

3.3.10. Propriedades do Material no Comportamento Plástico

A seguir, os novos dados do material, referentes ao comportamento plástico, devem ser fornecidos. A tensão de escoamento para o aço AH-36 é de 355 MPa. Nesta etapa, é possível escolher o tipo de curva “tensão–deformação” que irá representar o material. As duas possibilidades são: curva bilinear, Figura 3.11, e curva multilinear, Figura 3.12. No presente trabalho, foi adotado o modelo de curva bilinear para representar o material utilizado, visto que o mesmo possui comportamento elasto-plástico perfeito.

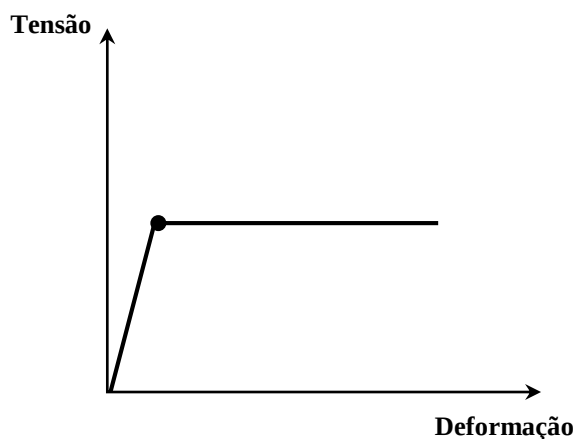


Figura 3.11 – Curva bilinear do material (Adaptado de ANSYS, 1994)

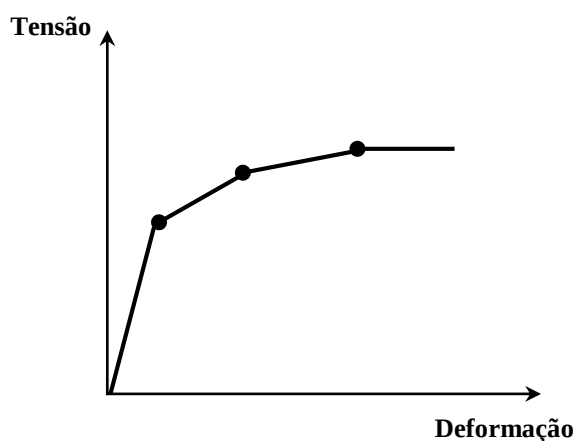


Figura 3.12 – Curva multilinear do material (Adaptado de ANSYS, 1994)

3.3.11. Alterações nas Condições de Contorno e no Carregamento

Após, são feitas as devidas alterações nas condições de contorno, que são a remoção da pressão unitária e a aplicação da nova carga, a qual é dada na forma de deslocamentos incrementais em todos os nós desta borda onde, anteriormente, fora aplicada a pressão, do mesmo modo que apresentado por Chujutalli (2010). Estes deslocamentos impostos foram divididos em seis passos de carga, chegando a um total de 18 mm, valor que corresponde a 0,5% do comprimento da placa.

Os intervalos em que foram aplicados os deslocamentos sofreram ajustes ao longo das modelagens, visto que para algumas opções, perdeu-se convergência durante a análise.

A ordem em que os passos de carga foram aplicados, bem como os valores dos deslocamentos impostos sucessivamente, encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Passos de carga e deslocamentos impostos

Passo de Carga	Deslocamento Imposto (mm)
1	5,0
2	7,5
3	10,0
4	15,0
5	17,0
6	18,0

O valor de imperfeição inicial máxima, w_0 , foi adotado com base no trabalho de Zhang e Khan (2009), conforme o critério da equação (3.1):

$$w_0 = \frac{b_p}{200} \quad (3.1)$$

Sendo, na equação (3.1), b_p a distância entre dois reforços consecutivos. Desta forma, adotou-se um valor de imperfeição inicial máxima $w_0 = 4,5$ mm.

3.3.12. Solução Não-Linear Estática

Por fim, deve-se rodar a solução não-linear estática, cujo processo é exemplificado na Figura 3.13, para todos os seis passos de deslocamentos impostos, concluindo, desta forma, a análise não-linear de painéis enrijecidos sob flambagem.

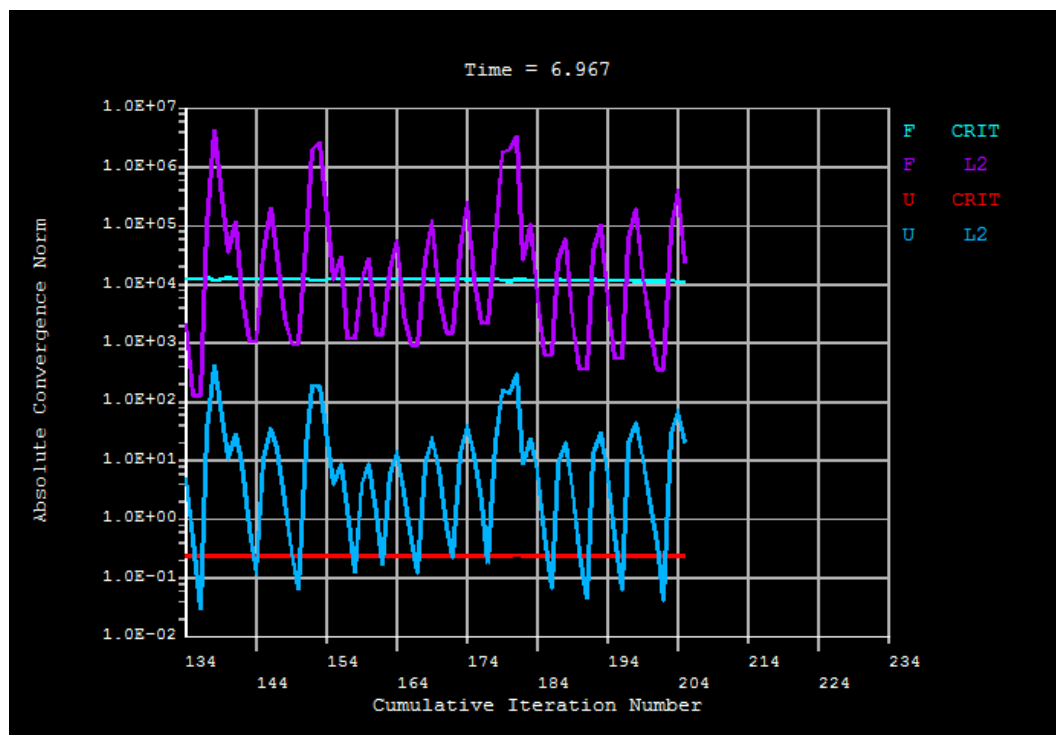


Figura 3.13 – Processamento da solução não-linear no ANSYS

Durante a análise, pode-se observar claramente a busca por convergência que o software realiza, através do comportamento das linhas exemplificadas na Figura 3.13.

No Anexo B, é apresentado um script com o exemplo de uma modelagem completa feita no ANSYS, conforme arquivo LGW.

3.4. Teste de Malha

Para a definição do refinamento de malha a ser adotado, foi feito um teste de malha, que identifica um tamanho de elemento que seja capaz de gerar um resultado preciso exigindo o menor esforço computacional possível. Para identificar este tamanho de elemento, foi sendo feito o refinamento da malha até que os valores encontrados de tensão crítica de flambagem convergissem.

Os tamanhos de elementos dos testes são apresentados na Tabela 3.2. Todas as malhas apresentadas neste trabalho são estruturadas e geradas a partir de elementos finitos quadriláteros, formato cuja performance foi aprovada por Zienkiewicz e Taylor (1989 e 1991).

Tabela 3.2 – Tamanhos dos elementos do teste de malha

Malha	Tamanho do elemento (mm)	
1	direção x	100
	direção y	60
	direção z	200
2	direção x	75
	direção y	45
	direção z	150
3	direção x	50
	direção y	30
	direção z	100

As curvas “tensão–deformação” para as diferentes malhas testadas são apresentadas na Figura 3.14.

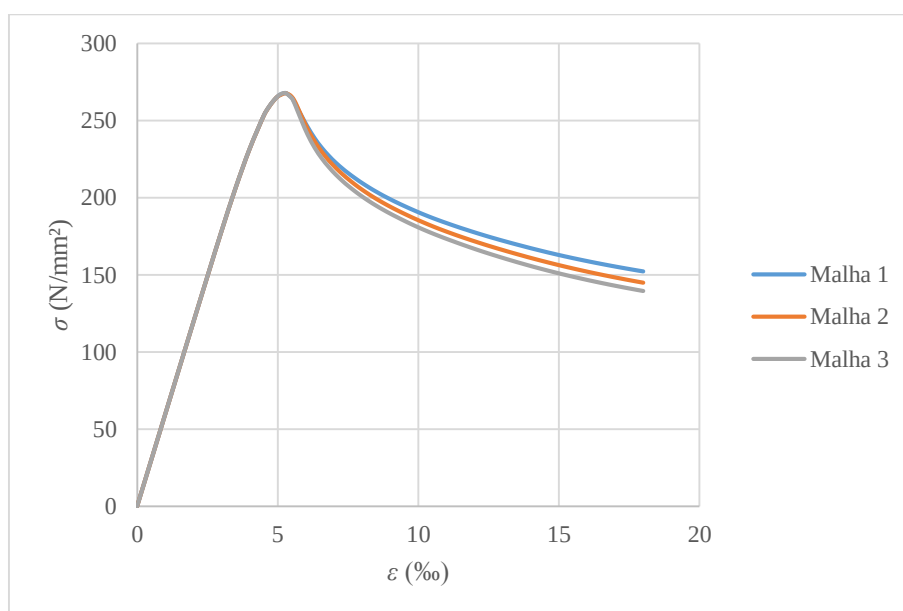


Figura 3.14 – Curvas “tensão–deformação” do teste de malha

Observa-se uma forte convergência destas três simulações feitas. Sendo assim, como o tempo de processamento não apresentou aumento significativo, escolheu-se uma malha mais refinada, devido à melhor representação da geometria, foram adotados os tamanhos de elementos referentes à Malha 3, conforme Figura 3.15.

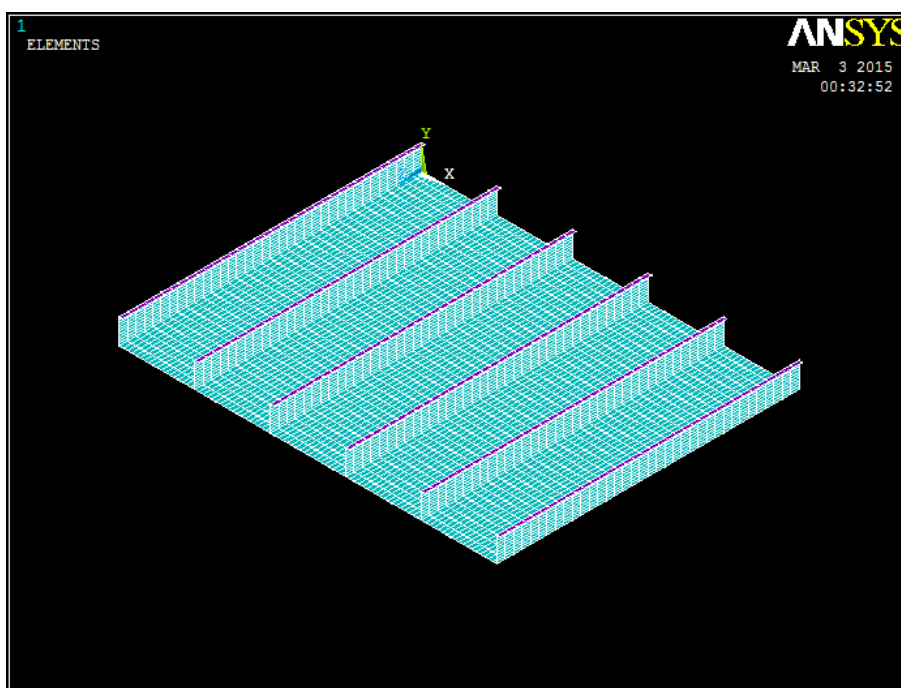


Figura 3.15 – Malha de elementos finitos do painel enrijecido

3.5. Verificação do Modelo Linear

3.5.1. Painel com Um Enrijecedor

O painel utilizado na verificação linear sob flambagem, com um enrijecedor, é formado por uma chapa plana retangular de comprimento a , largura b e espessura t_p com um enrijecedor longitudinal de altura h_w e espessura t_w posicionado em $b/2$, conforme a Figura 3.16.

Considerou-se uma placa de comprimento $a = 1000$ mm, largura $b = 500$ mm, espessura $t_p = 9$ mm com um enrijecedor de altura $h_w = 50$ mm e espessura $t_w = 9$ mm. O módulo de elasticidade (módulo de Young) e o coeficiente de Poisson do material são, respectivamente, E

= 210.000 N/mm² e $\nu = 0,30$. A modelagem foi feita no ANSYS e o elemento finito utilizado foi o SHELL93.

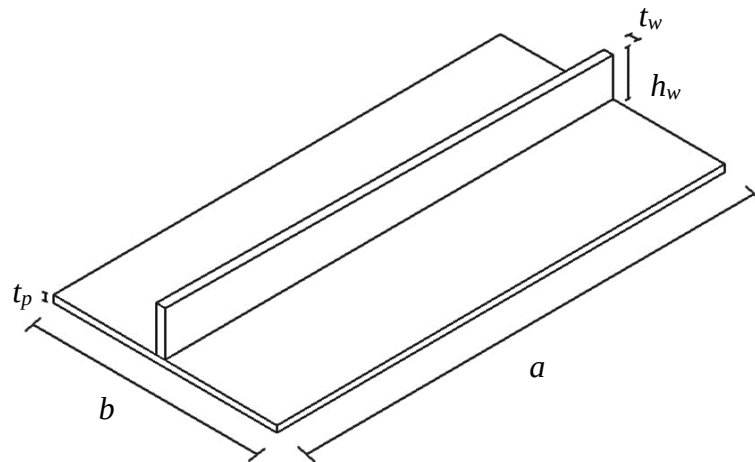


Figura 3.16 – Geometria do painel com um enrijecedor

A verificação desta modelagem foi feita comparando os resultados com a solução analítica proposta por Timoshenko e Gere (1963), apresentada na seção 2.1 deste trabalho, com auxílio do Anexo A.1. Para o painel proposto, a tensão crítica de flambagem determinada pela solução analítica é 606,12 N/mm². Através da modelagem computacional, tem-se a tensão crítica como sendo 640,77 N/mm² e seu modo de flambagem elástica é exibido na Figura 3.17.

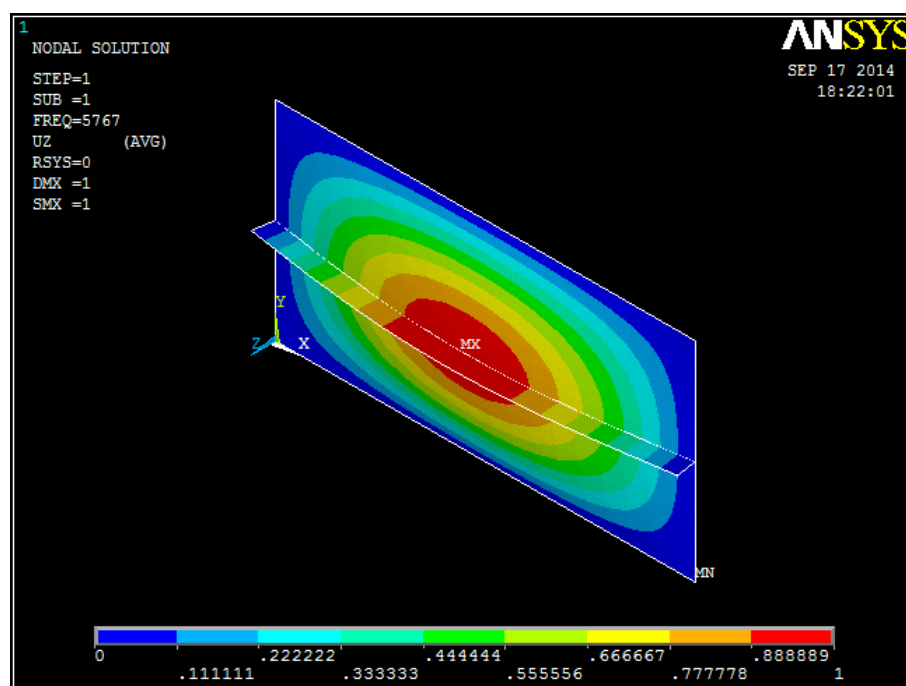


Figura 3.17 – Modo de flambagem elástica do painel com um enrijecedor

Observa-se uma pequena e aceitável diferença de 5,41% entre a solução analítica e o modelo computacional proposto, já que a solução analítica trata o problema de forma aproximada.

3.5.2. Painel com Dois Enrijecedores

O painel utilizado na verificação linear sob flambagem, com dois enrijecedores, é formado por uma chapa plana retangular de comprimento a , largura b e espessura t_p com um enrijecedor longitudinal de altura h_w e espessura t_w posicionado em $b/3$, conforme a Figura 3.18.

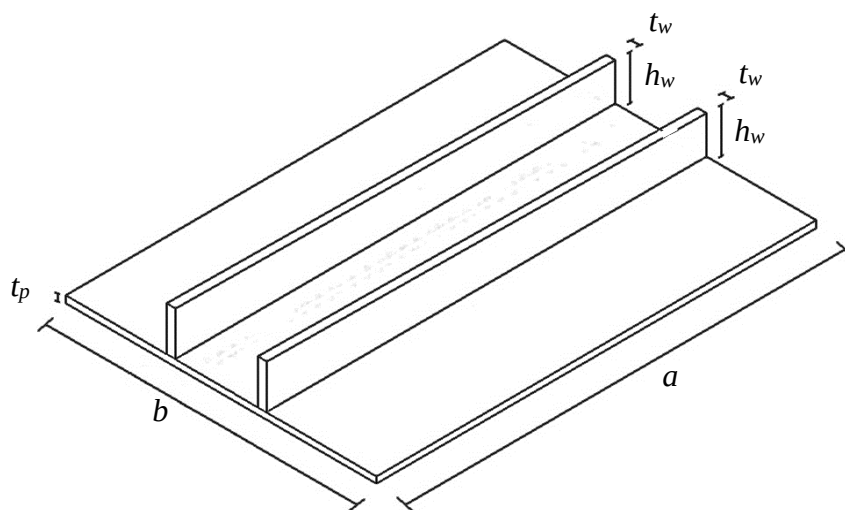


Figura 3.18 – Geometria do painel com dois enrijecedores

Considerou-se uma placa de comprimento $a = 3000$ mm, largura $b = 1500$ mm, espessura $t_p = 13$ mm com dois enrijecedores, de altura $h_w = 70$ mm e espessura $t_w = 13$ mm, com espaçamento constante de $b/3$. O módulo de elasticidade (módulo de Young) e o coeficiente de Poisson do material são, respectivamente, $E = 210.000$ N/mm² e $\nu = 0,30$. A modelagem foi feita no software ANSYS e o elemento finito adotado foi o SHELL93.

A verificação feita para o caso do painel com dois enrijecedores sob flambagem elástica foi feita comparando os resultados com a solução analítica apresentada no item 2.1 deste trabalho, com o auxílio da tabela exposta no Anexo A.2.

Para o painel com a geometria proposta, a tensão crítica de flambagem é 124,03 N/mm². Através da modelagem computacional, tem-se a tensão crítica como sendo 133,05 N/mm². O modo de flambagem elástica do painel com dois enrijecedores é apresentado na Figura 3.19. Observa-se uma pequena, porém aceitável, diferença entre a solução analítica e o modelo computacional proposto, já que a solução analítica trata o problema de forma aproximada.

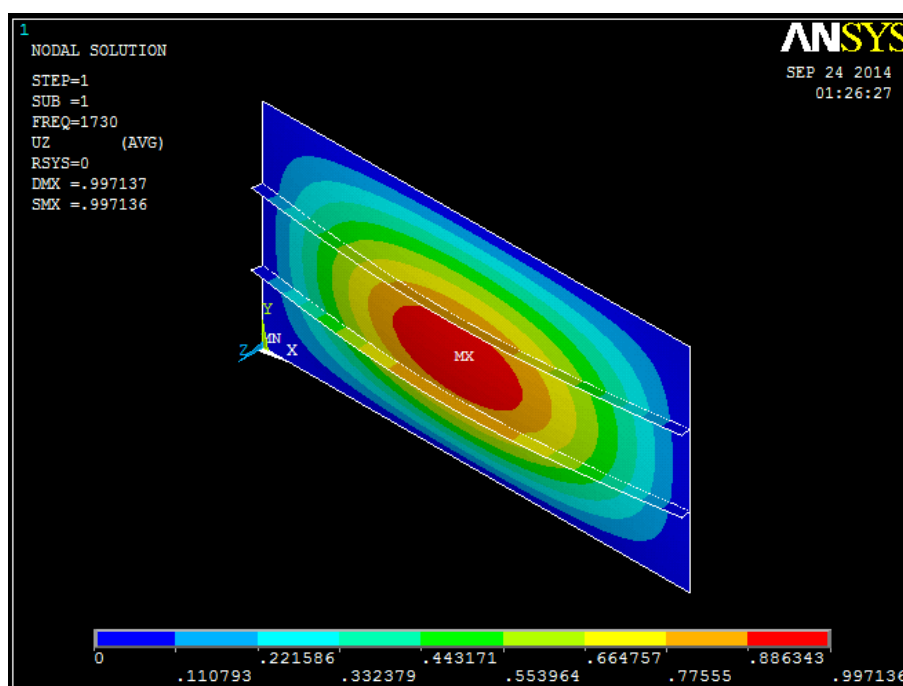


Figura 3.19 – Modo de flambagem elástica do painel com dois enrijecedores

Com o objetivo de avaliar o quanto a presença de enrijecedores é capaz de majorar a tensão crítica, foi analisada uma placa com as mesmas dimensões da que constitui o painel da Figura 3.17. A tensão crítica encontrada é de 56,62 N/mm² e o modo de flambagem elástica desta placa é exibido na Figura 3.20. A presença de dois enrijecedores levou a um ganho de mais de 100% na resistência à flambagem.

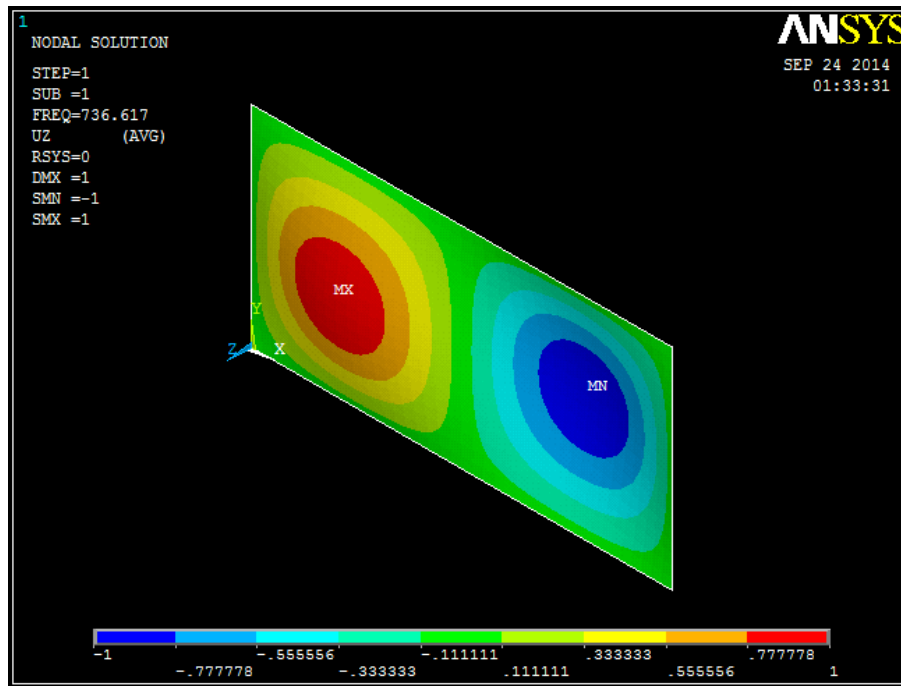


Figura 3.20 – Modo de flambagem elástica da placa

3.5.3. PAINEL COM VÁRIOS ENRIJECEDORES

Para realizar a verificação do modelo para análise de flambagem linear do painel com vários reforços, foi utilizado o trabalho desenvolvido por Stamatelos, Labeas e Tserpes (2010). O mesmo painel modelado pelos autores, também no software ANSYS, foi reproduzido da mesma forma que foi descrita a parte da solução elástica no presente trabalho, inclusive com o elemento SHELL93.

Stamatelos, Labeas e Tserpes (2010) modelaram um painel reforçado por quatro enrijecedores no formato de barra, reproduzido neste trabalho e exibido na Figura 3.21, considerando o material isotrópico. O elemento finito escolhido para o material isotrópico é o SHELL63, também da biblioteca do ANSYS, um elemento de quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó.

Estes autores consideraram em sua modelagem, liga de alumínio com módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, respectivamente, iguais a 72.000 N/mm² e 0,33.

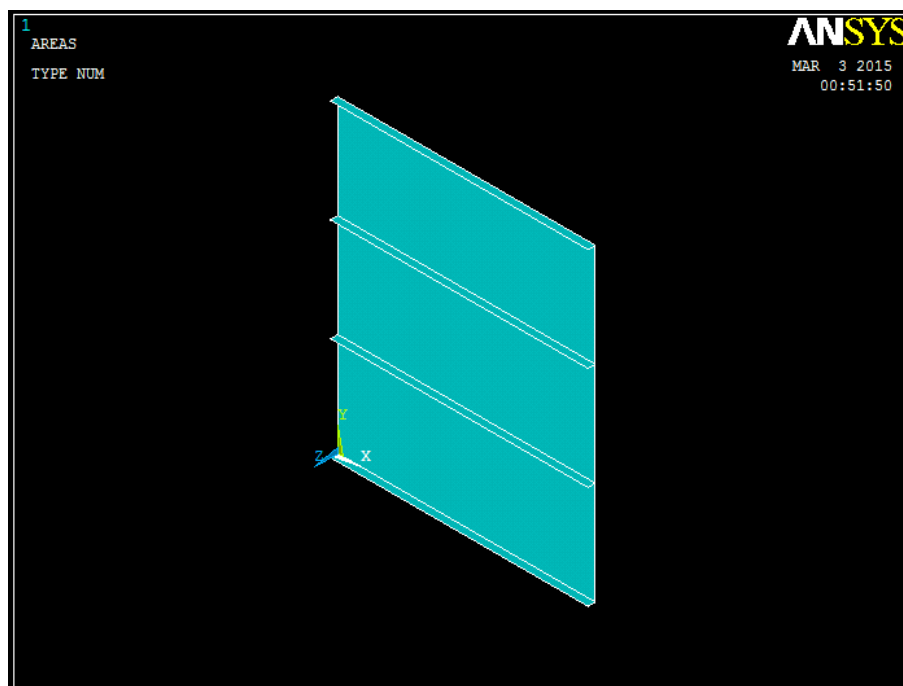


Figura 3.21 – Reprodução do modelo de Stamatelos, Labeas e Tserpes (2010)

As características geométricas do modelo reproduzido estão detalhadas na Figura 3.22.

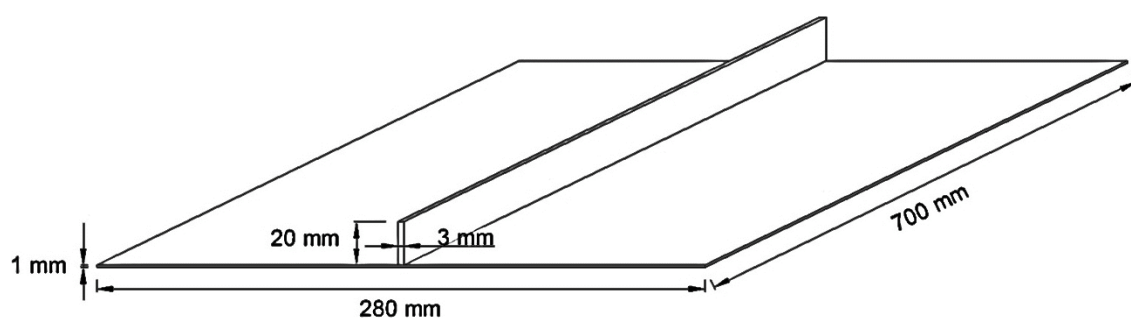


Figura 3.22 – Trecho do modelo reproduzido de Stamatelos, Labeas e Tserpes (2010)

No modelo original, a carga crítica de flambagem encontrada é de 5,02 N e no modelo aqui reproduzido, cujo modo de flambagem elástica é ilustrado na Figura 3.23, foi obtido o valor de 5,28 N. A diferença entre os dois resultados é de 5,18%, levando à conclusão de que a modelagem para análise linear de flambagem aqui desenvolvida leva a valores confiáveis.

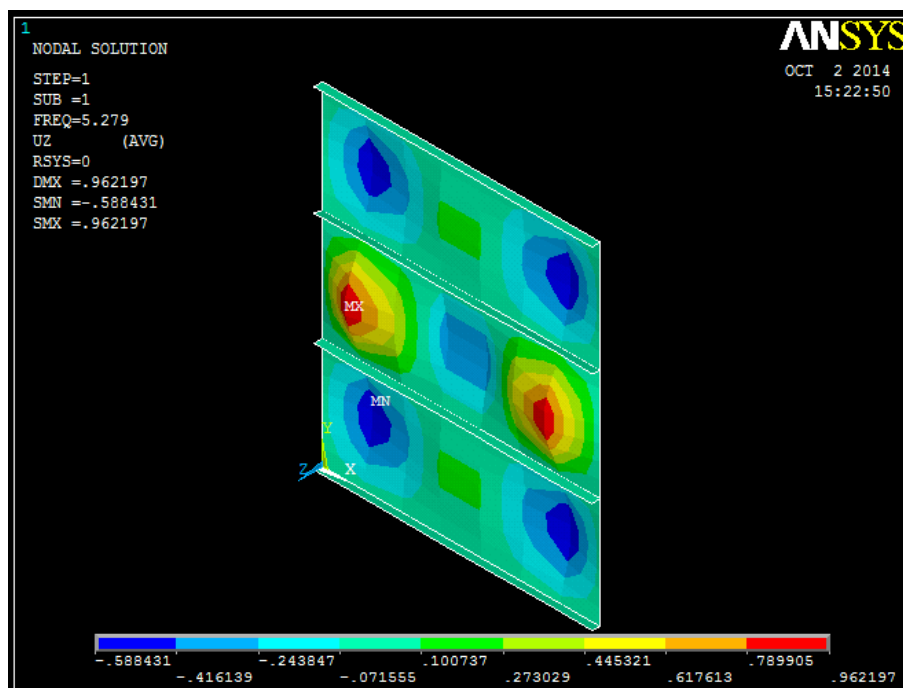


Figura 3.23 – Modo de flambagem elástica do painel com vários enrijecedores

Comparando o resultado encontrado no presente trabalho com a solução analítica proposta por Timoshenko e Gere (1963) para um painel com vários enrijecedores, exposta no item 2.1, cuja carga crítica resulta em 5,39 N, a diferença encontrada é de 2,04%. Esta diferença confirma que o modelo aqui proposto gera resultados confiáveis.

Para fins comparativos, o modo de flambagem elástica encontrado por Stamatelos, Labeas e Tserpes (2010) para o mesmo painel em sua análise é exibido na Figura 3.24.

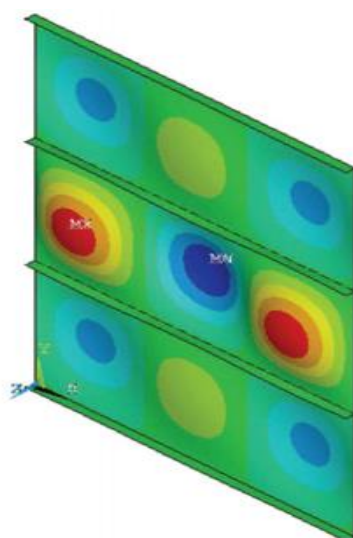


Figura 3.24 – Modo de flambagem elástica do painel na modelagem dos autores

3.6. Verificação e Validação do Modelo Não-Linear

Para a verificação e validação do modelo desenvolvido para a análise não-linear de flambagem, foi reproduzida a simulação feita por Chujutalli (2010).

Chujutalli (2010) modelou, no software ABAQUS, modelos reais e modelos reduzidos. O modelo reduzido, além de ter sido analisado sob modelagem computacional, foi testado em laboratório.

O painel aqui reproduzido segue as propriedades do modelo reduzido, composto por uma chapa plana e sete reforços do tipo tê, conforme Figura 3.25. Os reforços dos bordos longitudinais estão separados do reforço lateral mais próximo por uma distância igual à metade da distância entre os reforços centrais.

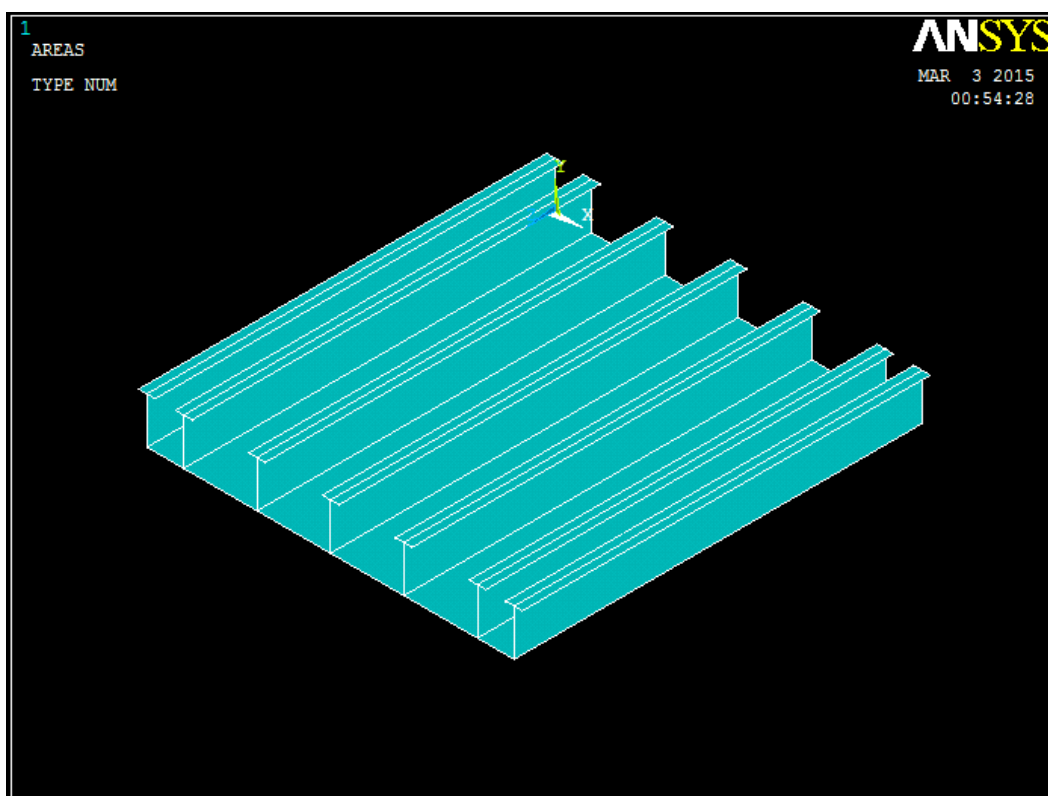


Figura 3.25 – Reprodução do modelo reduzido de Chujutalli (2010)

As características geométricas do modelo reproduzido estão detalhadas na Figura 3.26.

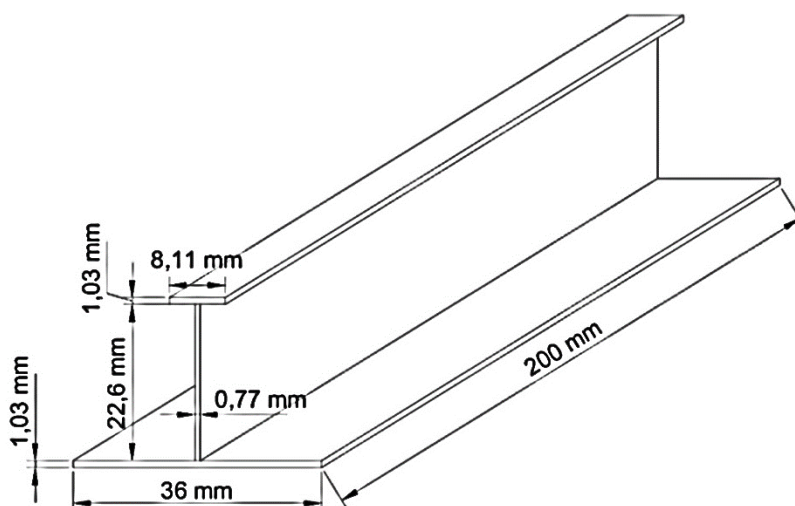


Figura 3.26 – Trecho do modelo reduzido de Chujutalli reproduzido

Chujutalli (2010) considerou em sua modelagem e no teste experimental, aço com módulo de elasticidade de 207.800 N/mm^2 e coeficiente de Poisson de 0,30. Para realizar a modelagem de forma mais real, as imperfeições geométricas iniciais geradas no processo de fabricação do modelo reduzido foram mapeadas por um equipamento de medição portátil de precisão sub milimétrica. Através de um software de criação de sólidos e superfícies, foi gerada uma superfície com os pontos medidos, a qual foi exportada para o ABAQUS.

Tanto no teste em laboratório quanto na modelagem através do MEF, Chujutalli (2010) considerou o painel completamente engastado em uma extremidade e, na extremidade oposta, com todos movimentos restringidos, com exceção do deslocamento longitudinal, sendo aplicado deslocamento prescrito neste bordo na direção longitudinal. O autor não informa as condições de aplicação de incrementos de carga.

O autor expôs os resultados através de um gráfico que relaciona força com deslocamento axial. Na Figura 3.27 são apresentados os resultados das soluções experimental e numérica de Chujutalli (2010) em comparação com os obtidos pelo presente estudo.

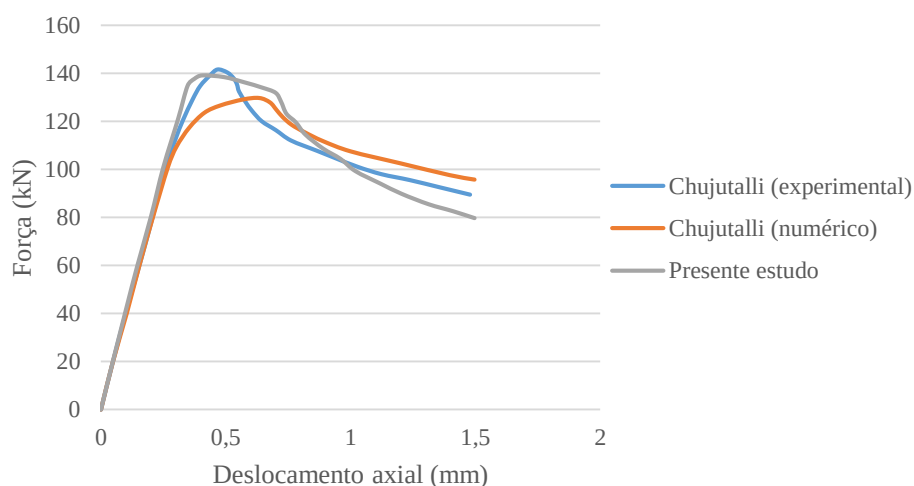


Figura 3.27 – Verificação e validação do modelo numérico não-linear

Nota-se, na Figura 3.27, que os ramos ascendentes das curvas, correspondentes à região que representa o comportamento linear, são bastante semelhantes, bem como o valor encontrado para a carga última de flambagem, que são 141,65 kN, 129,73 kN e 139,13 kN, para o teste experimental de Chujutalli (2010), a modelagem numérica de Chujutalli (2010) e o modelo reproduzido numericamente no presente trabalho, respectivamente. A diferença encontrada na validação entre os valores de pico é mínima, igual a 1,78%. Na verificação, a diferença entre os valores de pico é igual a 7,25%.

Em relação ao ramo após atingir a carga última, correspondente ao comportamento pós-flambagem, observa-se que as três curvas apresentam diferenças. Estas diferenças podem ser justificadas pelas imperfeições iniciais, que não são capazes de serem reproduzidas de forma idêntica às consideradas no modelo reduzido de Chujutalli (2010), entretanto, observa-se uma mesma tendência de comportamento.

As comparações feitas mostram que a simulação de flambagem não-linear desenvolvida nesta pesquisa é confiável e apresenta resultados seguros.

O modo pós-colapso obtido através do ABAQUS por Chujutalli (2010) é exibido na Figura 3.28. A distribuição de tensões pós-colapso encontradas pela modelagem proposta no presente trabalho é apresentado na Figura 3.29.

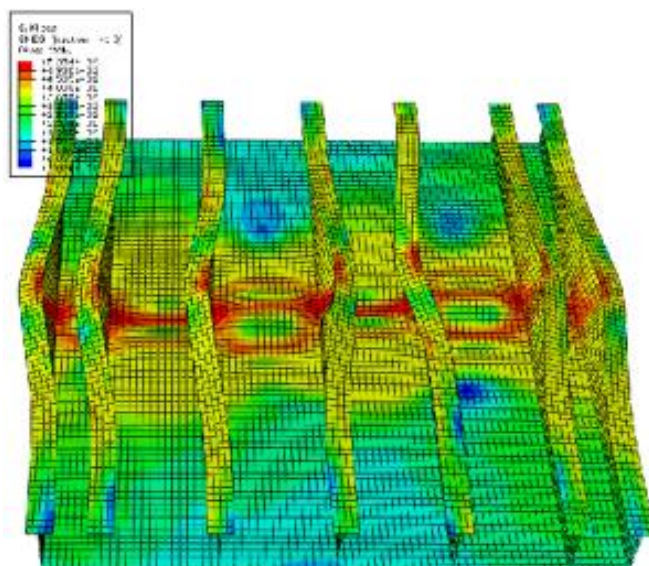


Figura 3.28 – Modo pós-colapso encontrado por Chujutalli (2010)

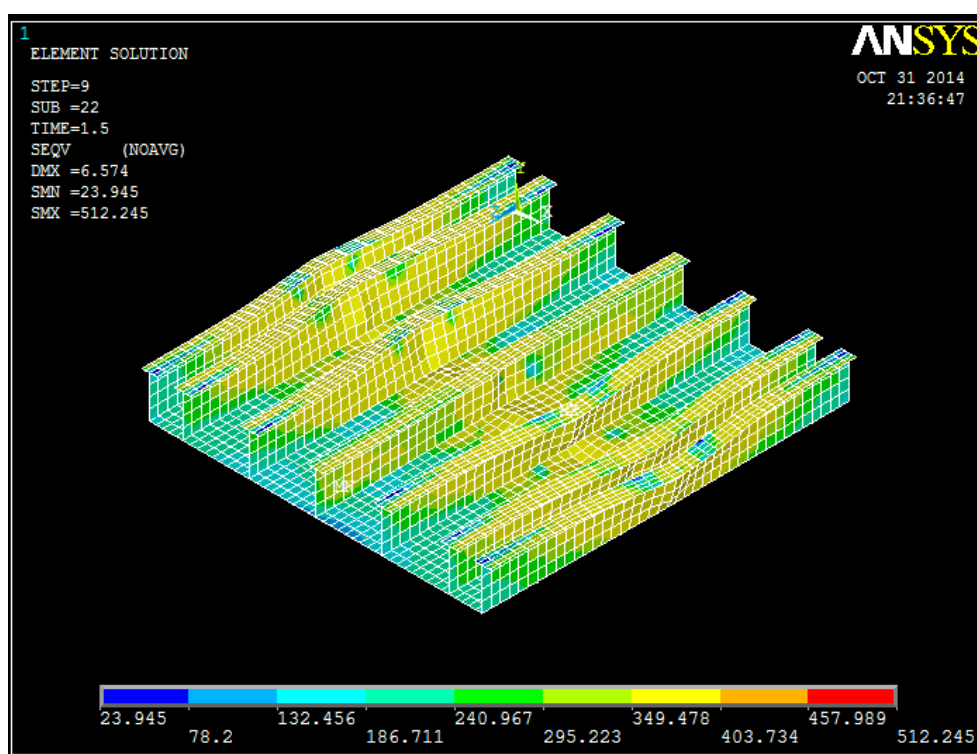


Figura 3.29 – Distribuição de tensões

3.7. Identificação do Modo de Flambagem

Grondin, Sheikh e Elwi (2001) apresentam uma proposta visual para relacionar o traçado da curva “tensão – deformação” de painéis enrijecidos com o modo de flambagem ocasionada, de acordo com a Figura 3.30.

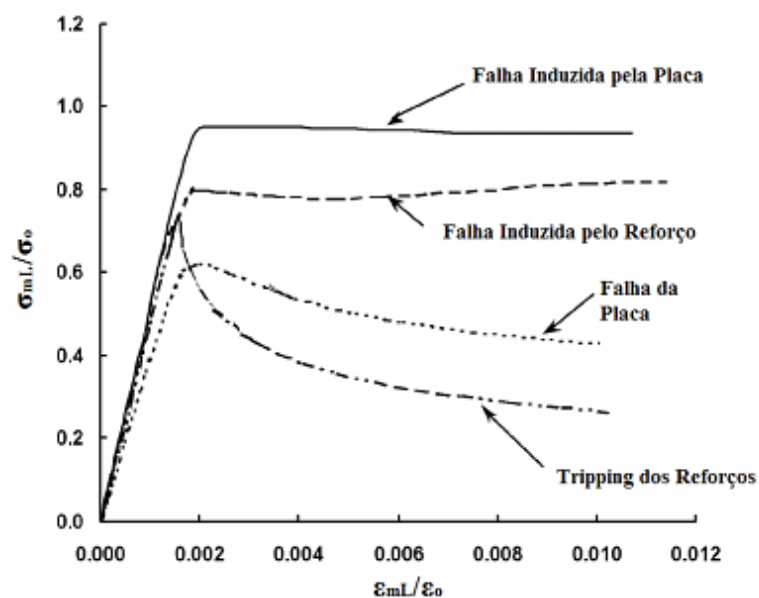


Figura 3.30 – Curvas características de “tensão–deformação” dos diferentes modos de falha de painéis enrijecidos (Adaptado de Grondin, Sheikh e Elwi, 2001)

4. ESTUDOS PARAMÉTRICOS

Benjamin (1991), Grondin, Elwi e Cheng (1999), Wang, Grondin e Elwi (2006), Zhang e Khan (2009), Choi et al. (2009), Chujutalli (2010), Taysi (2010), dentre outros pesquisadores mostraram, em trabalhos anteriores, que há diversos parâmetros envolvidos na influência da resistência dos painéis enrijecidos sob flambagem e também da determinação do modo de falha.

Como o objetivo dos estudos paramétricos deste trabalho é identificar quais parâmetros levam ao aumento mais significativo do valor da carga última de flambagem, independentemente do modo de falha, as variações feitas são da espessura da placa, espessura da alma do enrijecedor e espessura do flange do enrijecedor.

Os valores escolhidos aplicados nas simulações foram consultados nos estudos realizados por Chujutalli (2010), onde o autor buscou avaliar a influência da variação de cada parâmetro na ocorrência do modo de falha por *tripping* dos reforços. Neste estudo foram testados os parâmetros de mesmo valor apresentados pelo autor supracitado, além dos valores reais do painel considerado base, já apresentados.

Após as citadas variações, são apresentados conjuntos dos parâmetros mais significativos, formando combinações, com a finalidade de otimizar a resistência à flambagem dos painéis enrijecidos.

4.1. Variação da Espessura da Placa (t_p)

Foi avaliada a influência da variação da espessura da placa, t_p , no valor da tensão crítica do painel enrijecido. Para tal, foram analisados quatro modelos, incluindo o painel base com placa de espessura de 15 mm. Os valores testados para a espessura da chapa são: 9, 13, 15 e 17 mm, escolhidos com base em valores testados por Chujutalli (2010) e valores reais do painel considerado base.

Os demais parâmetros, t_w e t_f , foram mantidos constantes e iguais a 11 mm e 32 mm, respectivamente.

Os valores da tensão última do painel, σ_u , para cada valor do parâmetro em estudo estão dispostos na Tabela 4.1.

Com os resultados, foram geradas curvas relacionando a tensão normal média, σ , a qual é obtida dividindo a carga aplicada pela área da seção transversal do painel, com a deformação normal média, ε , que é calculada pela relação entre os deslocamentos impostos em cada etapa e o comprimento inicial do painel. Estas curvas são apresentadas na Figura 4.1.

Tabela 4.1 - Efeito da variação da espessura da placa, t_p , no valor da tensão última

t_p (mm)	9	13	15	17
σ_u (MPa)	228,16	248,56	267,54	284,45

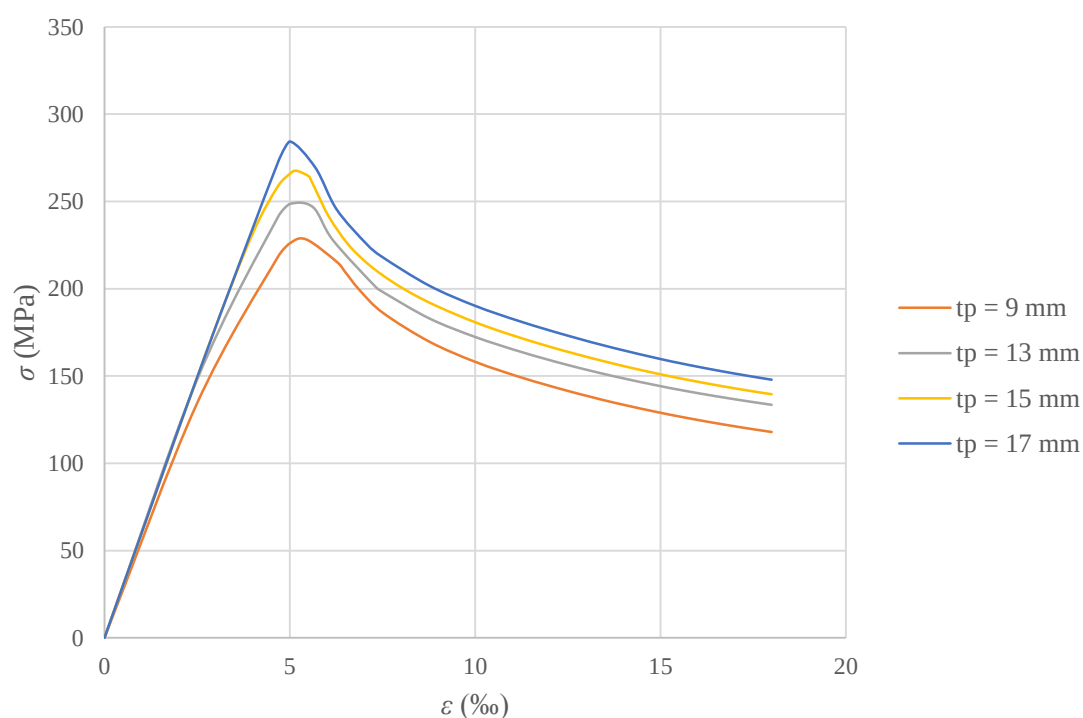


Figura 4.1 – Efeito da variação da espessura da placa, t_p , na curva “tensão–deformação” do painel enrijecido

Como outra forma de visualizar a influência deste parâmetro na resistência à flambagem, é exibida a relação entre espessura da placa, t_p , e tensão última, σ_u , na Figura 4.2.

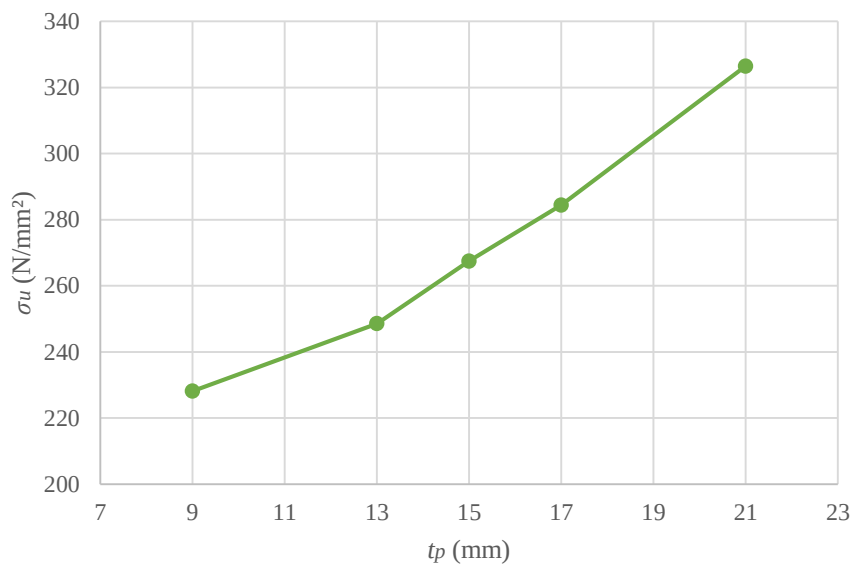


Figura 4.2 – Efeito da variação da espessura da placa, t_p , na tensão última, σ_u

Os valores da Figura 4.1 são apresentados de forma relativa, em relação à tensão de escoamento e à deformação inicial do material, na Figura 4.3.

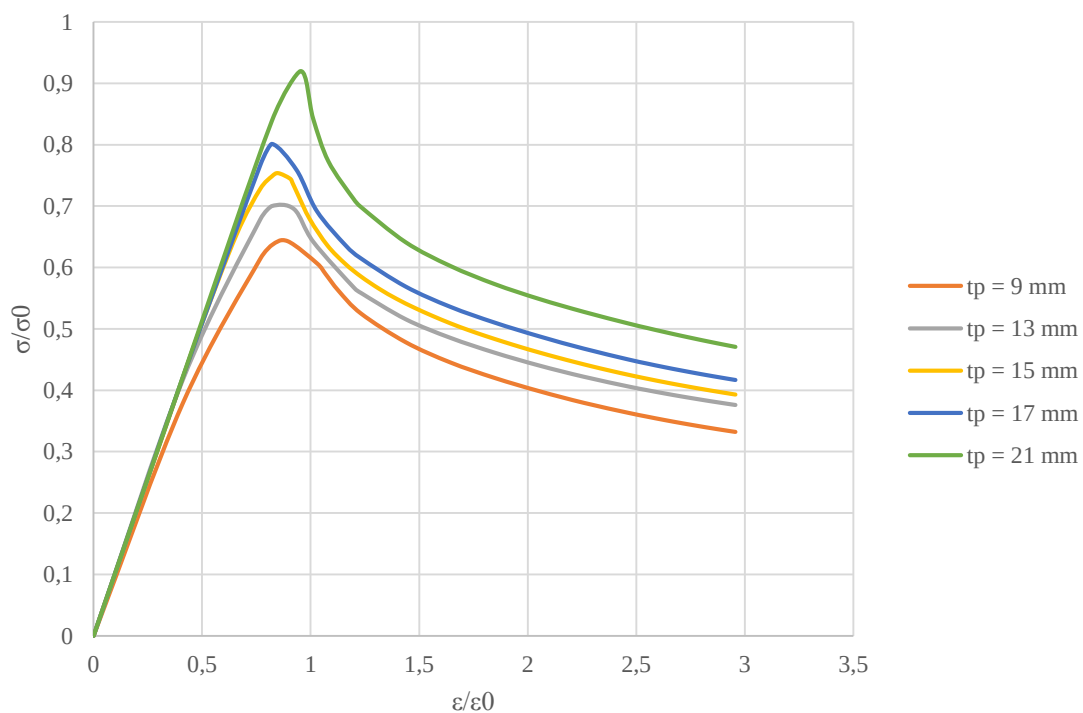


Figura 4.3 – Efeito da variação da espessura da placa, t_p , na resistência à flambagem

Pode-se observar, nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, a forte influência da alteração deste parâmetro mantendo os demais constantes. Estas variações apresentaram mudanças na magnitude das curvas e na inclinação na região relativa ao comportamento linear. A tensão máxima do painel reforçado com 17 mm de espessura de placa atinge 284,45 MPa, correspondente a 80,13% da tensão de escoamento, enquanto que para a espessura de placa de 9 mm, a tensão máxima no painel reforçado é igual a 228,16 MPa, valor que representa apenas 64,27% da tensão de escoamento do material.

Comparando as curvas da Figura 4.3 com as curvas de Grondin, Sheikh e Elwi (2001) apresentadas na Figura 3.30 do capítulo anterior, observa-se que quanto maior a espessura da placa, fica mais evidente o modo de falha por *tripping*, como é o caso do painel com $t_p = 21$ mm. Já o painel com menor espessura de placa parece ter sofrido falha na própria placa.

4.2. Variação da Espessura da Alma do Reforço (t_w)

Nesta parte, variou-se unicamente a espessura da alma do reforço, t_w , a fim de observar a influência deste parâmetro na resistência à flambagem do painel enrijecido. Foram modelados quatro painéis com as seguintes espessuras de alma do reforço: 7, 9, 11 e 13 mm, escolhidos com base em valores testados por Chujutalli (2010) e valores reais do painel considerado base.

Os demais parâmetros, t_p e t_f , foram mantidos constantes e iguais a 15 mm e 32 mm, respectivamente.

Os valores da tensão última do painel, σ_u , para cada valor do parâmetro em estudo estão dispostos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Efeito da variação da espessura da alma do reforço, t_w , no valor da tensão última

t_w (mm)	7	9	11	13
σ_u (MPa)	261,25	264,59	267,54	270,20

A Figura 4.4 mostra a comparação das curvas “tensão–deformação” do painel reforçado para as diferentes espessuras de alma.

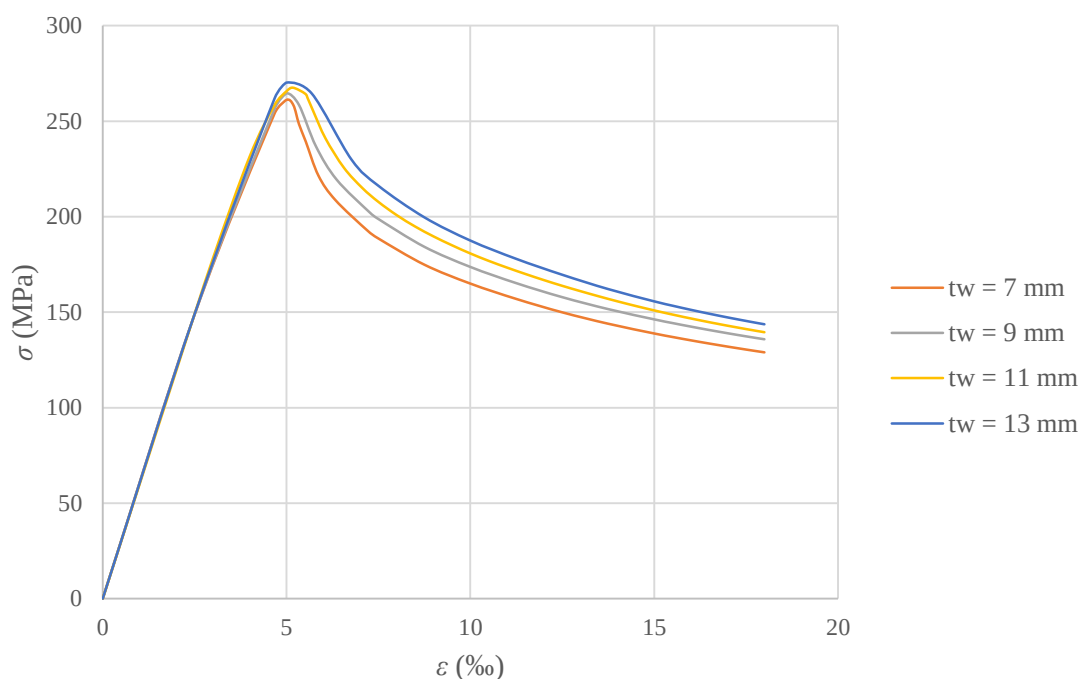


Figura 4.4 – Efeito da variação da espessura da alma do enrijecedor, t_w , na curva “tensão–deformação” do painel enrijecido

Como outra forma de visualizar a influência deste parâmetro na resistência à flambagem, é exibida a relação entre espessura da alma do enrijecedor, t_w , e tensão última, σ_u , na Figura 4.5.

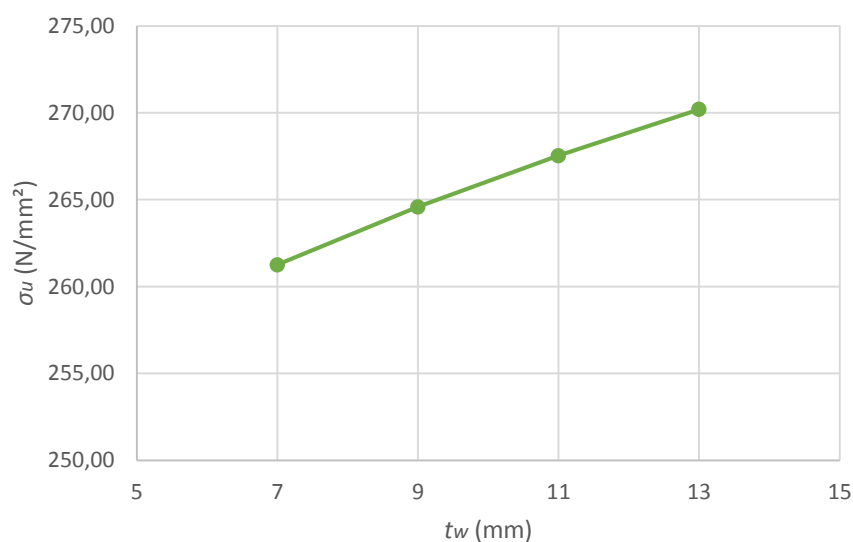


Figura 4.5 – Efeito da variação da espessura da alma, t_w , na tensão última, σ_u

Os valores da Figura 4.4 são apresentados de forma relativa, em relação à tensão de escoamento e à deformação inicial do material, na Figura 4.6.

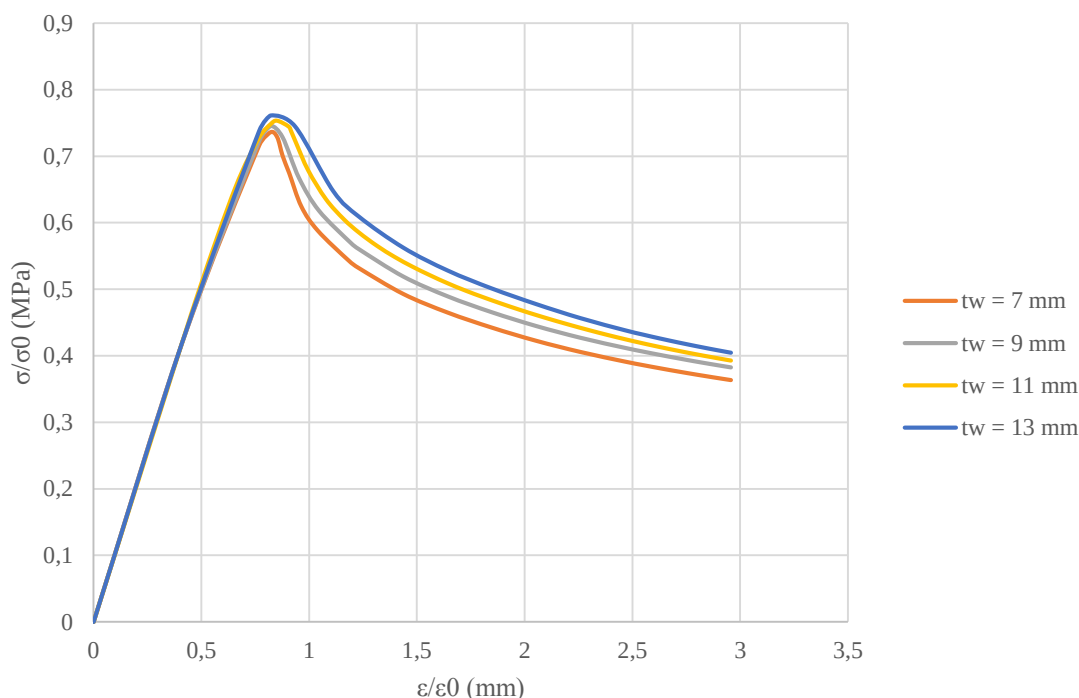


Figura 4.6 – Efeito da variação da espessura da alma, t_w , na resistência à flambagem

Observa-se, nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, que esta variação, com incrementos de 2 mm, apresenta pouca influência no ramo ascendente da curva, referente à região linear, e seu valor máximo, correspondente à tensão última de flambagem. Com um aumento total de 4 mm em relação ao menor valor de espessura da alma, obteve-se um ganho de 8,95 MPa na resistência à flambagem. Porém, no ramo final da curva, que equivale ao comportamento pós-flambagem, há uma maior influência desta variação.

Comparando as curvas da Figura 4.6 com as curvas de Grondin, Sheikh e Elwi (2001) apresentadas na Figura 3.30 do capítulo anterior, todos painéis aparentam ter sofrido *tripping*.

4.3. Variação da Espessura do Flange do Reforço (t_f)

Realizou-se a variação da espessura do flange do reforço, mantendo os demais parâmetros geométricos constantes, com o objetivo de avaliar os efeitos desta mudança no valor da tensão

máxima no painel enrijecido. Os valores de espessura de flange do reforço usados nas modelagens são os seguintes: 12, 18, 24, 30 e 32 mm, escolhidos com base em valores testados por Chujutalli (2010) e valores reais do painel considerado base.

Os demais parâmetros, t_p e t_w , foram mantidos constantes e iguais a 15 mm e 11 mm, respectivamente.

Os valores da tensão última do painel, σ_u , para cada valor do parâmetro em estudo estão dispostos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Efeito da variação da espessura do flange do reforço, t_w , no valor da tensão última

t_f (mm)	12	18	24	30	32
σ_u (MPa)	262,43	265,04	266,70	267,16	267,54

As curvas “tensão–deformação” construídas para os painéis modelados são exibidas na Figura 4.7.

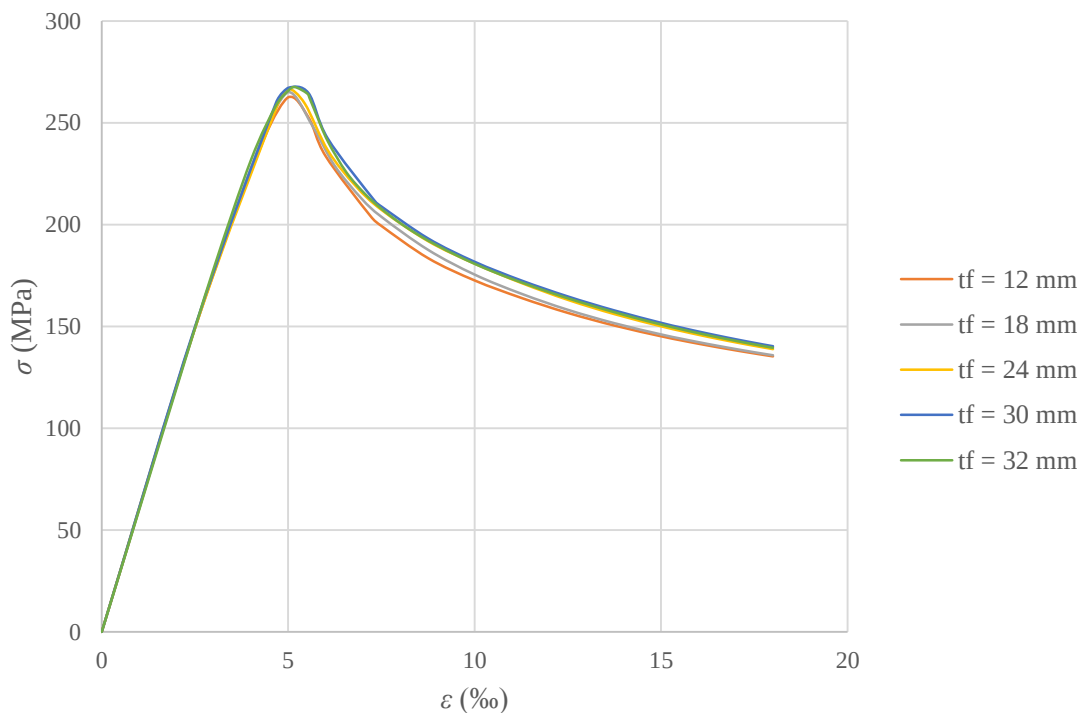


Figura 4.7 – Efeito da variação da espessura do flange do enrijecedor, t_f , na curva “tensão–deformação” do painel enrijecido

Como outra forma de visualizar a influência deste parâmetro na resistência à flambagem, é exibida a relação entre espessura do flange do enrijecedor, t_f , e tensão última, σ_u , na Figura 4.8.

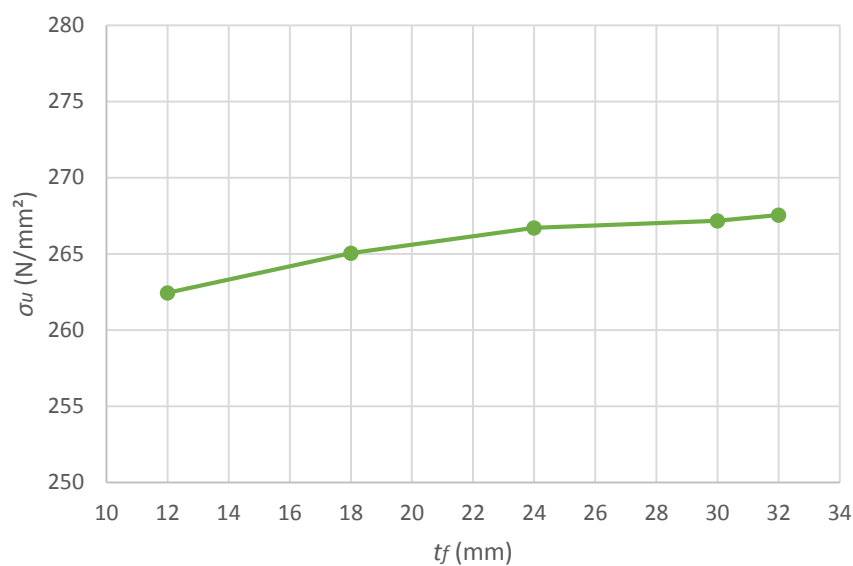


Figura 4.8 – Efeito da variação da espessura do flange, t_f , na tensão última, σ_u

Os valores da Figura 4.7 são apresentados de forma relativa, em relação à tensão de escoamento e à deformação inicial do material, na Figura 4.9.

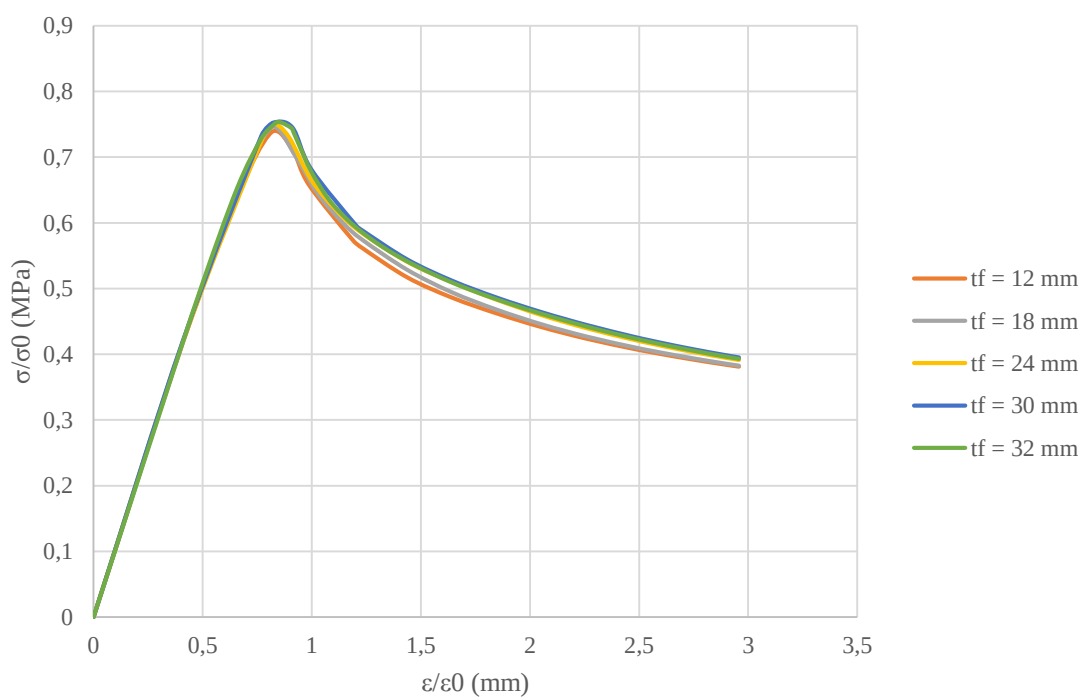


Figura 4.9 – Efeito da variação da espessura do flange, t_f , na resistência à flambagem

A pequena influência da variação do parâmetro em questão na determinação da tensão crítica é notável, observando as Figuras 4.7, 4.8 e 4.9. Um aumento de 20 mm na espessura do flange do reforço leva a uma melhora de apenas 5,11 MPa no valor de pico da tensão.

No comportamento pós-flambagem, representado pelo ramo descendente da curva, esta influência é um pouco mais significativa, mas, ainda assim, pequena, principalmente a partir da espessura do flange de 24 mm.

Comparando as curvas da Figura 4.9 com as curvas de Grondin, Sheikh e Elwi (2001) apresentadas na Figura 3.30 do capítulo anterior, nota-se que a variação da espessura do flange dos enrijecedores não altera o modo de flambagem. Todos painéis aparentam ter falhado por *tripping*.

4.4. Combinações dos Parâmetros

Com o objetivo de identificar a combinação de parâmetros que leva ao aumento da carga última de flambagem dos painéis enrijecidos, foram feitos arranjos dos valores de espessura de placa, alma do enrijecedor e flange do enrijecedor.

Dada a grande influência da variação da espessura de placa, t_p , na resistência à flambagem, todos os valores deste parâmetro testados anteriormente (9, 13, 15 e 17 mm) serão considerados nesta etapa.

Visto que a variação da espessura da alma do enrijecedor, t_w , apresentou pouca influência na resistência à flambagem, serão incluídos, nos arranjos, os valores imediatamente superior e inferior ao do painel base (9 e 13 mm), com a finalidade de avaliar os efeitos de uma variação total de 4 mm nos resultados.

O aumento da espessura do flange do enrijecedor, t_f , foi o que gerou menor ganho de resistência à flambagem dos painéis e, portanto, serão considerados, para as combinações, o menor e o maior valor do parâmetro (12 e 32 mm).

No total, foram modelados 16 painéis, cujas combinações de parâmetros são apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Combinações de parâmetros (Continua)

Caso	1	2	3	4	5	6	7	8
t_p (mm)	9	9	9	9	13	13	13	13
t_w (mm)	9	13	9	13	9	13	9	13
t_f (mm)	12	12	32	32	12	12	32	32

Tabela 4.4 – Combinações de parâmetros (Conclusão)

Caso	9	10	11	12	13	14	15	16
t_p (mm)	15	15	15	15	17	17	17	17
t_w (mm)	9	13	9	13	9	13	9	13
t_f (mm)	12	12	32	32	12	12	32	32

Para facilitar a visualização dos resultados, os gráficos que relacionam tensão, σ , e deformação, ε , são apresentados separados em quatro grupos, exibidos nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10. Estes grupos foram definidos pela espessura da placa, t_p , dos modelos, uma vez que, de acordo com o observado na etapa anterior, este é o parâmetro que mais interfere nos resultados. Nas legendas das séries dos gráficos, as espessuras estão em milímetros.

Os resultados das tensões últimas, σ_u , para cada caso, encontram-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Tensão última, σ_u , dos casos

Caso	σ_u (MPa)
1	210,778
2	225,042
3	217,613
4	239,140
5	236,605
6	247,200
7	242,880
8	254,162
9	259,389
10	265,845
11	264,585
12	270,195
13	277,339
14	281,193
15	282,276
16	287,402

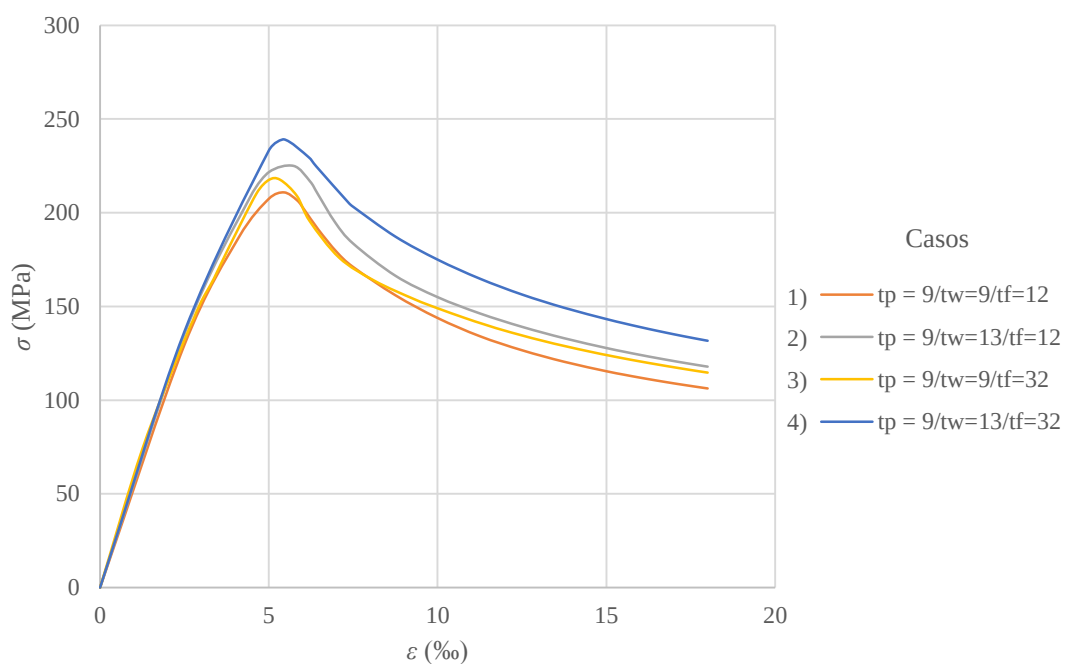


Figura 4.10 – Curvas “tensão–deformação” dos casos com espessura $t_p = 9$ mm

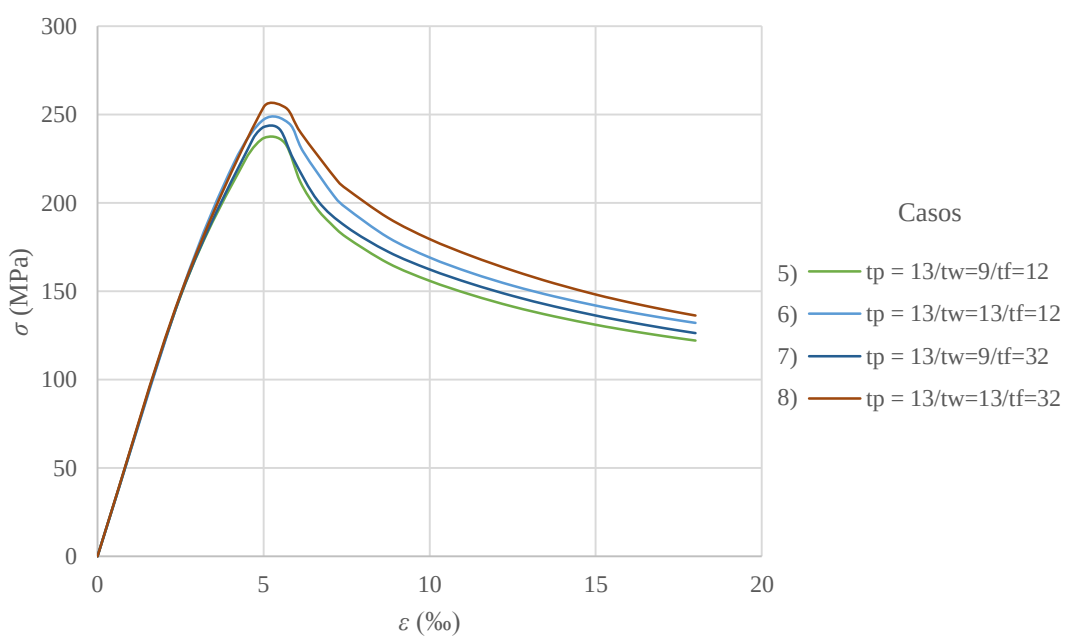


Figura 4.11 – Curvas “tensão–deformação” dos casos com espessura $t_p = 13$ mm

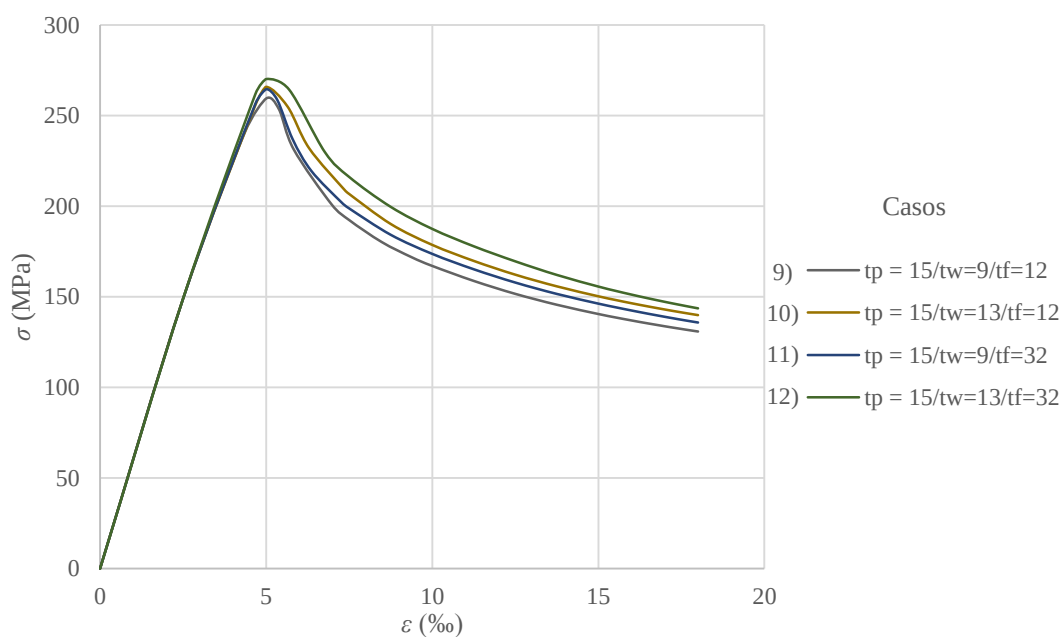


Figura 4.12 – Curvas “tensão–deformação” dos casos com espessura $t_p = 15$ mm

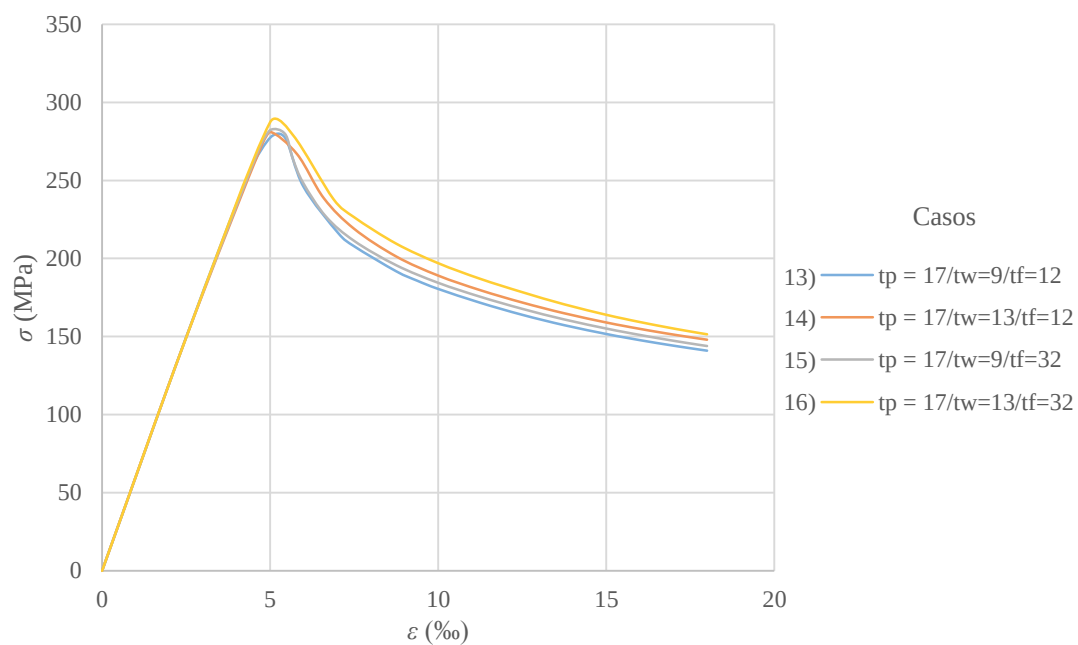


Figura 4.13 – Curvas “tensão–deformação” dos casos com espessura $t_p = 17$ mm

As imagens geradas através das análises não-lineares do ANSYS, correspondentes às deformadas dos painéis com distribuição de tensão de Von Mises, acompanhadas das respectivas curvas “tensão–deformação” relativas, encontram-se no Anexo C.

Os resultados destas análises ratificam que o parâmetro com maior influência na resistência à flambagem é a espessura da placa, t_p .

Nas análises dos Casos de 1 a 8, um incremento de 4 mm na espessura da alma do enrijecedor, t_w , é capaz de produzir uma melhora no valor da carga última equivalente ao dobro da melhora gerada por um aumento de 20 mm na espessura do flange, t_f . Nos Casos de 9 a 12, as mesmas mudanças na espessura da alma e flange geram efeitos semelhantes na resistência à flambagem.

Assim, nos Casos de 1 a 12, observa-se que o aumento da espessura da alma do enrijecedor apresenta um efeito maior que o aumento da espessura do flange do enrijecedor. Já nos Casos de 13 a 16, os quais pertencem ao grupo de maior espessura de placa, t_p , esta situação se inverte e um incremento de 20 mm na espessura do flange do enrijecedor leva a um valor de carga última maior que um incremento de 4 mm na espessura da alma.

O Caso 16, com espessura de placa igual a 17 mm, espessura de alma do enrijecedor igual a 13 mm e espessura de flange do enrijecedor igual a 32 mm, é o que apresenta maior resistência à flambagem, visto que com esta combinação foi encontrado o maior valor de carga última de flambagem.

4.5. Comparação dos Resultados

Para verificar, de forma simplificada, se os resultados encontrados referentes à tensão última de flambagem das combinações realizadas nos estudos paramétricos são coerentes e estão dentro da margem exigida por norma, adotou-se uma metodologia proposta por Zhang e Khan (2009).

Estes pesquisadores, com base em especificações normativas, métodos analíticos, testes experimentais, aproximações empíricas e simulações não-lineares através do MEF, desenvolveram formulações capazes de determinar, aproximadamente, uma tensão última de

flambagem desejada para um painel enrijecido, de acordo com seus parâmetros geométricos e das propriedades de seu material.

A diferença entre os resultados aqui obtidos por modelagem computacional e o valor estimado por Zhang e Khan (2009) é aceitável até 10%.

Primeiramente, deve-se calcular a razão de esbeltez da placa, β_p , e a razão de esbeltez do enrijecedor, λ_s , de acordo com as equações (4.1) e (4.2).

$$\beta_p = \frac{b}{t_p} \sqrt{\frac{\sigma_0}{E}} \quad (4.1)$$

$$\lambda_s = \frac{a}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_0}{E}} \quad (4.2)$$

Nas equações (4.1) e (4.2), b é a distância entre dois enrijecedores consecutivos, t_p é a espessura da chapa, σ_0 é a tensão de escoamento do aço, E é o módulo de elasticidade do material, a é o comprimento do enrijecedor, π é a constante numérica e r é o raio de giração, dado, a seguir, pela equação (4.3):

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (4.3)$$

Na expressão (4.3), I é o momento de inércia centroidal da seção transversal do enrijecedor e um trecho da placa de largura, b , e A é a área desta mesma seção transversal.

Quando a razão de esbeltez do enrijecedor, λ_s , for menor que $\sqrt{2}$, torna-se possível estimar a tensão crítica de flambagem, σ_u , através da fórmula simplificada (4.4).

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_0} = \frac{1}{\beta_p^{0,28}} \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda_s^{3,2}}} \quad (4.4)$$

Caso o valor de β_p seja inferior a 1, deve-se considera-lo como sendo 1 na fórmula (4.4).

Os resultados encontrados através desta formulação, bem como a diferença relativa entre os valores de tensão crítica, são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Comparação dos resultados

Caso	σ_u ANSYS (MPa)	σ_u Zhang e Khan (2009) (MPa)	Diferença
1	210,778	227,801	7,47%
2	225,042	229,011	1,73%
3	217,613	232,735	6,50%
4	239,140	232,741	2,75%
5	236,605	248,438	4,76%
6	247,200	250,965	1,50%
7	242,880	256,022	5,13%
8	254,162	256,438	0,89%
9	259,389	256,398	1,17%
10	265,845	259,645	2,39%
11	264,585	265,401	0,31%
12	270,195	266,050	1,56%
13	277,339	263,248	5,35%
14	281,193	267,243	5,22%
15	282,276	273,708	3,13%
16	287,402	274,607	4,66%

Observa-se que a diferença relativa é bastante inferior a 10%. Este fato demonstra que a tensão última de todos painéis modelados nas combinações paramétricas está adequada e dentro da margem esperada.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. Conclusões

Para que o objetivo principal desta dissertação fosse atingido, foi necessário executar, inicialmente, uma série de tarefas secundárias.

Primeiramente foi feita a revisão bibliográfica sobre o assunto. Nesta etapa, foram considerados diversos estudos sobre: análises lineares e não-lineares de placas e painéis enrijecidos através de softwares de elementos finitos, escolha de elemento finito para a modelagem computacional de painéis reforçados, ensaios de laboratórios com painéis, formulações alternativas para cálculo de resistência à flambagem, dentre outros.

Com base nos estudos iniciais, em seguida foi iniciada a fase de desenvolvimento do modelo numérico através do software ANSYS. Com o modelo pronto, foi feita a sua verificação e validação. Para isto, os resultados gerados pela modelagem numérica proposta foram comparados com tradicionais soluções analíticas, modelagens desenvolvidas por outros pesquisadores, os quais não utilizaram apenas o ANSYS, mas também o programa ABAQUS, e, por fim, foram feitas as comparações com os resultados de um modelo experimental reduzido de painel enrijecido.

Tanto a verificação, analisando as soluções analíticas e soluções computacionais elásticas e inelásticas de outros pesquisadores, como a validação, através da análise de um painel reduzido testado em laboratório, mostraram que a modelagem desenvolvida no presente trabalho levou a resultados coerentes e confiáveis.

O objetivo principal desta dissertação foi analisar o comportamento não-linear de painéis enrijecidos sob flambagem. Para tal, desenvolveu-se um estudo paramétrico, com a finalidade de encontrar um conjunto de parâmetros capaz de melhorar significativamente a resistência à flambagem em relação ao painel base, inicialmente estudado.

O parâmetro que apresenta maior influência na determinação da carga última de flambagem é a espessura da placa, t_p . Um aumento de 8 mm nesta variável leva a um ganho de 24,67% na

resistência à flambagem. A tensão última do painel com espessura de placa igual a 17 mm corresponde a mais de 80% da tensão de escoamento do material.

Desta forma, confirma-se a importância de utilizar placas com espessura significativa, para que os painéis sejam mais resistentes.

O segundo parâmetro cujos efeitos de sua variação mais interferiram na resistência à flambagem dos painéis é a espessura da alma do enrijecedor, t_w . Aumentando-se em 6 mm esta variável geométrica, tem-se uma melhora na resistência à flambagem do painel 3,42%. A tensão última do painel com alma de enrijecedor mais robusta, com 13 mm de espessura, é de 76,11% da tensão de escoamento do aço AH-36.

O parâmetro que menos influenciou na tensão última dos painéis é a espessura do flange do enrijecedor, t_f . No estudo deste parâmetro foi testada a maior variação, sendo que o aumento de 20 mm na espessura do flange leva a um pequeno ganho de 1,95%.

No estudo das combinações paramétricas, concluiu-se que o Modelo 16, cujas espessuras de placa, alma do reforço e flange do reforço, respectivamente, são iguais a 17 mm, 13 mm e 32 mm, foi o que apresentou melhor comportamento em relação à resistência à flambagem, levando a uma carga última igual a 287,40 MPa. Este valor é 74,24% maior que o encontrado na análise do painel base, cujas espessuras de placa, alma do reforço e flange do reforço são iguais a 15 mm, 11 mm e 32 mm, respectivamente.

Observa-se, novamente, a forte influência do aumento na espessura da placa na determinação da carga última.

Sendo assim, torna-se essencial um estudo prévio no projeto de painéis enrijecidos, afim de avaliar a melhora efetiva e julgar, desta forma, se é, e o quanto é, vantajoso o uso de enrijecedores com alma e flange mais espessos, evitando desperdício de material e, com isso, de custos de produção.

Para finalizar o estudo, foi feita mais uma verificação. Desta vez, comparou-se os resultados das combinações paramétricas, através da modelagem numérica proposta, com os resultados encontrados através de uma metodologia proposta por pesquisadores que consideraram em seus cálculos as recomendações e especificações normativas.

Nesta parte final da dissertação, a maior diferença encontrada é menor que 8%, sendo que são aceitas diferenças de até 10%. Assim, todos valores de tensão última encontrados nas combinações de parâmetros – etapa correspondente ao objetivo principal – são adequados e

dentro da margem esperada, apresentando boa concordância com os valores estipulados por normas, métodos analíticos, empíricos, entre outros.

Através dos estudos realizados neste trabalho, pode-se concluir que é de extrema importância para o desenvolvimento da indústria naval e offshore o estudo do comportamento de painéis enrijecidos, para que seja feito um bom dimensionamento, sem negligenciar os efeitos da flambagem, visto que estas peças são a base da estrutura de navios e plataformas.

5.2. Sugestões de Trabalhos Futuros

Para a realização de trabalhos futuros dentro do tema, são feitas as seguintes sugestões:

- Estudo de painéis enrijecidos com reforços de diferentes seções, afim de verificar a influência de sua variação e definir qual seção leva ao melhor comportamento em relação à flambagem;
- Considerar tensões residuais nas análises;
- Aplicar outras imperfeições iniciais, diferentes das utilizadas no presente trabalho;
- Modelar painéis com materiais compósitos;
- Variar mais parâmetros, como o comprimento do painel, a , a altura dos enrijecedores, h_w , e a largura do flange, b_f , e analisar os efeitos na determinação da tensão crítica de flambagem;
- Valer-se dos princípios da Teoria Constructal e da Análise Dimensional, para reduzir as variáveis estudadas.

ANEXOS

ANEXO A.1

VALORES DO FATOR k PARA PAINÉIS ENRIJECIDOS COM UM REFORÇO LONGITUDINAL

β	$\gamma = 5$			$\gamma = 10$			$\gamma = 15$			$\gamma = 20$			$\gamma = 25$		
	$\delta = 0,05$	$\delta = 0,10$	$\delta = 0,15$	$\delta = 0,05$	$\delta = 0,10$	$\delta = 0,15$	$\delta = 0,05$	$\delta = 0,10$	$\delta = 0,15$	$\delta = 0,05$	$\delta = 0,10$	$\delta = 0,15$	$\delta = 0,05$	$\delta = 0,10$	$\delta = 0,15$
0,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
0,8	15,4	14,6	13,0	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8
1,0	12,0	11,1	9,72	16,0	16,0	15,8	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0
1,2	9,83	9,06	7,88	15,3	14,2	12,4	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
1,4	8,62	7,91	6,82	12,9	12,0	10,3	16,1	15,7	13,6	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1
1,6	8,01	7,38	6,32	11,4	10,6	9,05	14,7	13,6	11,8	16,1	16,1	14,4	16,1	16,1	16,1
1,8	7,84	7,19	6,16	10,6	9,70	8,35	13,2	12,2	10,5	15,9	14,7	12,6	16,2	16,2	14,7
2,0	7,96	7,29	6,24	10,2	9,35	8,03	12,4	11,4	9,80	14,6	13,4	11,6	16,0	15,4	13,3
2,2	8,28	7,58	6,50	10,2	9,30	7,99	12,0	11,0	9,45	13,9	12,7	10,9	15,8	14,5	12,4
2,4	8,79	8,06	6,91	10,4	9,49	8,15	11,9	10,9	9,37	13,5	12,4	10,6	15,1	13,8	11,9
2,6	9,27	8,50	7,28	10,8	9,86	8,48	12,1	11,1	9,53	13,5	12,4	10,6	14,8	13,6	11,6
2,8	8,62	7,91	6,31	11,4	10,4	8,94	12,5	11,5	9,85	13,7	12,6	10,8	14,8	13,6	11,6
3,0	8,31	7,62	6,53	12,0	11,1	9,52	13,1	12,0	10,3	14,1	13,0	11,1	15,2	13,9	11,9
3,2	8,01	7,38	6,32	11,4	10,5	9,05	13,9	12,7	10,9	14,8	13,5	11,6	15,6	14,3	12,3
3,6	7,84	7,19	6,16	106,	9,70	8,35	13,2	12,2	10,5	15,9	14,7	12,6	16,2	15,7	13,5
4,0	7,96	7,29	6,24	10,2	9,35	8,03	12,4	11,4	9,80	14,6	13,4	11,6	16,0	15,4	13,3

Fonte: Timoshenko, S. P. e Gere, J. M.: Theory of Elastic Stability. McGraw-Hill; 1963.

ANEXO A.2

VALORES DO FATOR k PARA PAINÉIS ENRIJECIDOS COM DOIS REFORÇOS LONGITUDINAIS

β	$\gamma = \frac{10}{3}$		$\gamma = 5$		$\gamma = \frac{20}{3}$		$\gamma = 10$	
	$\delta = 0,05$	$\delta = 0,10$	$\delta = 0,05$	$\delta = 0,10$	$\delta = 0,05$	$\delta = 0,10$	$\delta = 0,05$	$\delta = 0,10$
0,6	26,8	24,1	36,4	33,2	36,4	36,4	36,4	36,4
0,8	16,9	15,0	23,3	20,7	29,4	26,3	37,2	37,1
1,0	12,1	10,7	16,3	14,5	20,5	18,2	28,7	25,6
1,2	9,61	8,51	12,6	11,2	15,5	13,8	21,4	19,0
1,4	8,32	7,36	10,5	9,32	12,7	11,3	17,2	15,2
1,6	7,70	6,81	9,40	8,31	11,1	9,82	14,5	12,8
1,8	7,51	6,64	8,85	7,83	10,2	9,02	12,9	11,4
2,0	7,61	6,73	8,70	7,69	9,78	8,65	11,9	10,6

Fonte: Timoshenko, S. P. e Gere, J. M.: Theory of Elastic Stability. McGraw-Hill; 1963.

ANEXO B

SCRIPT DA MODELAGEM DE UM PAINEL ENRIJECIDO NO ANSYS

```
/BATCH
!/COM,ANSYS RELEASE 12.1  UP20091102
23:07:19  11/03/2014
/input,menust,tmp,",,,,,,,,,,,,,1
!/GRA,POWER
!/GST,ON
!/PLO,INFO,3
!/GRO,CURL,ON
!/CPLANE,1
!/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,0
*SET,E,210000
*SET,fy,355
*SET,v,,30
*SET,e2,0
*SET,w0,1
*SET,hw,300
*SET,bp,900
*SET,a,3600
*SET,tw,11
*SET,tp,15
*SET,bm,44
*SET,tm,32
*SET,p,1
*SET,esx,100
*SET,esy,60
*SET,esz,200
!*
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
!/COM,
!/COM,Preferences for GUI filtering have been
set to display:
!/COM, Structural
!*
/PREP7
!*
ET,1,SHELL93
!*
R,1,tp,,,,,
!*
R,2,tw,0,0,0,0,0,
!*
R,3,tm,0,0,0,0,0,
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,e
MPDATA,PRXY,1,,v
K,,0,0,0,
K,,0,hw,0,
K,,0,hw,0,
K,,0,hw,bm,
!/VIEW,1,1,1,1
!/ANG,1
!/REP,FAST
FLST,2,4,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-4
KDELE,P51X
K,,0,0,0,
K,,0,hw,0,
K,,bm,hw,0,
!/VIEW,1,,,1
!/ANG,1
!/REP,FAST
!/VIEW,1,1,1,1
!/ANG,1
!/REP,FAST
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
K,,0,0,a,
LSTR, 1, 4
ADRAG, 1,,,,, 3
!/VIEW,1,,,1
!/ANG,1
!/REP,FAST
!/VIEW,1,1,1,1
!/ANG,1
!/REP,FAST
! LPLOT
ADRAG, 2,,,,, 6
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 2
ESYS, 0
SECNUM,
!*
NUMMRG,ALL,, ,LOW
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 2
```

```

ESYS, 0
SECNUM,
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,3
FITEM,5,6
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,esz, , , , , ,1
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,4
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,esy, , , , , ,1
!*
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
!*
CM,_Y,AREA
ASEL,, , , 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 3
ESYS, 0
SECNUM,
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,6
FITEM,5,9
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,esz, , , , , ,1
!*
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 3
ESYS, 0
SECNUM,
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,7
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,esx, , , , , ,1
!*
CM,_Y,AREA
ASEL,, , , 2
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
FLST,3,2,5,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-2
FLST,3,2,5,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-2
AGEN,2,P51X, , ,bp, , , ,0
FLST,3,2,5,ORDE,2
FITEM,3,3
FITEM,3,-4
AGEN,2,P51X, , ,bp, , , ,0
FLST,3,2,5,ORDE,2
FITEM,3,5
FITEM,3,-6
AGEN,2,P51X, , ,bp, , , ,0
FLST,3,2,5,ORDE,2
FITEM,3,7
FITEM,3,-8
AGEN,2,P51X, , ,bp, , , ,0
FLST,3,2,5,ORDE,2
FITEM,3,9
FITEM,3,-10
AGEN,2,P51X, , ,bp, , , ,0
! EPLOT
! APLOT
FLST,2,4,3
FITEM,2,4
FITEM,2,10
FITEM,2,5
FITEM,2,1
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,10
FITEM,2,16
FITEM,2,13
FITEM,2,5
A,P51X
FLST,2,4,3

```

FITEM,2,16	! /PNUM,ELEM,0
FITEM,2,22	! /REPLOT
FITEM,2,19	!*
FITEM,2,13	TYPE, 1
A,P51X	MAT, 1
FLST,2,4,3	REAL, 1
FITEM,2,22	ESYS, 0
FITEM,2,28	SECNUM,
FITEM,2,25	!*
FITEM,2,19	! /PNUM,KP,0
A,P51X	! /PNUM,LINE,1
FLST,2,4,3	! /PNUM,AREA,0
FITEM,2,28	! /PNUM,VOLU,0
FITEM,2,34	! /PNUM,NODE,0
FITEM,2,31	! /PNUM,TABN,0
FITEM,2,25	! /PNUM,SVAL,0
A,P51X	! /NUMBER,0
TYPE, 1	!*
MAT, 1	! /PNUM,ELEM,0
REAL, 1	! /REPLOT
ESYS, 0	!*
SECNUM,	! /PNUM,KP,0
!*	! /PNUM,LINE,0
NUMMRG,ALL, , , ,LOW	! /PNUM,AREA,0
ALLSEL,ALL	! /PNUM,VOLU,0
TYPE, 1	! /PNUM,NODE,0
MAT, 1	! /PNUM,TABN,0
REAL, 1	! /PNUM,SVAL,0
ESYS, 0	! /NUMBER,0
SECNUM,	!*
!*	! /PNUM,ELEM,0
TYPE, 1	! /REPLOT
MAT, 1	!*
REAL, 1	FLST,5,6,4,ORDE,6
ESYS, 0	FITEM,5,3
SECNUM,	FITEM,5,11
!*	FITEM,5,18
! LPLOT	FITEM,5,25
! /PNUM,KP,0	FITEM,5,32
! /PNUM,LINE,1	FITEM,5,39
! /PNUM,AREA,0	CM,_Y,LINE
! /PNUM,VOLU,0	LSEL, , , ,P51X
! /PNUM,NODE,0	CM,_Y1,LINE
! /PNUM,TABN,0	CMSEL,,_Y
! /PNUM,SVAL,0	!*
! /NUMBER,0	LESIZE,_Y1,esz, , , , , ,1
!*	!*
! /PNUM,ELEM,0	FLST,5,10,4,ORDE,2
! /REPLOT	FITEM,5,43
!*	FITEM,5,-52
! APLOT	CM,_Y,LINE
! /PNUM,KP,0	LSEL, , , ,P51X
! /PNUM,LINE,0	CM,_Y1,LINE
! /PNUM,AREA,0	CMSEL,,_Y
! /PNUM,VOLU,0	!*
! /PNUM,NODE,0	LESIZE,_Y1,esx, , , , , ,1
! /PNUM,TABN,0	!*
! /PNUM,SVAL,0	! /PNUM,KP,0
! /NUMBER,0	! /PNUM,LINE,0
!*	! /PNUM,AREA,1

```

! /PNUM,VOLU,0
! /PNUM,NODE,0
! /PNUM,TABN,0
! /PNUM,SVAL,0
! /NUMBER,0
!*
! /PNUM,ELEM,0
! /REPLOT
!*
! /PNUM,KP,0
! /PNUM,LINE,0
! /PNUM,AREA,0
! /PNUM,VOLU,0
! /PNUM,NODE,0
! /PNUM,TABN,0
! /PNUM,SVAL,0
! /NUMBER,0
!*
! /PNUM,ELEM,0
! /REPLOT
!*
FLST,5,5,5,ORDE,2
FITEM,5,13
FITEM,5,-17
CM,_Y,AREA
ASEL,, , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
FINISH
/SOL
!*
ANTYPE,0
LSEL,S,LOC,Z,0
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,5
FITEM,2,12
FITEM,2,15
FITEM,2,19
FITEM,2,22
FITEM,2,26
FITEM,2,29
FITEM,2,33
FITEM,2,36
FITEM,2,40
FITEM,2,44
FITEM,2,46
FITEM,2,48
FITEM,2,50
FITEM,2,52
!*
/GO
DL,P51X, ,ALL,
LSEL,S,LOC,Z,a
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
!*
/GO
DL,P51X, ,UX,
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
!*
/GO
DL,P51X, ,UY,
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45

```

```

FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
!*
/GO
DL,P51X, ,ROTX,
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
!*
/GO
DL,P51X, ,ROTY,
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
!*
/GO
DL,P51X, ,ROTZ,
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38

```

```

FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
/GO
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
/GO
!*
SFL,P51X,PRES,p
ALLSEL,ALL
!*
ANTYPE,0
PSTRES,1
! /STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/SOLU
!*
ANTYPE,1
!*
BUCOPT,LANB,2,0,0,
!*
MXPAND,2,0,0,1,0.001,
! /STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
! /VIEW,1,1,1,1
! /ANG,1
! /REP,FAST
! /REPLOT,RESIZE
/PREP7
UPGEOM,1,1,1,'Painel 1','rst',' '
!*
/PREP7
!*
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,fy,e2,,
FINISH
/SOLU
LSEL,S,LOC,Z,a

```

```

! /VIEW,1,1,1,1
! /ANG,1
! /REP,FAST
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
SFLDELE,P51X,PRES
ALLSEL,ALL
!*
LSEL,S,LOC,Z,a
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
!*
/GO
DL,P51X, ,UZ,-5
ALLSEL,ALL
!*
CNVTOL,F, ,0.01,2, ,
!*
CNVTOL,U, ,0.01,2, ,
!*
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,10,100,10
PSTRES,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,w0
AUTOTS,1
EQLSV,SPAR

LNSRCH,0
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,100
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
TIME,5
LSWRITE,1,
!*
!*
LSEL,S,LOC,Z,a
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
!*
/GO
DL,P51X, ,UZ,-7.5
ALLSEL,ALL
!*
CNVTOL,F, ,0.01,2, ,
!*
CNVTOL,U, ,0.01,2, ,
!*
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,10,100,10
PSTRES,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,w0
AUTOTS,1
EQLSV,SPAR
LNSRCH,0
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,100
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
TIME,7.5
LSWRITE,2,
!*
!*
LSEL,S,LOC,Z,a
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21

```

```

FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
!*
/GO
DL,P51X, ,UZ,-10
ALLSEL,ALL
!*
CNVTOL,F, ,0.01,2, ,
!*
CNVTOL,U, ,0.01,2, ,
!*
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,10,100,10
PSTRES,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,w0
AUTOTS,1
EQLSV,SPAR
LNSRCH,0
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,100
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
TIME,10
LSWRITE,3,
!*
!*
LSEL,S,LOC,Z,a
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
!*
/GO
DL,P51X, ,UZ,-15
ALLSEL,ALL
!*
CNVTOL,F, ,0.01,2, ,
!*
CNVTOL,U, ,0.01,2, ,
!*
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,20,100,20
PSTRES,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,w0
AUTOTS,1
EQLSV,SPAR
LNSRCH,0
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,100
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
CNVTOL,F, ,0.01,2, ,
!*
CNVTOL,U, ,0.01,2, ,
!*
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,20,100,20
PSTRES,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,w0
AUTOTS,1
EQLSV,SPAR
LNSRCH,0
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,100
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
TIME,15
LSWRITE,4,
!*
!*
LSEL,S,LOC,Z,a
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
!*
/GO
DL,P51X, ,UZ,-17
ALLSEL,ALL
!*
CNVTOL,F, ,0.01,2, ,
!*
CNVTOL,U, ,0.01,2, ,
!*
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,20,100,20
PSTRES,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,w0
AUTOTS,1
EQLSV,SPAR
LNSRCH,0
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,100
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1

```

```
TIME,17
LSWRITE,5,
!*
!*
LSEL,S,LOC,Z,a
FLST,2,17,4,ORDE,17
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,17
FITEM,2,21
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,31
FITEM,2,35
FITEM,2,38
FITEM,2,42
FITEM,2,-43
FITEM,2,45
FITEM,2,47
FITEM,2,49
FITEM,2,51
!*

/GO
DL,P51X, ,UZ,-18
ALLSEL,ALL
!*
CNVTOL,F, ,0.01,2, ,
!*
CNVTOL,U, ,0.01,2, ,
!*
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,20,100,20
PSTRES,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,w0
AUTOTS,1
EQSLV,SPAR
LNSRCH,0
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,100
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
TIME,18
LSWRITE,6,
!*
FINISH
```

ANEXO C

DEFORMADAS DOS PAINÉIS E CURVAS “TENSÃO-DEFORMAÇÃO”

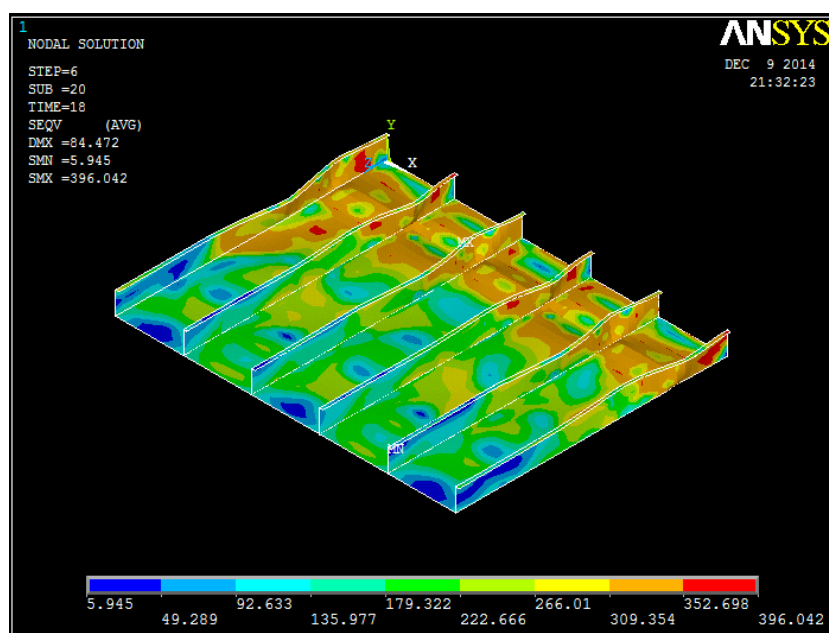


Figura C.1 – Tensões no Caso 1

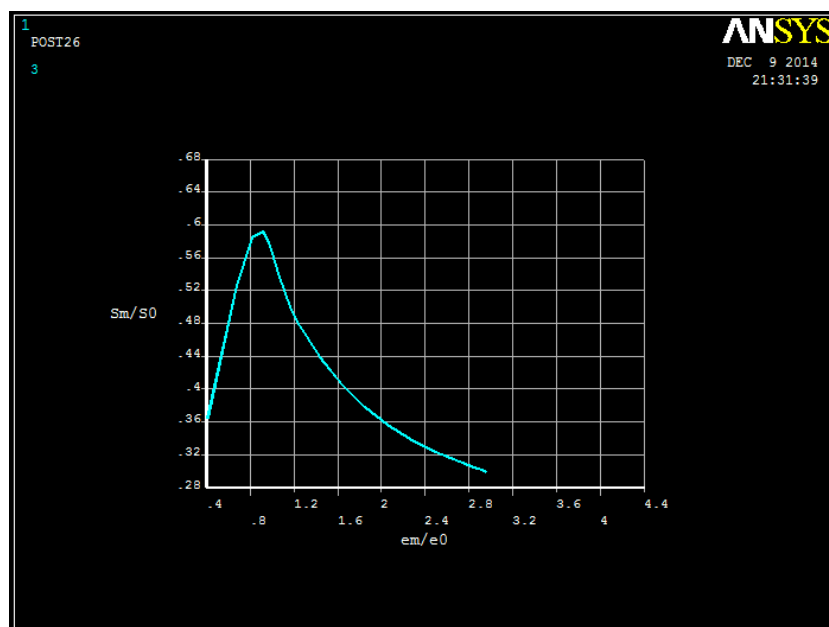


Figura C.2 – Curva “tensão – deformação” no Caso 1

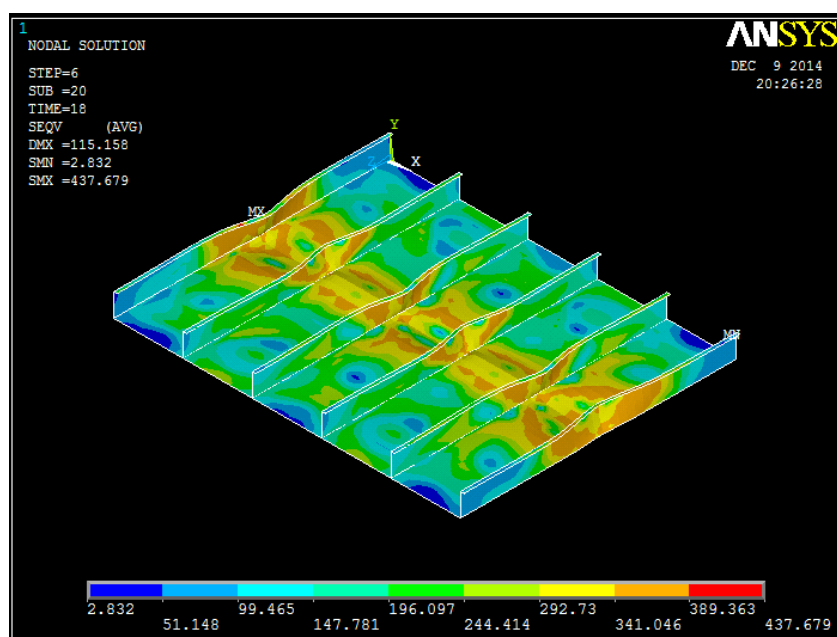


Figura C.3 – Tensões no Caso 2

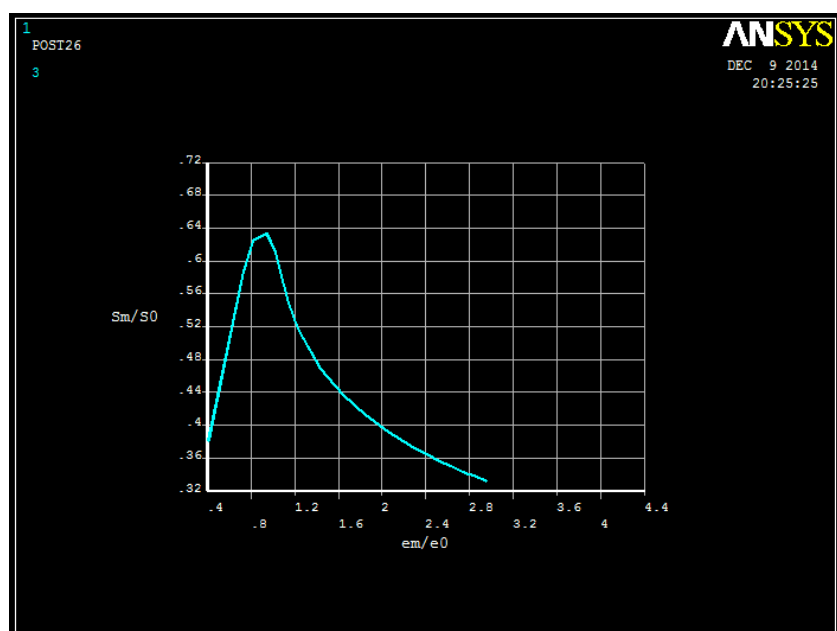


Figura C.4 – Curva “tensão – deformação” no Caso 2

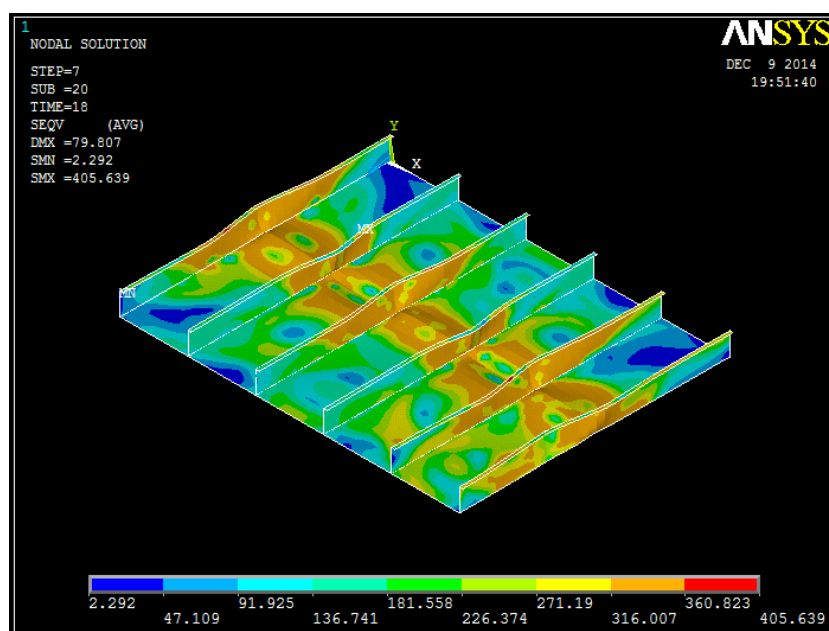


Figura C.5 – Tensões no Caso 3

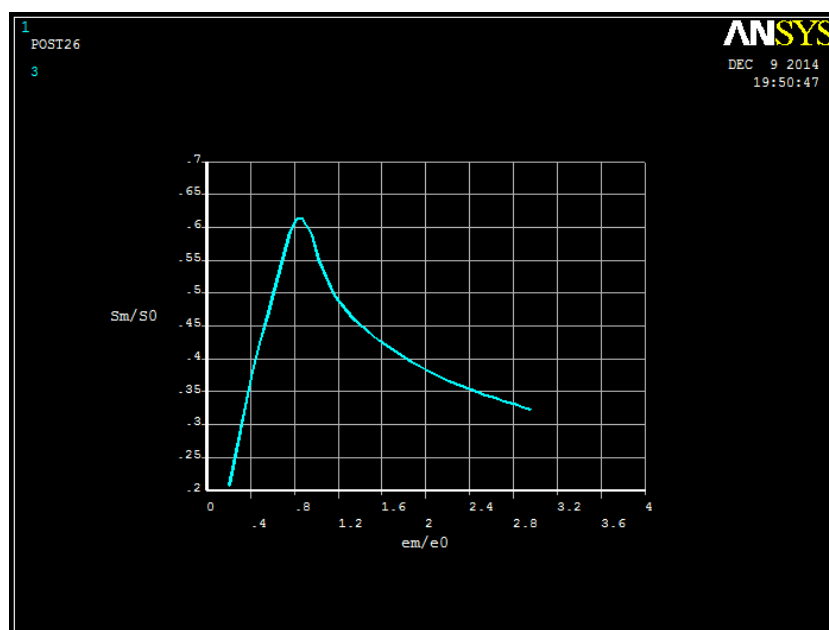


Figura C.6 – Curva “tensão – deformação” no Caso 3

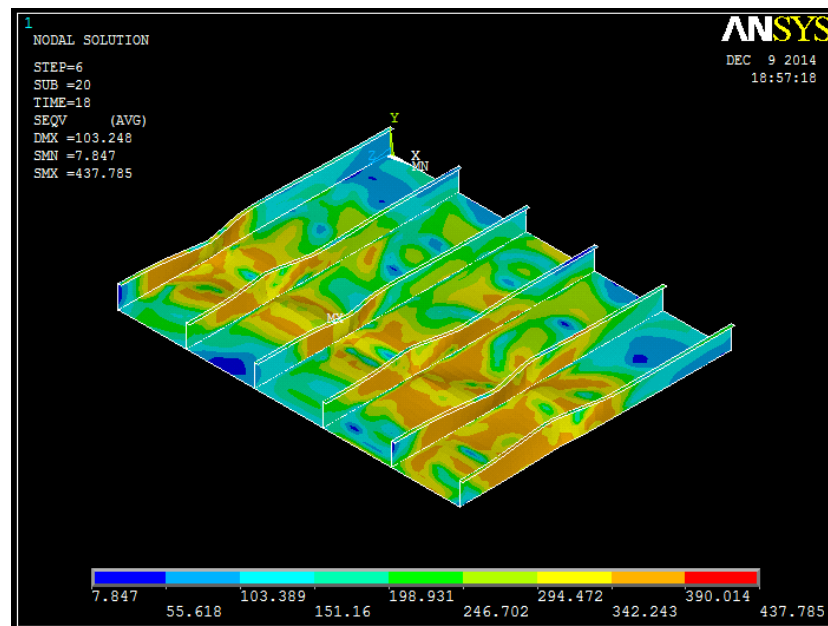


Figura C.7 – Tensões no Caso 4

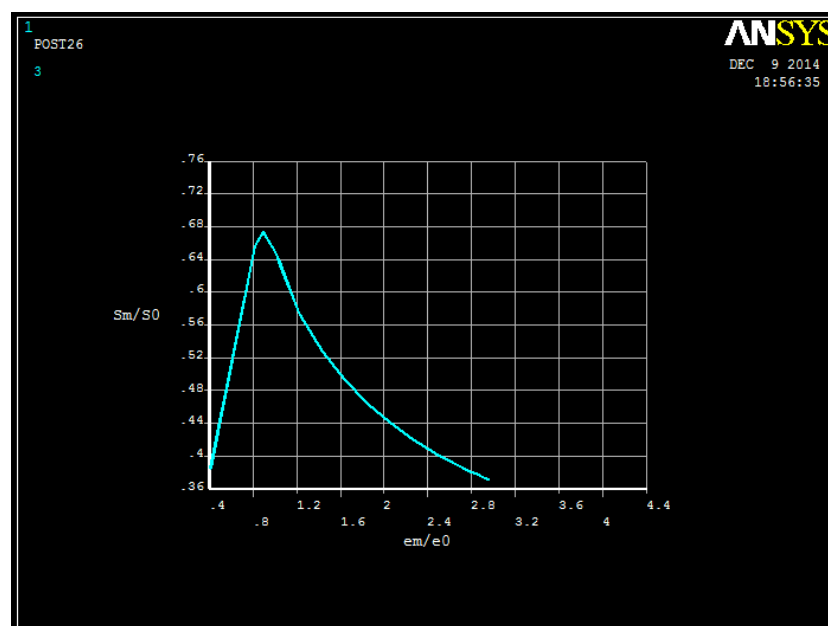


Figura C.8 – Curva “tensão – deformação” no Caso 4

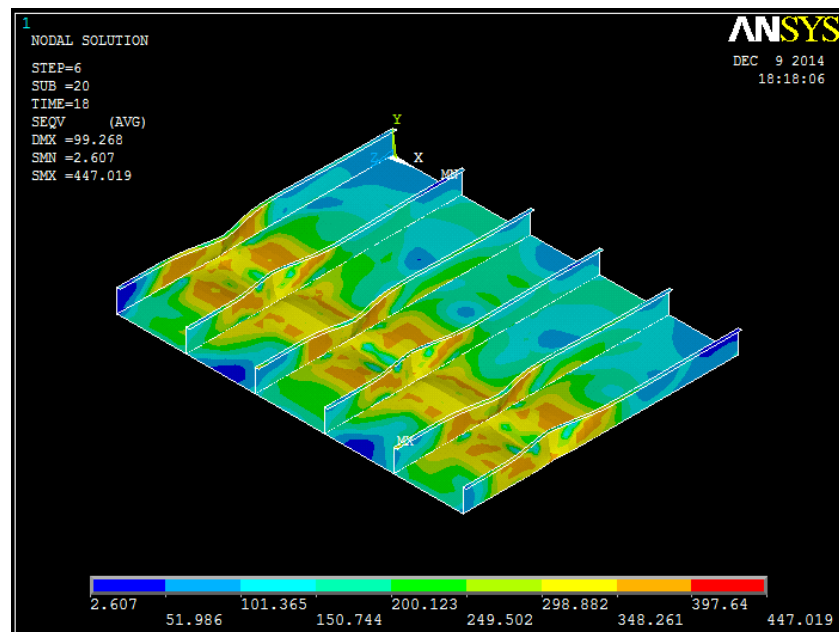


Figura C.9 – Tensões no Caso 5

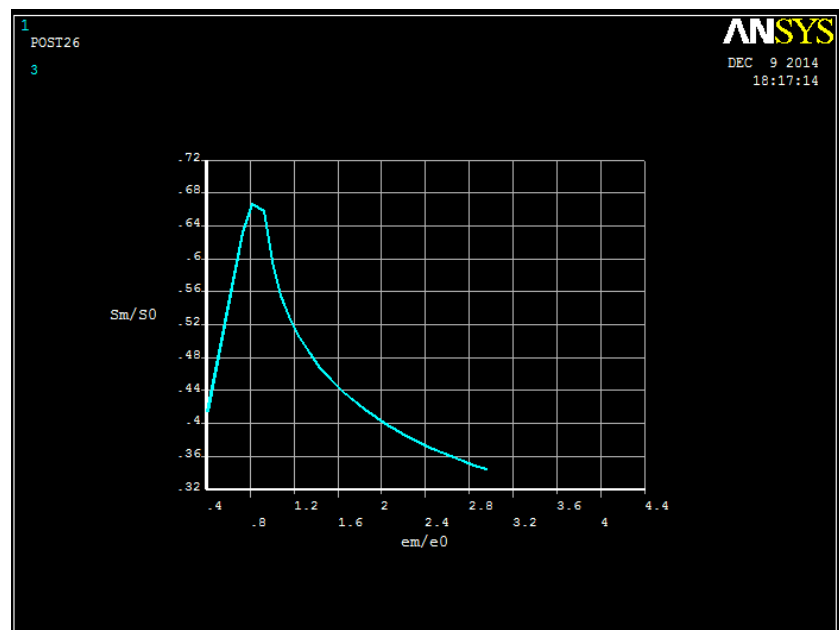


Figura C.10 – Curva “tensão – deformação” no Caso 5

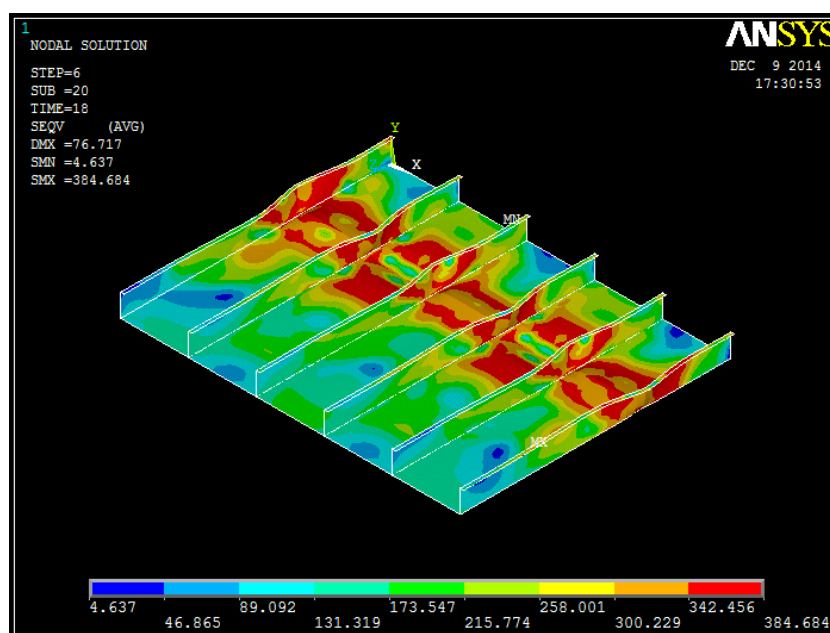


Figura C.11 – Tensões no Caso 6

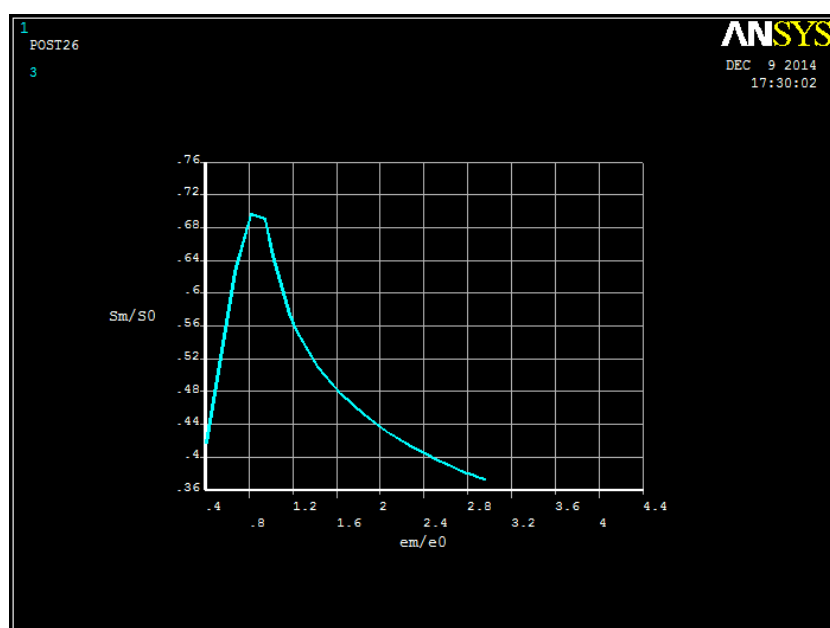


Figura C.12 – Curva “tensão – deformação” no Caso 6

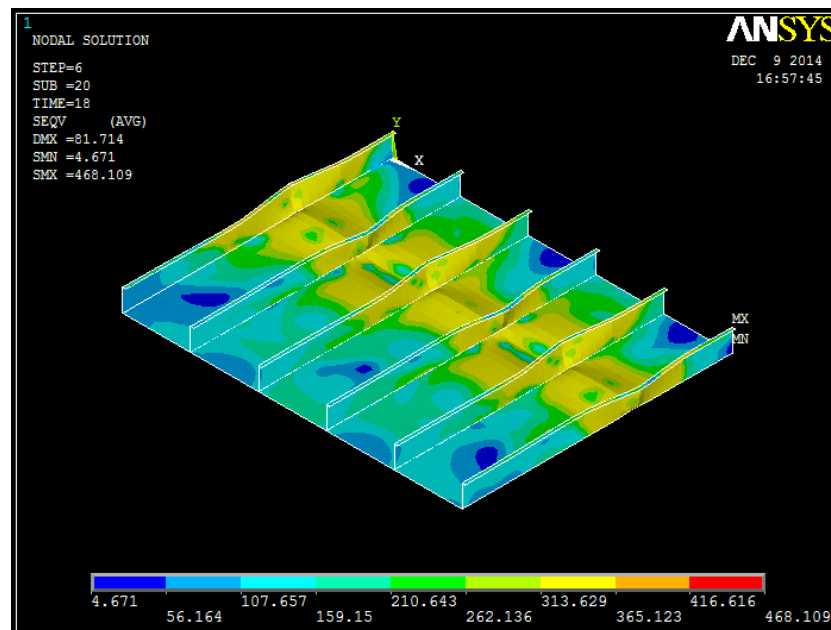


Figura C.13 – Tensões no Caso 7

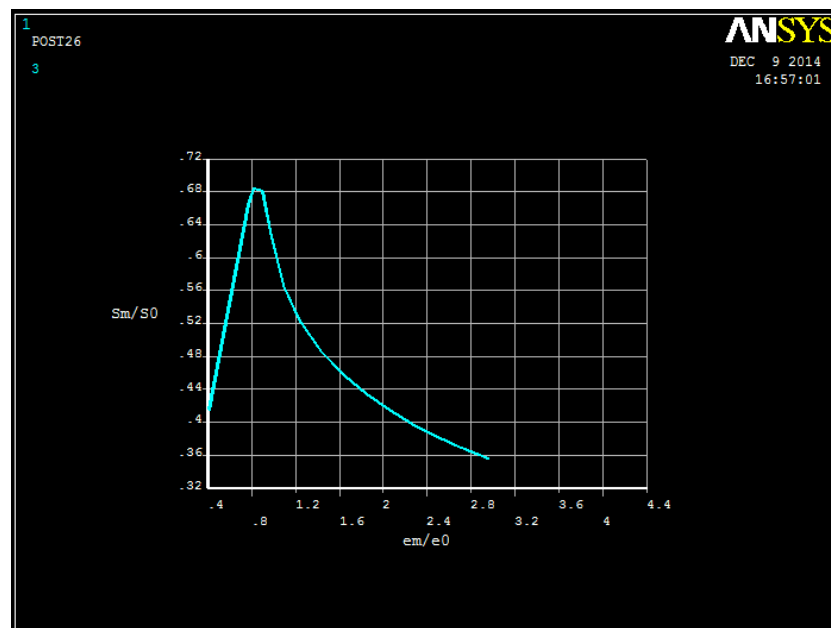


Figura C.14 – Curva “tensão – deformação” no Caso 7

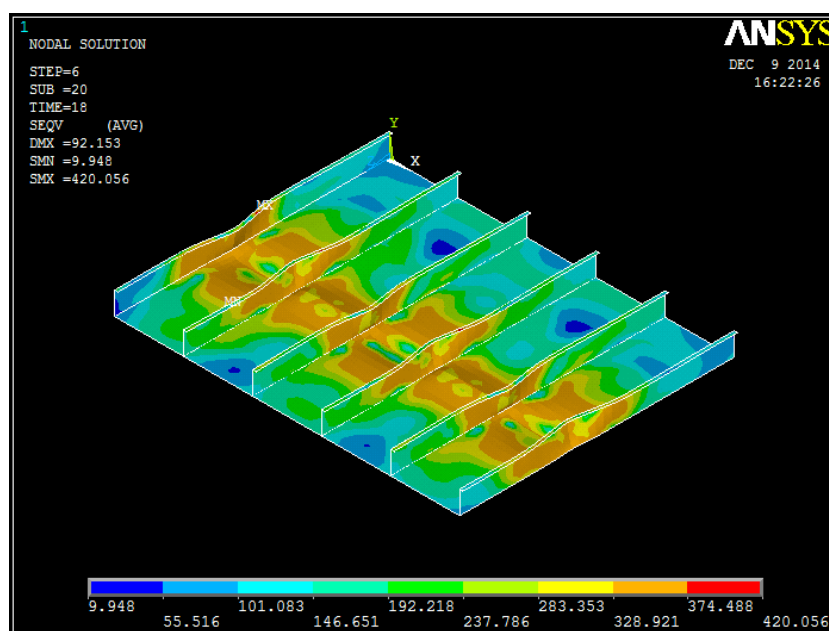


Figura C.15 – Tensões no Caso 8

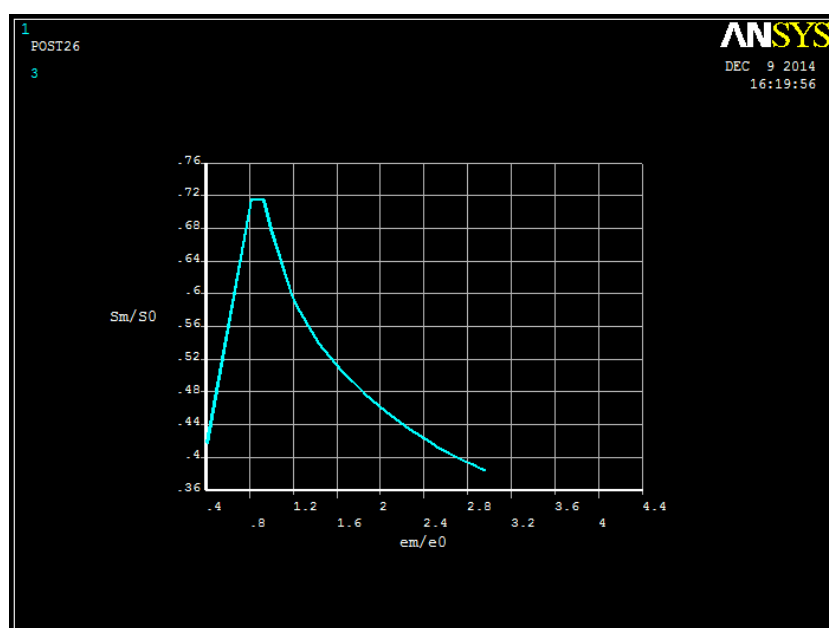


Figura C.16 – Curva “tensão – deformação” no Caso 8

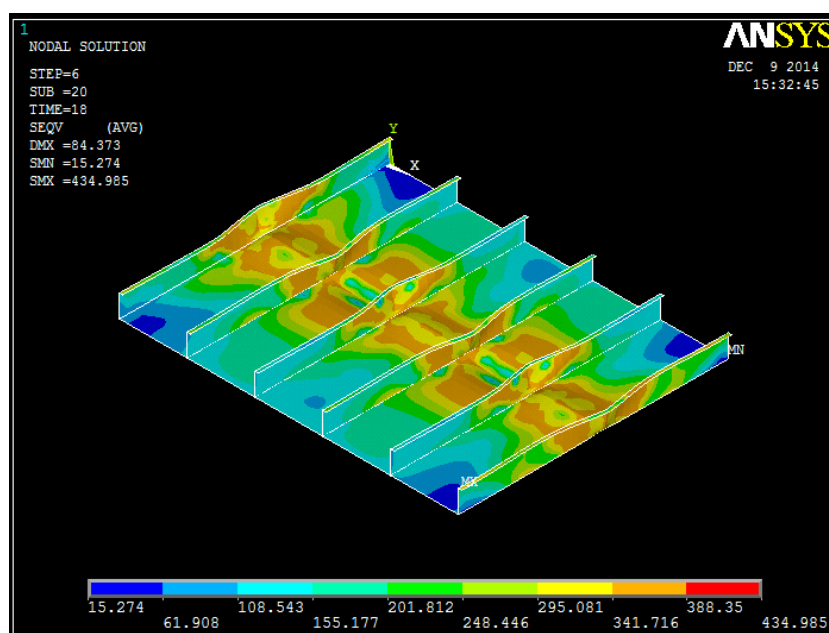


Figura C.17 – Tensões no Caso 9

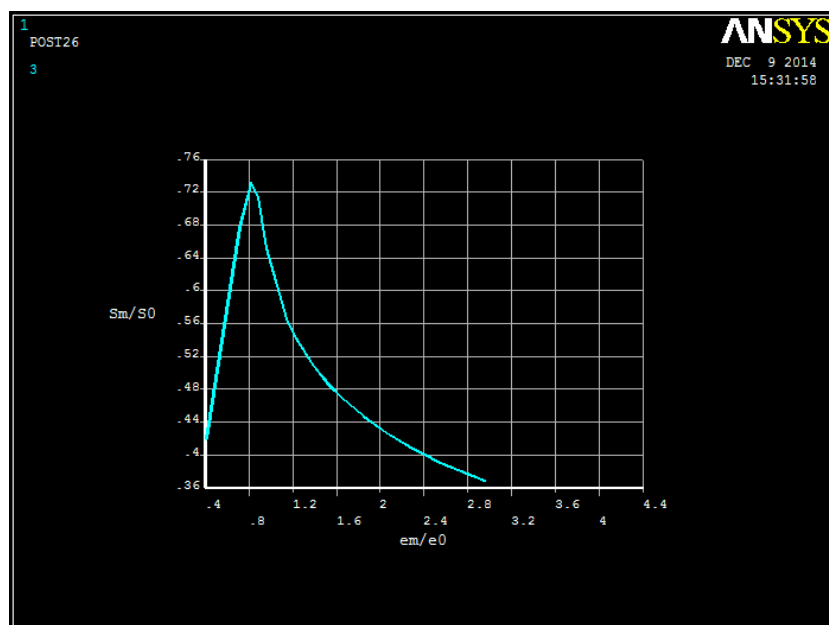


Figura C.18 – Curva “tensão – deformação” no Caso 9

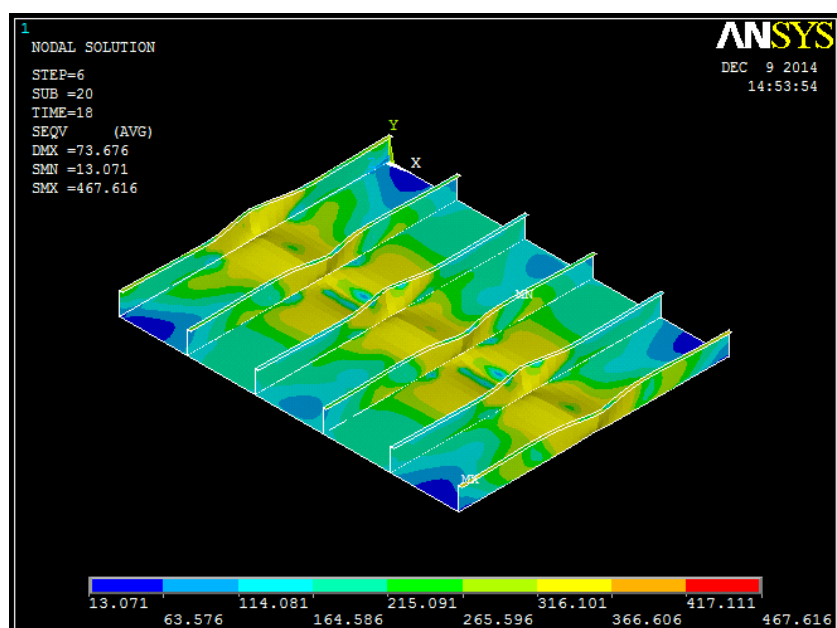


Figura C.19 – Tensões no Caso 10

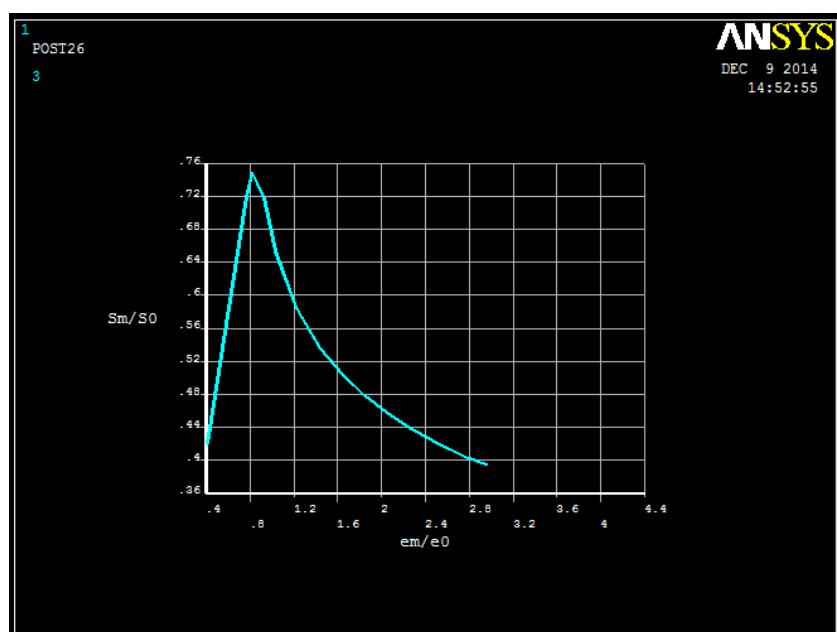


Figura C.20 – Curva “tensão – deformação” no Caso 10

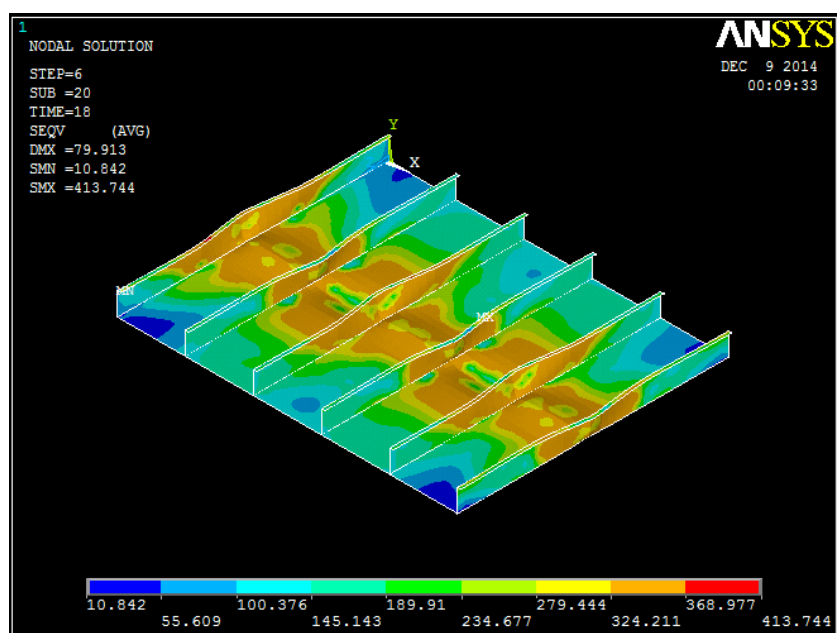


Figura C.21 – Tensões no Caso 11

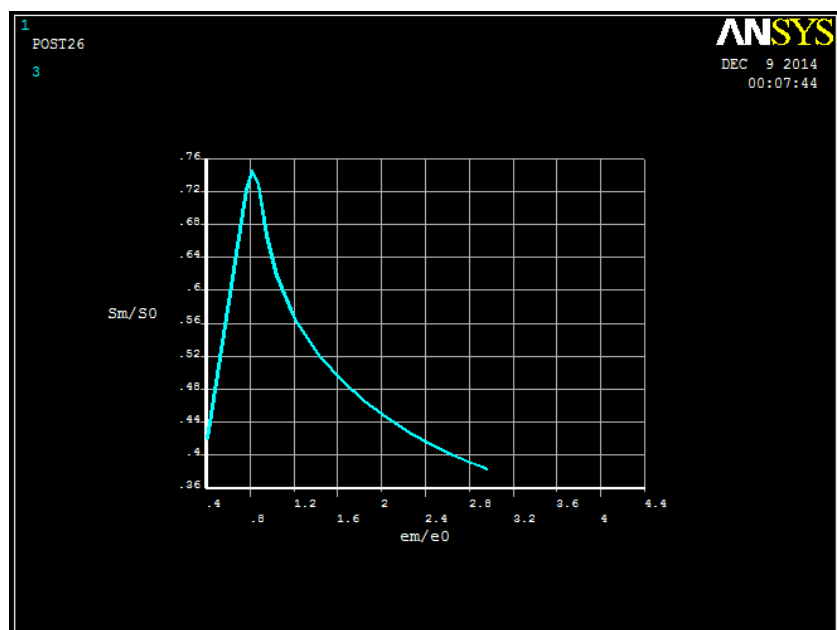


Figura C.22 – Curva “tensão – deformação” no Caso 11

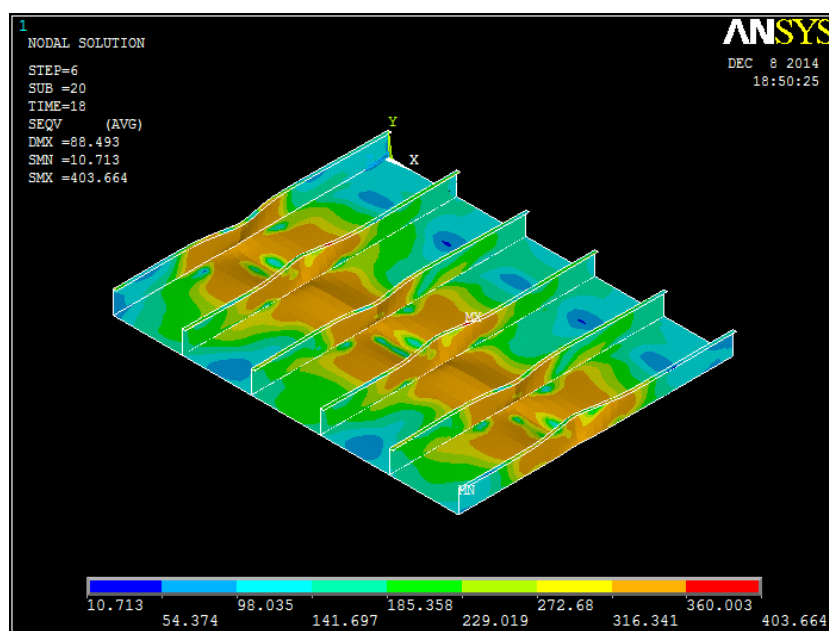


Figura C.23 – Tensões no Caso 12

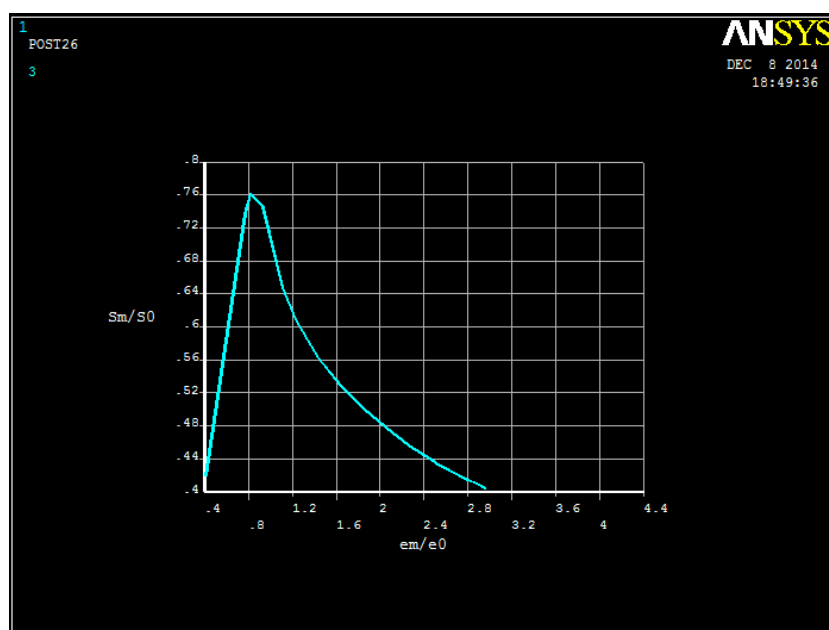


Figura C.24 – Curva “tensão – deformação” no Caso 12

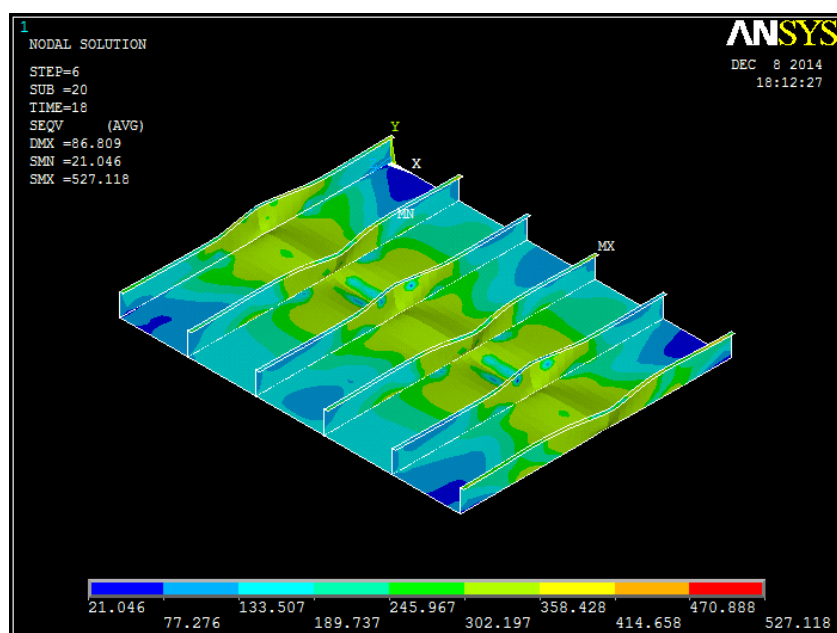


Figura C.25 – Tensões no Caso 13

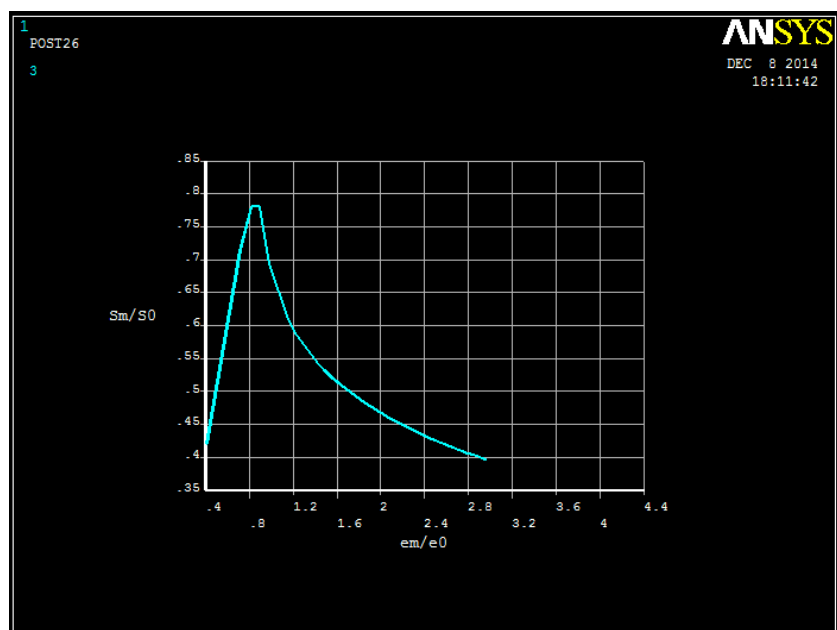


Figura C.26 – Curva “tensão – deformação” no Caso 13

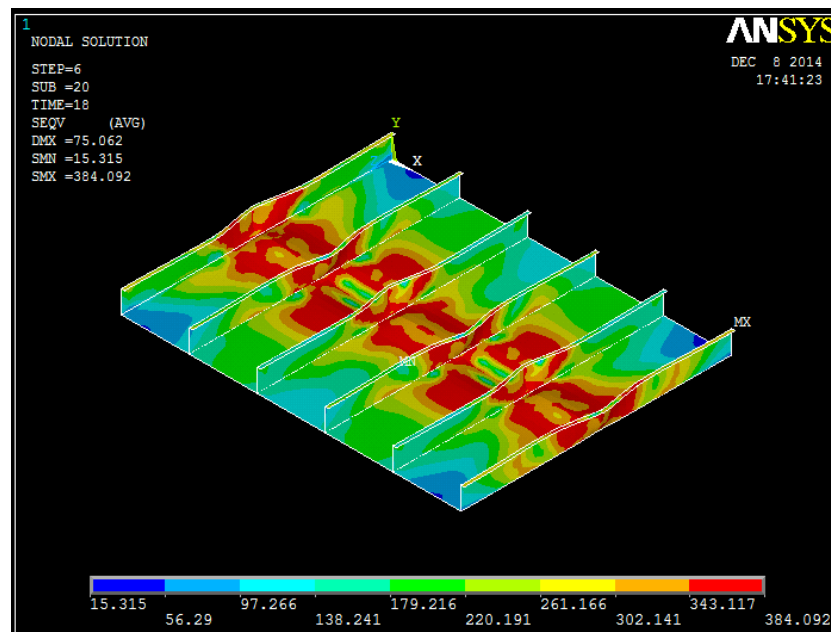


Figura C.27 – Tensões no Caso 14

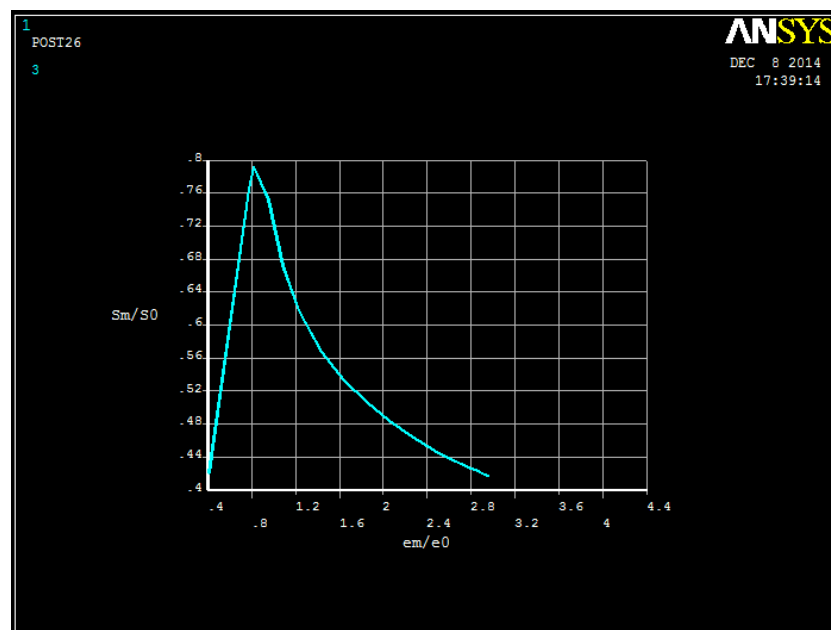


Figura C.28 – Curva “tensão – deformação” no Caso 14

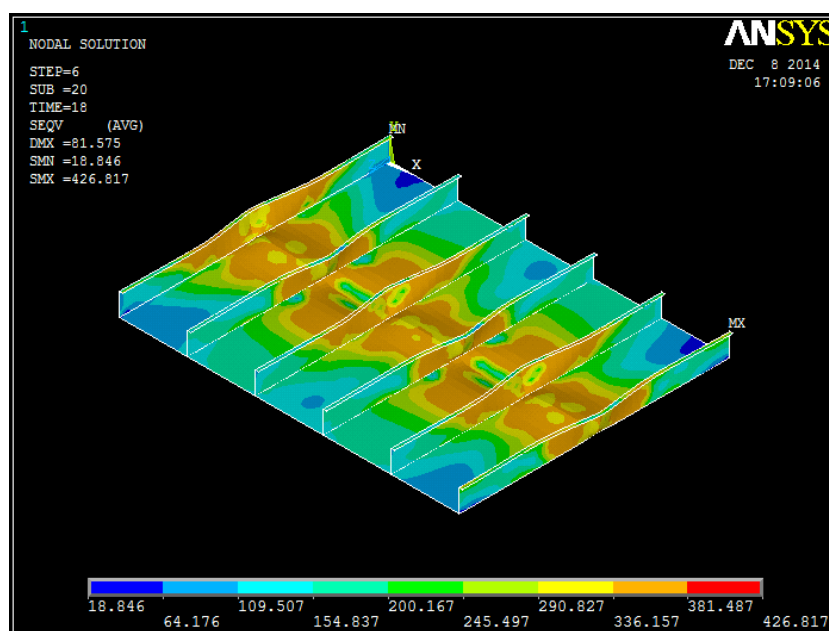


Figura C.29 – Tensões no Caso 15

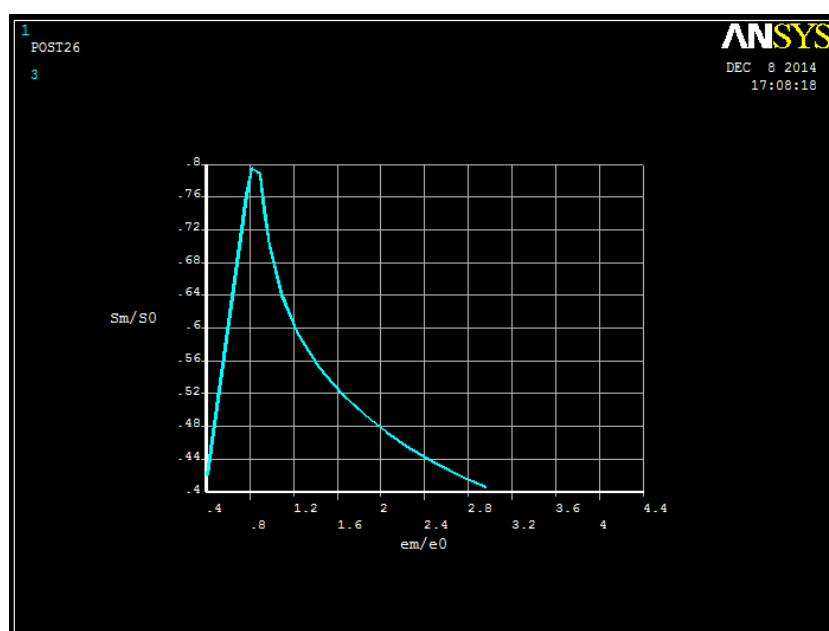


Figura C.30 – Curva “tensão – deformação” no Caso 15

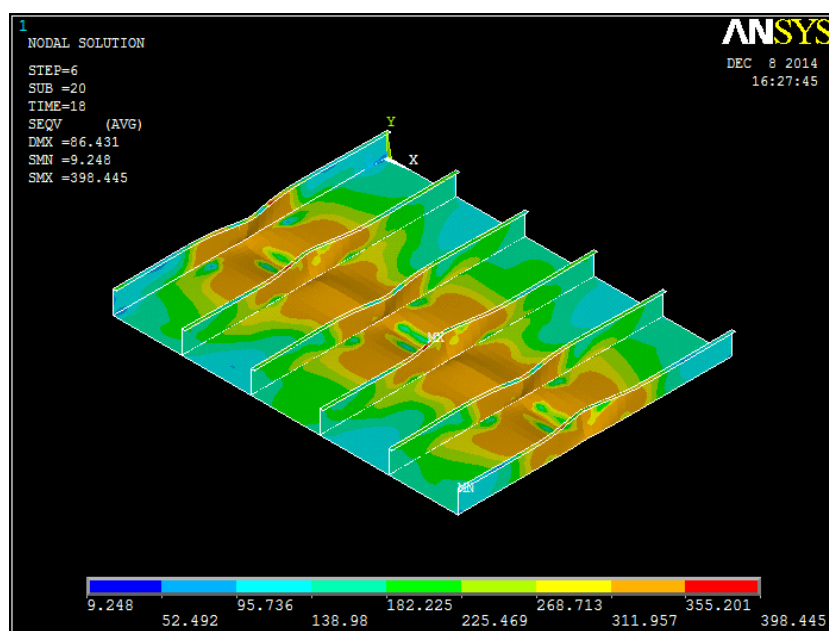


Figura C.31 – Tensões no Caso 16

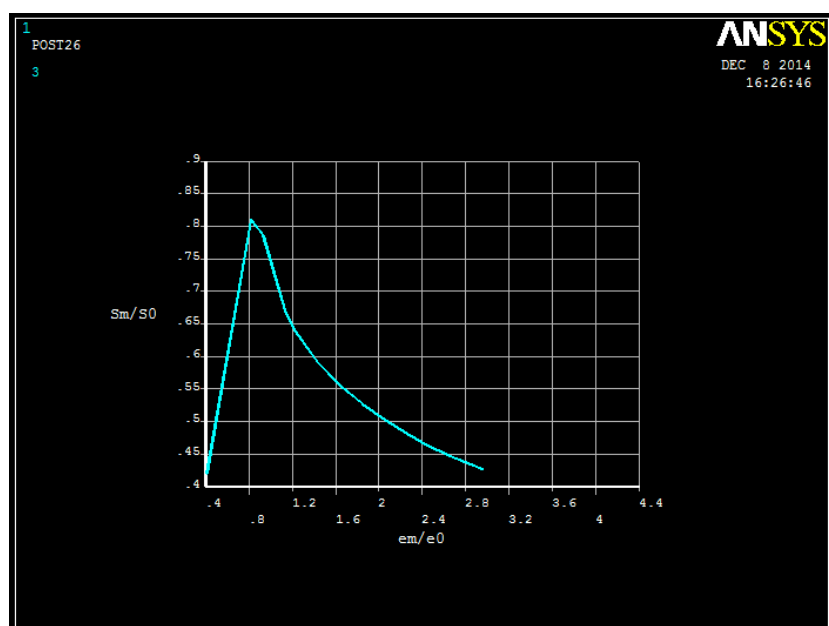


Figura C.32 – Curva “tensão – deformação” no Caso 16

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMANTE, Diogo do Amaral Macedo. RESISTÊNCIA ÚLTIMA À FLAMBAGEM DE PAINÉIS ENRIJECIDOS DE ESTRUTURAS OCEÂNICAS SOB AVARIA. Rio de Janeiro, 2009. 194 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), COPPE/UFRJ

ANSYS. ANSYS User's Manual: Theory, Vol.IV. Swanson Analysis Systems, Inc, 1994.

BARES, Ricardo. Tablas para el cálculo de placas y vigas pared. 2ª ED. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A., 1981. 538 p. ISBN 978-8-425-20357-2.

BATHE, K. Finite element procedures in engineering analysis. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1982. 736 p. ISBN 978-0133173055.

BAPTISTA, Lillian Gonçalves. Simulação numérica não-linear do comportamento pós-flambagem de placas finas de aço sob compressão uniaxial em estruturas navais e offshore. Rio Grande, 2014. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica/Universidade Federal do Rio Grande – FURG.

BENJAMIN, Adilson Carvalho. Análise do Comportamento Não-Linear Físico e Geométrico de Cascas Enrijecidas. Rio de Janeiro, 1991. 478 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BRYAN, G. H. On the stability of a plane under thrusts in its own plane with applications to the buckling of the sides of a ship. [S.l.]: Proceedings of the London Mathematical Society, v. 22, 1891.

BYKLUM, W.; AMDAHL, J. Nonlinear Buckling Analysis and Ultimate Strength Prediction of Stiffened Steel and Aluminium Panels. **The Second International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics**, Busan, Korea, 2002.

CHAJES, Alexander. Principles of Structural Stability Theory. Second Edition. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974. 336 p. ISBN 0-13-709964-9.

CHOI, B.H.; HWANG, M.; YOON, T.; YOO, C. H. Experimental study of inelastic buckling strength and stiffness requirements for longitudinally stiffened panels. **Engineering Structures**, v. 31, p. 1141-1153. February 2009.

CHUJUTALLI, John Alex Hernández. Flambagem torcional de enrijecedores em painéis de navios tanques submetidos à compressão axial. Rio de Janeiro, 2010. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), UFRJ/COPPE.

FONSECA, Maurílio M. Arte Naval. Volumes 1 e 2. 6ª edição. Rio de Janeiro, Serviço de Documentação da Marinha, 2005. 902 p. ISBN 85-7047-051-7.

GRONDIN, G. Y.; ELWI, A. E.; CHENG, J. J. R. Buckling of stiffened steel plates - a parametric study. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 50, p. 151-175, 1999.

GRONDIN, G.; SHEIKH, I.; ELWI, A. Stiffener Tripping in Stiffened Steel Plates. Structural Engineering Report No. 236. Canada, 2001. University of Alberta.

HIBBELER, R.C. Resistência dos Materiais. 5ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 675 p. ISBN 85-87918-67-2.

ISOLDI, L. A.; REAL, M. V.; CORREIA, A. L. G.; VAZ, J.; SANTOS, E. D. dos; ROCHA, L. A. O. Flow of Stresses: Constructal Design of Perforated Plates Subjected to Tension or Buckling. In: Luiz A. O. Rocha; Sylvie Lorente; Adrian Bejan. (Org.). Understanding Complex Systems. 1ed. Berlin: Springer New York, 2013a, v. 1, p. 195-217.

ISOLDI, L. A.; REAL, M. V.; CORREIA, A. L. G.; SANTOS, E.D. dos; ROCHA, L.A.O. Numerical analysis and geometric optimization of perforated thin plates subjected to tension or buckling. **Marine Systems & Ocean Technology**, v. 8, p. 99-107, 2013b.

JUNIOR, Paulo Roberto da Costa. EFEITO DAS DISTORÇÕES NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE NAVIO SUEZMAX. Rio de Janeiro, 2009. Projeto Final (Graduação em Engenharia Naval), Universidade Federal do Rio de Janeiro.

KUMAR, M. S.; KUMAR, C. L.; ALAGUSUNDARAMOORTHY, P.; SUNDARAVADIVELU, R. Ultimate Strength of Orthogonal Stiffened Plates Subjected to Axial and Lateral Loads. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 12, n. 2, p. 197-206, 2010.

KWON, Y.B.; PARK, H.S. Compression tests of longitudinally stiffened plates undergoing distortional buckling. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, p. 1212-1224, 2011.

MADENCI, Erdogan; GUYEN, Ibrahim. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®. USA: Springer, 2006. 686 p. ISBN 978-0-387-28290-9.

PAIK, J. K.; THAYAMBALLI, A.K.; KIM, B.B. Advanced Ultimate Strenght Formulations for Ship Plating Under Biaxial Compression/Tension, Edge Shear, and Lateral Pressure Loads. **Marine Technology and SNAME News**, v. 38, n. 1, p. 9-25, January 2001.

PRZEMIENIECKI, J. S. Finite Element Structural Analysis: New Concepts. AIAA Education Series, 2009. 138 p. ISBN 978-1563479977.

RACKOW, Patrícia; REAL, Mauro; ISOLDI, Liércio; COLARES, Rafaella; THORMANN, Daniela. ESTUDO PARAMÉTRICO PARA OTIMIZAÇÃO DA CARGA CRÍTICA EM PAINÉIS ENRIJECIDOS. In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 6, 2014. Rio Grande, Anais do IV SEMENGO. Rio Grande: Editora da FURG, 2014.

RACKOW, P. B.; REAL, M. V.; ISOLDI, L. A.; COLARES, R.; THORMANN, D. Análise paramétrica de um painel com enrijecedor sob flambagem elástica. In: CONFERÊNCIA SUL EM MODELAGEM COMPUTACIONAL, 6, 2014. Rio Grande, Anais do VI MCSUL. Rio Grande: Editora da FURG, 2014,

REAL, Mauro de Vasconcellos. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO, SOB ESTADO PLANO DE TENSÃO, ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. Porto Alegre, 2000. 249 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

REAL, M., ISOLDI, L. **Effect of Circular Holes Dimension and Location on the Elastic Buckling Load of Rectangular Plates**, 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, p. 24-28, 2011

ROCHA, Luiz A. O.; ISOLDI, Liércio A.; REAL, Mauro V.; SANTOS, Elizaldo D.; CORREIA, Anderson L. G.; LORENZINI, Giulio; BISERNI, Cesare. Constructal design applied to the elastic buckling of thin plates with holes. **Central European Journal of Engineering**, v. 3, p. 475-483, 2013.

ROCHA, L. A. O; REAL, M. V.; CORREIA, A. L. G.; VAZ, J.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. GEOMETRIC OPTIMIZATION BASED ON THE CONSTRUCTAL DESIGN OF PERFORATED THIN PLATES SUBJECT TO BUCKLING. **Computational Thermal Sciences**, v. 4, p. 119-129, 2012.

SAINT-VENANT, A. J. C. B. D. Théorie de l'élasticité des corps solides. Paris: Clebsch, 1883.

SENTANO, Bruna Suanez. ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO DE PLACAS COM FUROS CIRCULARES, QUADRANGULARES E LOSANGULARES, SOB COMPRESSÃO UNIAXIAL EM ESTRUTURAS NAVAIS E OCEÂNICAS. Rio Grande, 2014. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica/Universidade Federal do Rio Grande – FURG.

SILVA, Ana Lydia Reis de Castro e. ANÁLISE NUMÉRICA NÃO-LINEAR DA FLAMBAGEM LOCAL DE PERFIS DE AÇO ESTRUTURAL SUBMETIDOS À COMPRESSÃO UNIAXIAL. Belo Horizonte, 2006. 205 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais.

SRIVASTAVA, A. K. L.; PANDEY, S. R.; KUMAR, A. DYNAMICAL ANALYSIS OF STIFFENED PLATES UNDER PATCH LOADING. **Int. J. of Applied Mechanics and Engineering**, v. 18(2), p. 537-553, 2013.

STAMATELOS, D. G.; LABEAS, G. N.; TSERPES, K. I. Analytical calculation of local buckling and post-buckling behavior of isotropic and orthotropic stiffened panels. **Thin-Walled Structures**, v. 49, p. 422-430, 2011.

TAYSI, Nildem. Determination of thickness and stiffener locations for optimization of critical buckling load of stiffened plates. **Scientific Research and Essays**, Vol. 5(9), p. 897-910, May 2010.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. Theory of Elastic Stability. New York: McGraw-Hill, 1963. 541 p. ISBN 0-07-Y85821-7.

WANG, C. L. E.; GRONDIN, G. Y.; ELWI, A. E. Interaction Buckling Failure of Stiffened Steel Plates. Edmonton, Alberta: University of Alberta, May 2006. **Structural Engineering Report No. 264**. 182 p.

ZHANG, Shengming; KHAN, Imtaz. Buckling and ultimate capability of plates and stiffened panels in axial compression. **Marine Structures**, v. 22, p. 791-808, 2009.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. The finite element method. Volume 1: basic formulation and linear problems. 4.ed.. London: McGraw-Hill International, 1989. 648 p. ISBN 978-0070991934.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. The finite element method. Volume 2: fluid mechanics, dynamics and non-linearity. 4.ed.. London, McGraw-Hill International, 1991. 824 p. ISBN 978-0070841758.