



Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Engenharia Naval e Oceânica



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica

ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE CHAPAS DE ALUMÍNIO SUJEITAS À  
APLICAÇÃO DE CARGA UNIAXIAL OU BIAIXIAL ATRAVÉS DE MODELO EM  
ELEMENTOS FINITOS.

Guilherme Bacha de Magalhães Bastos

DRE: 107349618

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de  
Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte  
dos requisitos necessários à obtenção do título de  
Engenheiro Naval e Oceânico.

Orientador: Murilo Augusto Vaz

RIO DE JANEIRO

SETEMBRO, 2013

"ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE CHAPAS DE ALUMÍNIO SUJEITAS À  
APLICAÇÃO DE CARGA UNIAXIAL OU BIAXIAL ATRAVÉS DE MODELO EM  
ELEMENTOS FINITOS"

Guilherme Bacha de Magalhães Bastos

DRE: 107349618

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO  
DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRO NAVAL E OCEÂNICO.

Aprovado por:

---

Murilo Augusto Vaz, Ph.D. (Orientador)

---

Júlio Cesar Ramalho Cyrino, D.Sc.

---

Miguel Renato Manco Rivera, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO, 2013

Bastos, Guilherme Bacha de Magalhães

Estudo da Resistência de Chapas de Alumínio Sujeitas à Aplicação de Carga Uniaxial ou Biaxial Através de Modelo em Elementos Finitos/ Guilherme Bacha de Magalhães Bastos. - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

IX, 30 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Murilo Augusto Vaz

Projeto de Graduação - UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Naval e Oceânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 29-30

1. Análise de Resistência de Chapas. I. Augusto Vaz, Murilo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Naval e Oceânica. III. Título

## Dedicatória

*A meus pais, por terem me ensinado os valores que um homem deve ter para se tornar grande e por sempre me apoiarem durante essa longa jornada.*

*A Isabela, a mulher da minha vida, por sua existência, amor e carinho, por ser o estímulo nas horas mais complicadas.*

## Agradecimentos

A Deus, pela sua presença constante na minha vida, por iluminar o meu caminho, me dar sabedoria e por me confortar nas horas difíceis sem que eu precisasse pedir.

Às minhas avós, Faustina e Solimar, por estarem sempre me ajudando de alguma forma e por tornarem esse sonho possível.

À minha família, por me ensinar os ensinamentos que eu precisaria para enfrentar os desafios da vida.

Aos meus amigos, pela ajuda e disponibilidade dada sempre que precisei e por fazerem cada dia na faculdade ter valido a pena.

Ao professor e orientador Murilo Augusto Vaz, por estar sempre disposto a ajudar e pela paciência ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

Ao Miguel Manco, pelos conhecimentos a mim concedidos e pela ajuda constante nesse período.

A todos os professores e funcionários da faculdade, pelo carinho, respeito e amizade construídos ao longo desses anos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Naval e Oceânico.

Estudo da Resistência de Chapas de Alumínio Sujeitas à Aplicação de Carga Uniaxial ou Biaxial Através de Modelo em Elementos Finitos"

Guilherme Bacha de Magalhães Bastos

Setembro/2013

Orientador: Murilo Augusto Vaz

Curso: Engenharia Naval e Oceânica

O presente trabalho tem como principal objetivo a obtenção da resistência de chapas submetidas à compressão uniaxial ou biaxial. Ao longo do trabalho, serão feitas considerações importantes sobre a influência de um bom refinamento da malha, da tensão residual e da imperfeição geométrica. Foi feita, também, uma verificação da confiabilidade do método de interpolação na obtenção da resposta à compressão das chapas. Para isso, compararam-se resultados obtidos numericamente por interpolação com o resultado obtido para a mesma placa através da análise em elementos finitos. Os resultados são representados em forma de gráficos tensão-deformação, que indicam como determinada placa se comporta estruturalmente. Ao final do trabalho, terá sido criado um banco de dados com as respostas de determinadas chapas que poderão ser utilizadas para obtenção da resposta de outras chapas ou, até mesmo, poderão ser combinadas com resultados obtidos para análise do comportamento de reforçadores e, assim se ter uma resposta total de um painel completo.

*Palavras-chave:* Resistência, chapa, elementos finitos, compressão, uniaxial, biaxial

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Naval and Ocean Engineer.

Analysis of Ultimate Strength of Aluminium Plates under uniaxial or biaxial loading with finite elements models.

Guilherme Bacha de Magalhães Bastos  
September/2013

Advisor: Murilo Augusto Vaz

Course: Naval and Ocean Engineering

The main objective of this paper is to obtain the ultimate strength of aluminium plates under axial and bi-axial loading. A finite element model has been developed, in which, it was verified the influence of the mesh refinement, residual stress and initial geometric imperfection. Also, it was verified the reliability of an interpolation method to obtain the response of the plates when loading was applied. For this, it was made a comparison of the results obtained numerically through interpolation method with the results obtained, for the same plate, through finite elements analysis. The results are presented in stress-strain graphics forms that show how a specific plate responds structurally. At the end of this work, a database will be created with the responses of some plates, which will be helpful for the analysis of other plates in the future or, even more, may be used to combine with the responses obtained by doing the same analysis on some types of stiffeners and so, we can have the global panel response.

*Keywords:* Ultimate Strength, Plates, Finite Elements, Compression, Uniaxial, Biaxial.

# Sumário

1. Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais .....	2
1.2 Tensão Residual .....	3
1.3 Modelos .....	4
1.4 Material.....	5
2. Efeito de Alguns Fatores na Resistência das Chapas.....	6
2.1 Influência do Refinamento da Malha no resultado.....	6
2.2 Imperfeição Geométrica.....	8
2.2.1 Imperfeição segundo Paik .....	9
2.2.2 Imperfeição segundo ISSC .....	10
2.2.3 Comparação entre as Imperfeições.....	11
2.3 Zona termicamente afetada pelo calor (HAZ) .....	13
3. Modelos.....	15
3.1 Carregamento Uniaxial .....	15
3.2 Carregamento Biaxial .....	20
4. Método de Interpolação.....	25
5. Conclusão .....	28
6. Referências Bibliográficas .....	29



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Partes modeladas das chapas .....	2
Figura 2 - Região da zona termicamente afetada .....	3
Figura 3 - HAZ localizada no centro e nos bordos [9] .....	4
Figura 4 - Malha menos refinada.....	7
Figura 5 - Malha mais refinada.....	7
Figura 6 - Distorções causadas pela soldagem [14] .....	9
Figura 7 - Imperfeição geométrica de Paik na chapa Beta 3,5 e HR 3 (x10) .....	11
Figura 8 - Imperfeição geométrica do ISSC na chapa Beta 3,5 e HR 3 (x10) .....	11
Figura 9 - Tensões de <i>Von Mises</i> na Chapa Beta 3,5 e HR 3 (imperfeição de Paik) .....	12
Figura 10 - Tensões de <i>Von Mises</i> na Chapa Beta 3,5 e HR 3 (imperfeição do ISSC)..	12
Figura 11 - Condições de contorno na chapa sujeita a carregamento uniaxial.....	16
Figura 12 - Chapa com Beta 1,3 e HR 8 (compressão uniaxial longitudinal).....	17
Figura 13 - Chapa com Beta 5,5 e HR 8 (compressão uniaxial longitudinal).....	17
Figura 14 - Chapa com Beta 3,5 e HR 14 (compressão uniaxial longitudinal).....	18
Figura 15 - Condições de contorno e pressão aplicada no sentido transversal.....	22
Figura 16 - Chapa com Beta 1,3 e HR 14 (compressão biaxial) .....	22
Figura 17 - Chapa com Beta 1,3 e HR 3 (compressão biaxial) .....	23
Figura 18 - Chapa com Beta 2,2 e HR 14 (compressão biaxial) .....	23

## **ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1 - Propriedades elásticas do material .....	6
Tabela 2 - Amplitude de deflexões iniciais para várias formas de deflexão [10].....	9
Tabela 3 - Parâmetros e dimensões das chapas analisadas.....	16

# ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curvas do Alumínio 5083-H116 [12] .....	6
Gráfico 2 - Influência do refinamento da malha.....	8
Gráfico 3- Influência da forma da imperfeição geométrica inicial no gráfico tensão x deformação, chapa com Beta 3,5 e HR 3 .....	13
Gráfico 4 - Influência da HAZ transversal no gráfico tensão x deformação, chapa com Beta 1,3.....	14
Gráfico 5 - Influência da HAZ transversal no gráfico tensão x deformação, chapa com Beta 2,2.....	14
Gráfico 6 - Tensão x deformação para a chapa Beta 1,3 (compressão uniaxial longitudinal) .....	18
Gráfico 7 - Tensão x deformação para a chapa Beta 2,2 (compressão uniaxial longitudinal) .....	19
Gráfico 8 - Tensão x deformação Beta 3,5 (compressão uniaxial longitudinal) .....	19
Gráfico 9 - Tensão x deformação para a chapa Beta 5,5 (compressão uniaxial longitudinal) .....	19
Gráfico 10 - Tensão x deformação para a chapa Beta 1,3 (compressão biaxial) .....	24
Gráfico 11 - Tensão x deformação para a chapa Beta 2,2 (compressão biaxial) .....	24
Gráfico 12 - Interpolação do HR (Beta 1,3) .....	25
Gráfico 13 - Interpolação do HR (Beta 2,2) .....	26
Gráfico 14 - Beta 1,8 HR 5 (por interpolação) .....	26
Gráfico 15 - Comparação de resultados .....	27

# 1. Introdução

O interesse na utilização do alumínio como material estrutural em aplicações marítimas segue uma crescente. Esse crescimento se dá tanto pelo baixo peso específico do alumínio comparado a outros materiais estruturais quanto pela grande capacidade de resistir à corrosão. Muckle [1] foi um dos muitos que pesquisaram o uso de alumínio como principal componente estrutural em navios grandes. Durante suas investigações, chegou-se a conclusão de que o uso de alumínio comparado com outros materiais, tal como o aço, reduzia em aproximadamente 50% do peso estrutural do navio. Estudos passados mostram que programas de elementos finitos podem prever ótimos resultados na análise de falha em elementos estruturais [2].

Nos últimos anos, muitos autores têm proposto métodos analíticos simplificados para calcular a rigidez de chapas não reforçadas. A maioria desses estudos consideram chapas sujeitas apenas a carregamento compressivo longitudinal. Entretanto, o chapeamento real numa estrutura naval está sujeito a carregamentos que, geralmente, são uma combinação de esforços no sentido longitudinal e transversal. Uma estrutura naval pode ser considerada como uma união de chapas reforçadas contínuas com igual espaçamento de reforços longitudinais de aproximadamente mesmo tamanho [3].

A rigidez última de chapas é muito importante no projeto e na visão de segurança, pois o colapso de chapas pode atuar como um indicativo da resistência última de todo o painel reforçado [4]. Os métodos propostos para esse problema podem ser divididos em elementos finitos, experimentos, fórmulas empíricas (baseadas em resultados numéricos ou experimentais) e em métodos analíticos ou semi-analíticos. No presente trabalho,

será utilizado o método de elementos finitos para análise das chapas, como poderá ser comprovado ao longo do trabalho.

## 1.1 Considerações Iniciais

Durante o projeto, será simulada a flambagem de chapas, de dimensões  $a$  e  $b$ , de tal forma que a área modelada da chapa está indicada em vermelho na figura 1 . Para isso, foram avaliadas chapas considerando a região termicamente afetada pelo calor da soldagem, onde as propriedades do material seriam diferentes (as propriedades estão indicadas no *item 1.4*) das demais regiões da chapa, conforme indica a região vermelha na figura 2. Após essa análise, teremos uma parcela da resposta do painel quando em falha local que poderá, em um trabalho futuro, ser incorporada à parcela da resposta obtida através dos modelos dos reforçadores, para que enfim se possa ter a resposta total do painel.

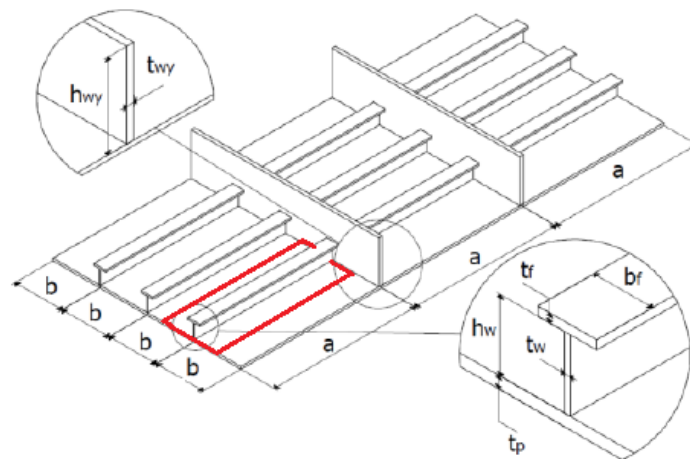


Figura 1 - Partes modeladas das chapas



Figura 2 - Região da zona termicamente afetada

As dimensões das chapas foram determinadas de acordo com dois parâmetros, a Razão de Esbeltez ( $\beta$ ) e a Razão de Largura Afetada pelo Calor ( $HR$ ). Enquanto que o primeiro é uma função da geometria da chapa ( $b, t$ ) e das características do material ( $E, \sigma_o$ ), o segundo é determinado pela razão entre a largura da chapa ( $b$ ) e a largura da zona afetada pelo calor durante a soldagem ( $b_{HAZ}$ ).

$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_o}{E}} \quad HR = \frac{b}{b_{HAZ}}$$

Onde,  $b$  é a largura da chapa,  $t$  é a espessura da chapa,  $\sigma_o$  é a tensão de prova do material (215 MPa) e  $E$  é o módulo de Young (69,35 GPa). A faixa usual de valores para Razão de Esbeltez será considerada de tal forma que  $1 \leq \beta \leq 6$ , pois os valores de  $\beta$  utilizados em estudos anteriores encontram-se, geralmente, nessa faixa de valores.

## 1.2 Tensão Residual

As tensões residuais se desenvolvem porque as regiões aquecidas da chapa tendem a se dilatar, mas esta dilatação é dificultada pelas partes adjacentes submetidas a temperaturas menores, o que resulta no desenvolvimento de deformações elásticas e plásticas no material aquecido. As tensões residuais podem afetar de modo importante a utilidade e o desempenho da estrutura soldada, sendo fundamental o conhecimento de suas características e de medidas para a sua prevenção e controle [5]. Os campos de

tensão residual são gerados em várias estruturas de metais e de peças fabricadas durante a construção [6] e, o processo de soldagem durante a fabricação é a principal causa da geração de tensões residuais em estruturas navais [7]. A intensidade do calor inserido pela soldagem é uma função de inúmeras variáveis, tais como o tipo do procedimento de solda usado, o tamanho do passe e a profundidade da penetração [8].

Para uma análise numérica, o campo de tensão residual poderia ser idealizado em blocos de tensões com uma descontinuidade entre as zonas compressivas e trativas [9]. No presente trabalho, a tensão residual não será considerada nos modelos das chapas, pois um estudo feito em [9] mostra que, para placas de alumínio 5083-H116 modeladas com HAZ central (figura 3), a influência da tensão residual é muito pequena e, portanto, a mesma não alteraria de forma significativa os resultados das análises.

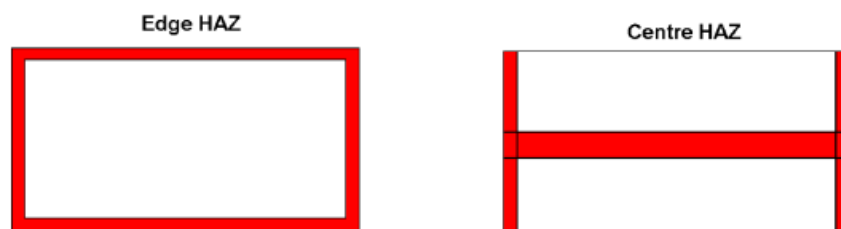


Figura 3 - HAZ localizada no centro e nos bordos [9]

### 1.3 Modelos

Nos modelos desenvolvidos no presente trabalho, considerou-se as chapas como sendo suficientemente longas e para isso utilizou-se uma a razão de aspecto ( $a/b$ ) igual a 3, que já é suficiente para uma placa ser considerada longa [10]. Feito isso, garantiu-se que o comprimento  $a$  da placa não interferiria na resposta obtida na análise.

Para a análise dos modelos foi utilizado um código, nos programas *Fortran* e no *Microsoft Visual Basic*, capaz de gerar um arquivo de saída que poderia ser importado diretamente para o programa *Abaqus*. Os dados de entrada no código eram, basicamente, as dimensões desejadas para a chapa, ou seja, comprimento, largura e espessura. Além dessas dimensões é possível, facilmente, alterar a largura da zona termicamente afetada, o tipo de imperfeição e o refinamento da malha. Esse arquivo, quando aberto no *Abaqus*, geraria uma malha de chapa com as dimensões e informações previamente determinadas no código.

Os elementos dos modelos desenvolvidos são do tipo Shell S4R *Abaqus*, com razão de aspecto dentro dos limites aceitáveis e modelo de plasticidade isotrópica aplicada ao material. As chapas foram determinadas a partir dos coeficientes  $\beta$  e  $HR$ , cujas definições e fórmulas estão indicadas no item 1.1. Mais adiante, serão apresentadas as características das chapas modeladas (coeficientes  $\beta$  e  $HR$ ), bem como os resultados obtidos nas análises feitas para cada uma delas, resultados esses dados em forma de gráficos que correlacionam a tensão normalizada pela tensão de prova do material ( $\sigma_o = 215 MPa$ ) com a deformação normalizada pela deformação de prova ( $\epsilon_o = 3,1 \times 10^{-3}$ ).

## 1.4 Material

As características elásticas e plásticas do material utilizado no projeto, alumínio 5083-H116, foram obtidas de Paik e Duran [11] e estão apresentadas abaixo. A tabela 2 e o gráfico 1 indicam, respectivamente, as propriedades elásticas do alumínio 5083-H116 e o comportamento das curvas para o material afetado e não afetado pelo calor.



Tabela 1 - Propriedades elásticas do material

Propriedades - Alumínio 5083-H116	
Módulo de Young (E)	69,35 Gpa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,33

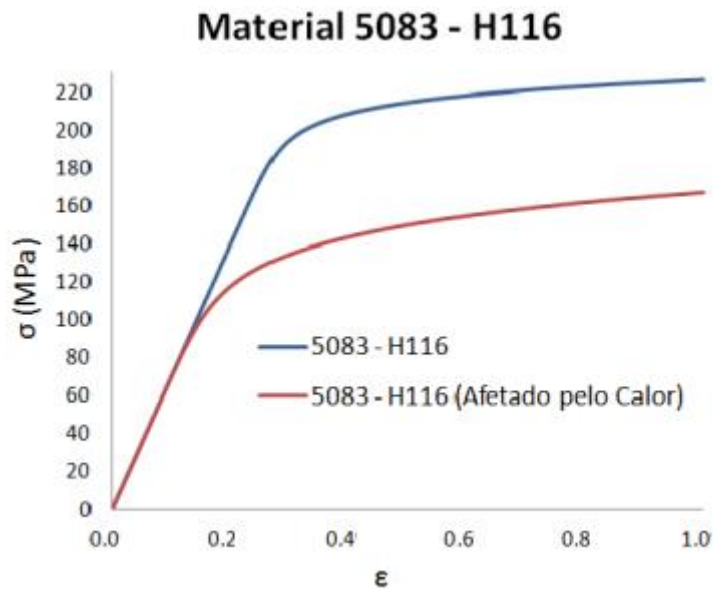


Gráfico 1 - Curvas do Alumínio 5083-H116 [12]

## 2. Efeito de Alguns Fatores na Resistência das Chapas

### 2.1 Influência do Refinamento da Malha no resultado

Nessa parte do projeto foi verificada a influência do refinamento da malha das chapas no resultado de resposta da mesma quando submetida à compressão. Para isso, utilizou-se alguns resultados obtidos por [13] e, comparou-se os mesmos com os resultados avaliados para as mesmas chapas com um melhor refinamento. As figuras 4 e 5 mostram um exemplo da mesma chapa com uma malha menos refinada e mais refinada, respectivamente.

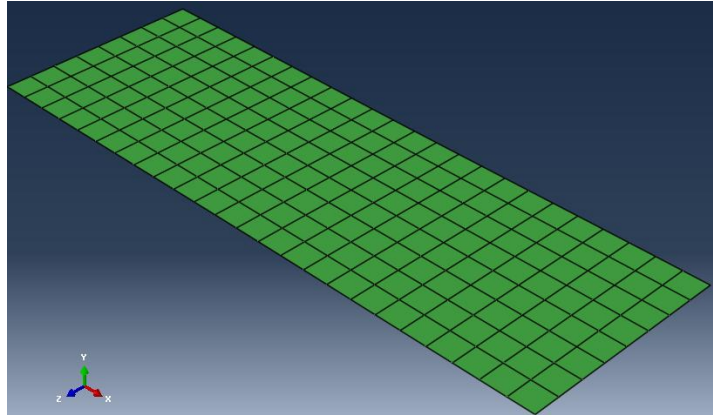


Figura 4 - Malha menos refinada

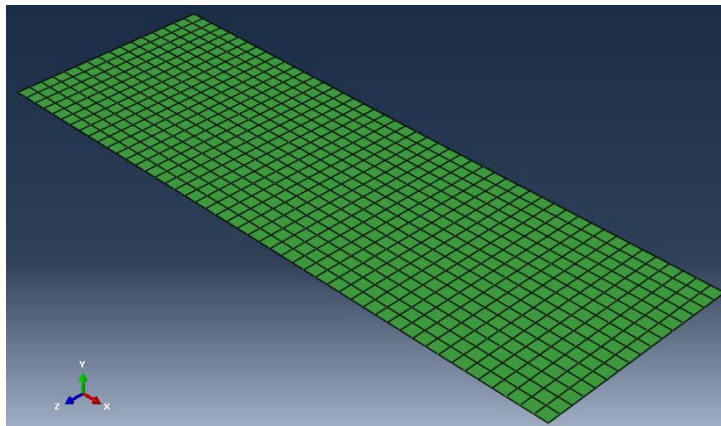


Figura 5 - Malha mais refinada

Os resultados obtidos com a análise podem ser vistos no gráfico 2 e o que se pode observar é que um melhor refinamento proporcionou diferença na resposta final da análise. Nas malhas menos refinadas foram utilizados 24 elementos na direção longitudinal e 8 elementos na transversal. Para as malhas mais refinadas, foram utilizados 84 elementos na longitudinal e 32 na transversal para a chapa  $\beta = 1,5$  e  $HR 16$ , 96 elementos na longitudinal e 32 na transversal para a chapa  $\beta = 3$  e  $HR 4$  e 72 elementos na longitudinal e 24 na transversal para a chapa  $\beta = 5$  e  $HR 6$ .

### Influência do Refinamento da Malha

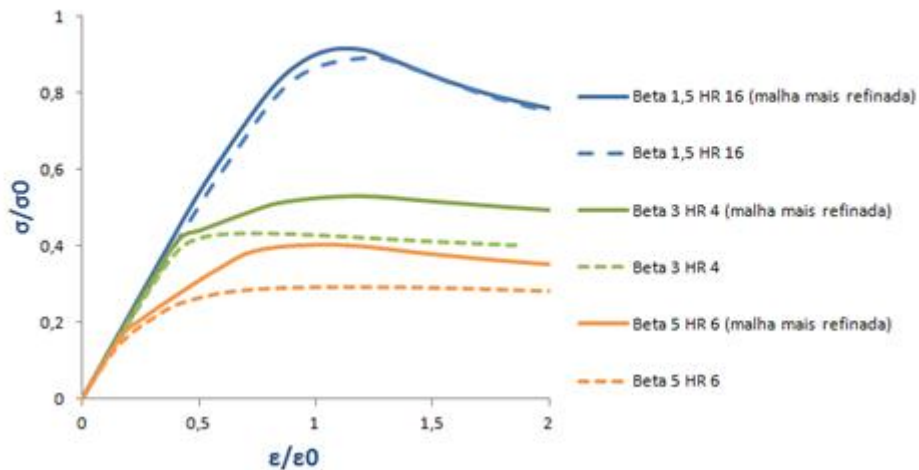


Gráfico 2 - Influência do refinamento da malha

Podemos perceber que é possível em alguns casos se alcançar o resultado sem que se tenha um refinamento bem feito, como pode ser visto na curva Beta 1,5 e HR 16 no gráfico 2, porém em outros a diferença obtida com um refinamento melhor foi bem maior, como nas curvas Beta 3 e HR 4 e, Beta 5 e HR 6.

## 2.2 Imperfeição Geométrica

A imperfeição inicial da chapa, induzida pelo processo de soldagem, não pode ser desconsiderada no modelo, pois sua magnitude é um parâmetro crítico que afeta as características de flambagem da estrutura submetida a um carregamento compressivo.

Distorções da geometria em uma placa de alumínio são inicialmente introduzidas durante o processo de rolamento e extrusão, conforme Ref. [9]. Além disso, o processo de soldagem durante a construção introduz ou amplifica as imperfeições geométricas na chapa. As distorções induzidas pela soldagem incluem a contração longitudinal ou transversal da placa, a distorção angular em torno do eixo do cordão de solda, distorção rotacional, distorção de flambagem e distorção longitudinal de flexão, como mostrada

na figura 6. Na prática, distorção angular e distorção longitudinal de flexão são as que mais ocorrem devido ao processo de soldagem [10].

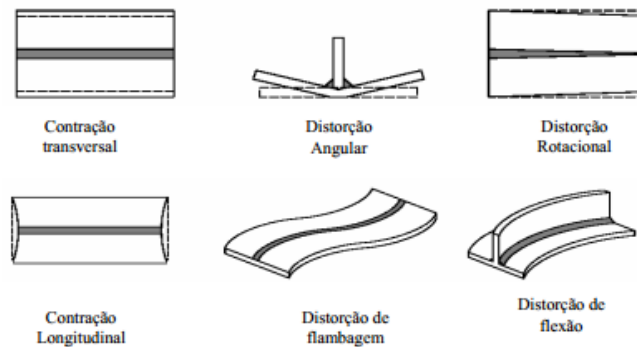


Figura 6 - Distorções causadas pela soldagem [14]

### 2.2.1 Imperfeição segundo Paik

Estudos anteriores, geralmente representam a distorção típica de uma chapa como tendo a forma de uma meia-onda senoidal através da largura da chapa e como a soma de meias-ondas senoidais sobrepostas ao longo do comprimento da chapa. A equação dessa imperfeição é, então, representada por Série de Fourier, onde a deflexão em cada ponto ( $w_o$ ) é função da imperfeição máxima ( $w_{oMAX}$ ), do comprimento e largura da chapa ( $a$  e  $b$ , respectivamente), da posição  $x$  e  $y$  do ponto  $w_o$ , do número de termos do somatório ( $M$ ) e do parâmetro ( $B_i$ ). O parâmetro  $B_i$  indica o quanto a sua respectiva parcela do somatório influencia na imperfeição total da chapa.

$$w_o = w_{oMAX} \sum_{i=1}^M B_i \sin \frac{i\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (1)$$

Tabela 2 - Amplitude de deflexões iniciais para várias formas de deflexão [10]

Initial Deflection Shape	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B09	B010	B011
#1	1,0	-0,0235	0,3837	-0,0259	0,2127	-0,0371	0,0478	-0,0201	0,0010	-0,0090	0,0005
#2	0,8807	0,0643	0,0344	-0,1056	0,0183	0,0480	0,0150	-0,0101	0,0082	0,0001	-0,0103
#3	0,5500	-0,4966	0,0021	0,0213	-0,0600	-0,0403	0,0228	-0,0089	-0,0010	-0,0057	-0,0007
#4	0,0	-0,4966	0,0213	0,0213	-0,0600	-0,0403	0,0228	-0,0089	-0,0010	-0,0057	-0,0007

A tabela 2 indica alguns valores para o coeficiente  $B_i$  para quatro tipos diferentes de formas de deflexões.

*Paik e Duran* [11] utilizam uma simples fórmula para estimar a amplitude máxima da imperfeição, que ocorre na região central da chapa, conforme segue.

$$w_{oMAX} = 0,009b \quad (2)$$

Onde,  $w_{oMAX}$  é a imperfeição máxima da chapa e  $b$  é a largura da mesma.

Para representação da imperfeição média na placa de alumínio 5083-H116, segundo Ref. [12], pode-se considerar como de 80% o valor de  $B_1$  e de 20% o de  $B_3$  e, desprezar os demais termos da série. Colocando-se o sinal negativo no termo de  $B_3$  para que essa parcela fique positiva, pois  $\sin \frac{3\pi x}{a}$  tem valor negativo, a equação 1 fica reduzida a:

$$w_{o(x,y)} = w_{oMAX} * \left( 0,8 * \sin \frac{\pi x}{a} * \sin \frac{\pi y}{b} - 0,2 * \sin \frac{3\pi x}{a} * \sin \frac{\pi y}{b} \right) \quad (3)$$

### 2.2.2 Imperfeição segundo ISSC

De acordo com o International Ship and Offshore Structures Congress (ISSC) [15], a imperfeição da chapa é determinada utilizando-se apenas um termo na série de Fourier expressa pela equação 1. Para o cálculo do número de meias-ondas ( $m$ ) da forma da imperfeição geométrica, deve-se utilizar a equação 4 abaixo.

$$\frac{a}{b} \leq \sqrt{m(m+1)} \quad (4)$$

Após calculado o número de meias-ondas, de acordo com [15], a expressão representativa da imperfeição geométrica inicial da chapa será dada de acordo com a Série de Fourier indicada por Paik (equação 1) que ficará reduzida da seguinte maneira:

$$w_{o(x,y)} = w_{oMAX} * \left( \sin \frac{m\pi x}{a} * \sin \frac{\pi y}{b} \right) \quad (5)$$

### 2.2.3 Comparação entre as Imperfeições

Nesse item foram feitos dois modelos para a chapa  $\beta = 3,5$  e  $HR 3$ , um considerando a imperfeição geométrica inicial segundo o proposto por Paik e Duran [11] e outro segundo o modelo proposto pelo ISSC [15].

As figuras 7 e 8 indicam, respectivamente, a forma da imperfeição geométrica segundo modelo de Paik e segundo o modelo do ISSC na chapa considerada, aumentada em 10 vezes para uma melhor visualização.

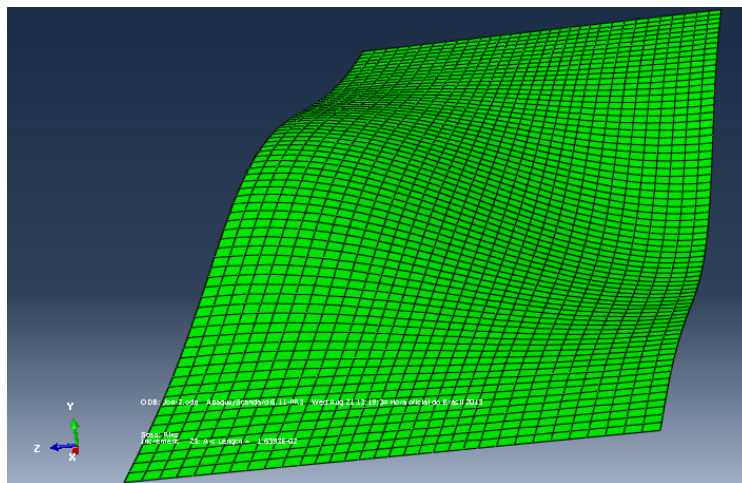


Figura 7 - Imperfeição geométrica de Paik na chapa Beta 3,5 e HR 3 (x10)

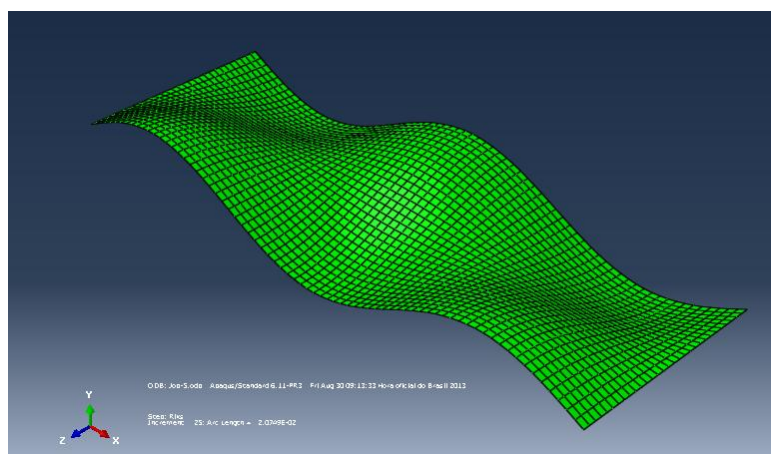


Figura 8 - Imperfeição geométrica do ISSC na chapa Beta 3,5 e HR 3 (x10)

Após a simulação de um carregamento uniaxial e longitudinal na chapa podemos ver, através das figuras 9 e 10, a variação das tensões de *Von Mises* quando considerada como imperfeição o modelo de Paik e o modelo proposto pelo ISSC, respectivamente.

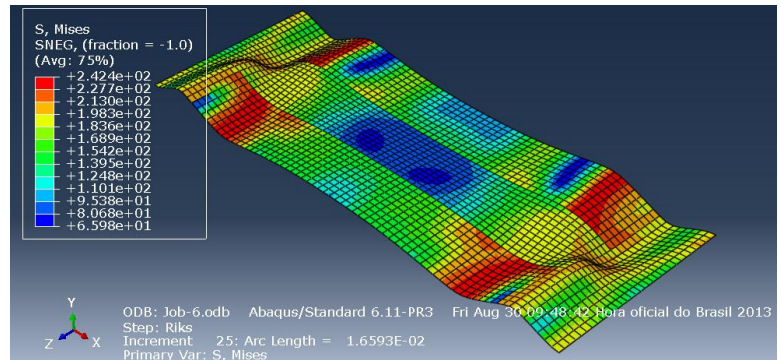


Figura 9 - Tensões de *Von Mises* na Chapa Beta 3,5 e HR 3 (imperfeição de Paik)

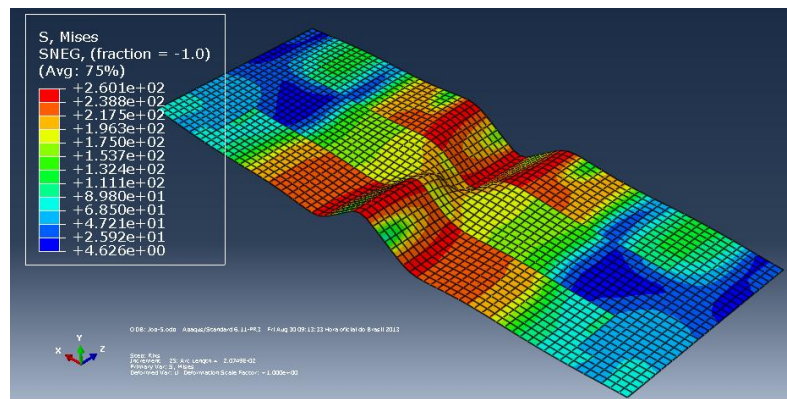


Figura 10 - Tensões de *Von Mises* na Chapa Beta 3,5 e HR 3 (imperfeição do ISSC)

No gráfico 3 podemos ver a comparação entre as curvas tensão-deformação para a chapa com imperfeição de Paik e com a mesma chapa com imperfeição do ISSC.

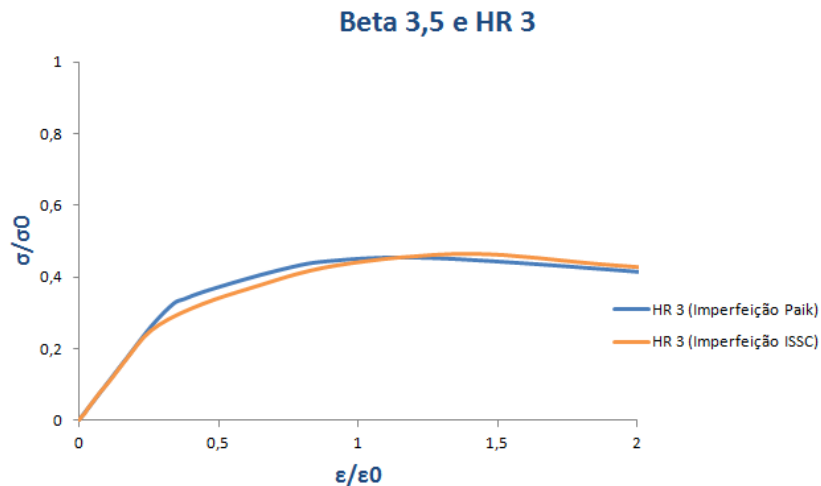


Gráfico 3- Influência da forma da imperfeição geométrica inicial no gráfico tensão x deformação, chapa com Beta 3,5 e HR 3

Pelo gráfico 3 podemos perceber que a diferença entre os resultados obtidos é muito pequena e, por isso, no decorrer deste trabalho utilizaremos a forma da imperfeição geométrica dada por Paik e Duran nos modelos que serão desenvolvidos.

### 2.3 Zona termicamente afetada pelo calor (HAZ)

A zona termicamente afetada descreve a área do material de base da chapa que teve sua microestrutura, e conseqüentemente as propriedades mecânicas do material, alterada devido ao processo de soldagem. O calor do processo de soldagem e posterior resfriamento faz com que aconteça a alteração na área circundante da solda. A extensão e a magnitude da mudança de propriedade dependem principalmente do material de base, o metal de enchimento de solda, e a quantidade e concentração de entrada de calor pelo processo de soldagem. A difusividade térmica do material de base desempenha um grande papel.

Se a difusividade é alta, o material possui uma alta taxa de resfriamento e uma pequena zona termicamente afetada. Uma difusividade baixa possui uma taxa de resfriamento



mais lenta tendo assim uma HAZ maior. Portanto, essas zonas ocorrem nas bordas das chapas adjacentes à solda de reforçadores ou à solda feita entre chapas. Nessa parte do trabalho, relativa à zona termicamente afetada, foi feita uma avaliação da influência da região transversal da HAZ na análise da chapa. Considerou-se, então, a zona termicamente afetada pelo calor apenas no sentido longitudinal e, depois, foi considerada a região afetada pela solda nos dois sentidos, longitudinal e transversal. Os resultados encontrados estão indicados nos gráficos 4 e 5.

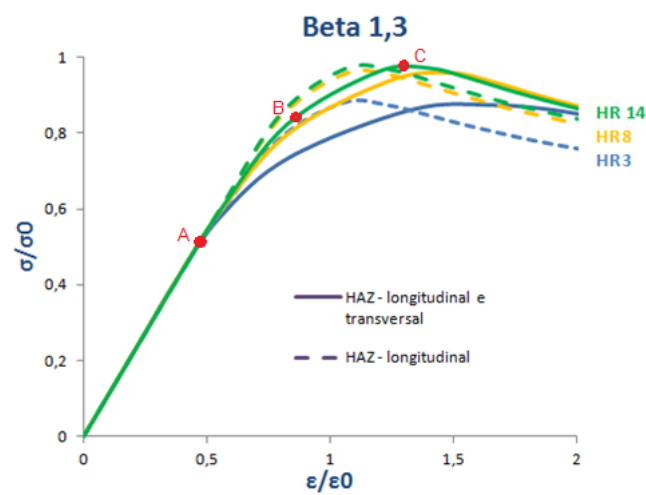


Gráfico 4 - Influência da HAZ transversal no gráfico tensão x deformação, chapa com Beta 1,3

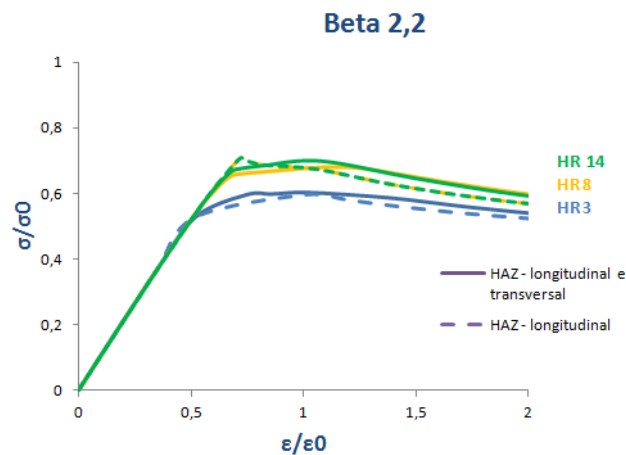


Gráfico 5 - Influência da HAZ transversal no gráfico tensão x deformação, chapa com Beta 2,2

No gráfico 4, foram marcados três pontos na curva associada ao HR 14 e o comportamento da curva nesses pontos pode ser analisado. O ponto A corresponde à região onde o comportamento da resposta do material encontra-se na região elástica, próxima ao limite de proporcionalidade, onde a curva tensão-deformação deixa de ser linear, representa que a deformação plástica teve início. O ponto B encontra-se próximo ao limite de escoamento do material, que é a medida da resistência do material à deformação plástica e, o ponto C, representa a tensão máxima alcançada pelo material. Portanto, como pode ser visto nos gráficos 4 e 5, a região transversal da HAZ tem uma influência considerável para o valor de  $\beta = 1,3$  e uma influência muito pequena no resultado da resposta da chapa para um valor maior de  $\beta$  (no caso, 2,2), comportamento esse já previsto anteriormente em [9].

A largura da HAZ independe das dimensões totais da placa. De acordo com [11], pode-se considerar como sendo igual a 25 milímetros o comprimento da região afetada pelo calor, considerado na direção transversal ao cordão de solda. Essa consideração foi utilizada nos modelos aqui desenvolvidos. Nessas regiões, foram utilizadas as propriedades do material termicamente afetado, que podem ser vistas no item 1.4.

## 3. Modelos

### 3.1 Carregamento Uniaxial

Nessa etapa do projeto, o carregamento nos modelos será feito deslocando-se um dos bordos, no sentido uniaxial e longitudinal, em direção ao bordo oposto que permanecerá fixo. Esse deslocamento causará a compressão da chapa. Levando-se em conta que a base dos reforços localizados na chapa não irá fletir, considerou-se a chapa estando com

as fronteiras transversais e a região central da chapa simplesmente apoiadas, conforme indica a figura 11.

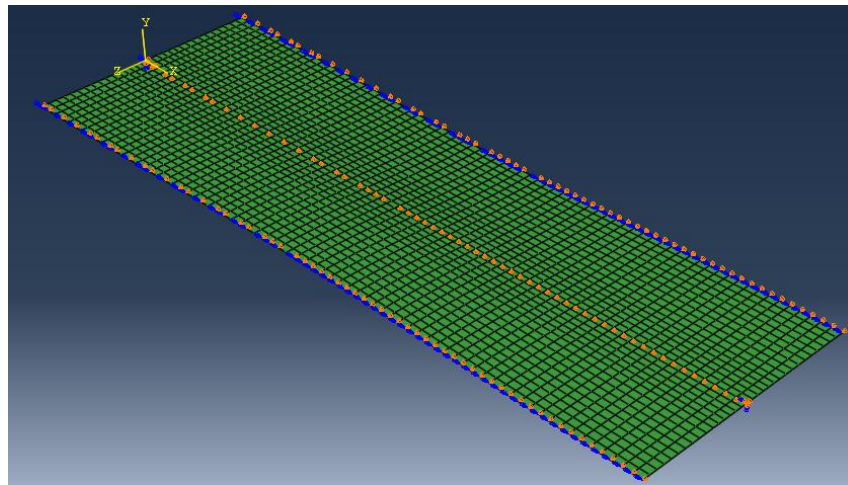


Figura 11 - Condições de contorno na chapa sujeita a carregamento uniaxial

A partir dos modelos de elementos finitos e das considerações discutidas anteriormente, foi possível a obtenção dos gráficos de tensão-deformação das chapas estudadas. A tabela 3 indica as chapas analisadas com seus respectivos coeficientes ( $\beta, HR$ ) e dimensões ( $a, b, t$ ).

Tabela 3 - Parâmetros e dimensões das chapas analisadas

<b>Chapas analisadas</b>				
<b>Beta</b>	<b>HR</b>	<b>a (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>t (mm)</b>
1,3	3	225	75	3,21
1,3	8	600	200	8,57
1,3	14	1050	350	14,99
2,2	3	225	75	1,90
2,2	8	600	200	5,06
2,2	14	1050	350	8,86
3,5	3	225	75	1,19
3,5	8	600	200	3,18
3,5	14	1050	350	5,57
5,5	3	225	75	0,76
5,5	8	600	200	2,02
5,5	14	1050	350	3,54

Exemplificando os cálculos feitos para obtenção das dimensões da chapas  $\beta = 1,3$  e  $HR = 3$  temos:

$$\begin{matrix} \beta = 1,3 \\ HR = 3 \end{matrix} \implies \begin{matrix} b = 25 \text{ mm} * HR = 75 \text{ mm} \\ a = b * 3 = 225 \text{ mm} \end{matrix} \implies t = \frac{b}{\beta} \sqrt{\frac{\sigma_o}{E}} = 3,21 \text{ mm}$$

As figuras abaixo indicam a variação das tensões de *Von Mises*, em N/mm<sup>2</sup>, em três das chapas analisadas. Nos exemplos abaixo, pode-se notar a diferença de comportamento conforme são variados os parâmetros  $\beta$  e  $HR$ . A figura 12 representa uma chapa com modo de falha em meia-onda ( $m = 1$ ) e as figuras 13 e 14 representam duas chapas com modo de falha em três meias ondas ( $m = 3$ ).

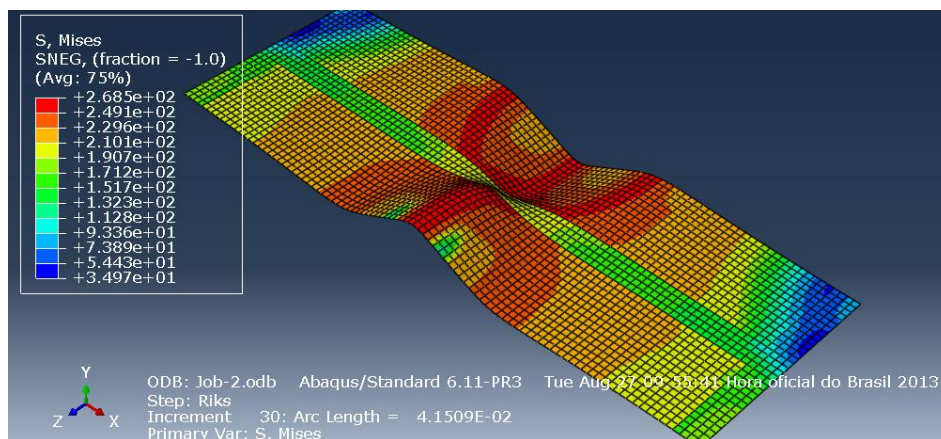


Figura 12 - Chapa com Beta 1,3 e HR 8 (compressão uniaxial longitudinal)

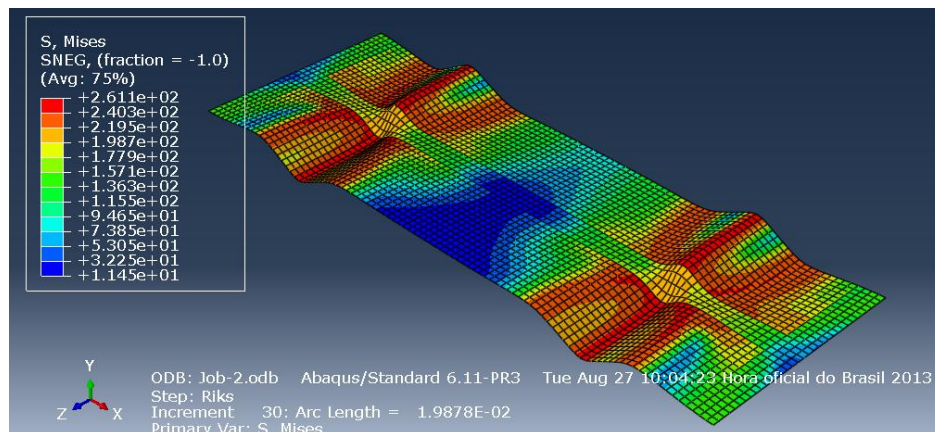


Figura 13 - Chapa com Beta 5,5 e HR 8 (compressão uniaxial longitudinal)

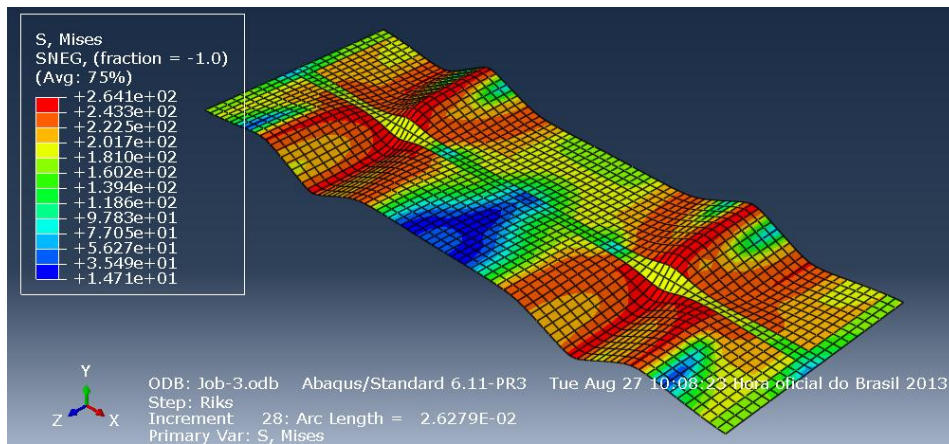


Figura 14 - Chapa com Beta 3,5 e HR 14 (compressão uniaxial longitudinal)

Ainda nas figuras 12, 13 e 14, é possível perceber claramente a diferença de comportamento na região termicamente afetada, que possui uma menor capacidade de resposta aos efeitos de compressão. A seguir, serão apresentados os gráficos da tensão de resposta da chapa normalizada pela tensão de prova em função da deformação normalizada pela deformação de prova. A partir dos gráficos 6, 7, 8 e 9, por exemplo, pode ser obtida, para qualquer combinação entre a Razão de Esbeltez e Razão de Largura Afetada pelo Calor, a solução através de interpolação em três partes. O método de interpolação pode ser visto no item 4.

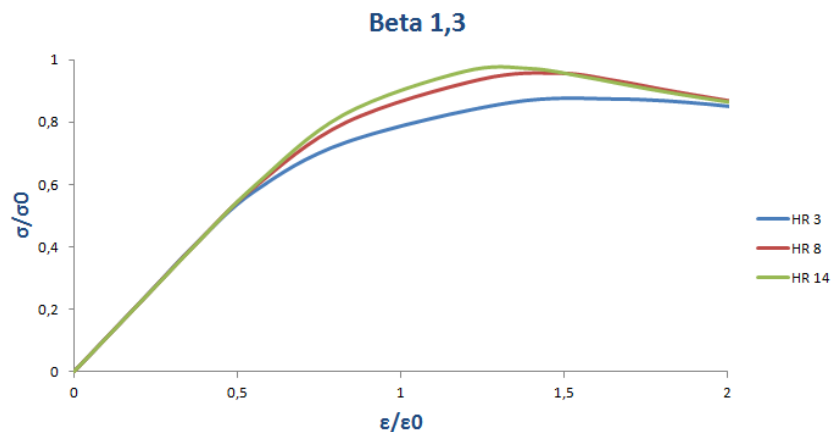


Gráfico 6 - Tensão x deformação para a chapa Beta 1,3 (compressão uniaxial longitudinal)

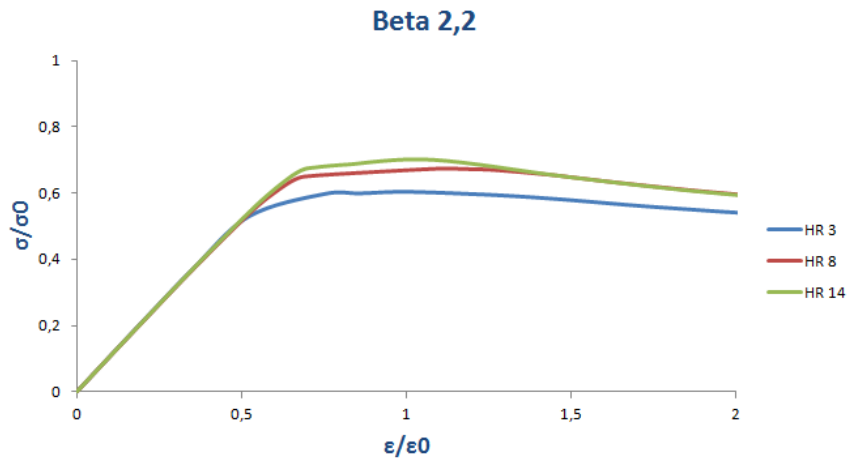


Gráfico 7 - Tensão x deformação para a chapa Beta 2,2 (compressão uniaxial longitudinal)

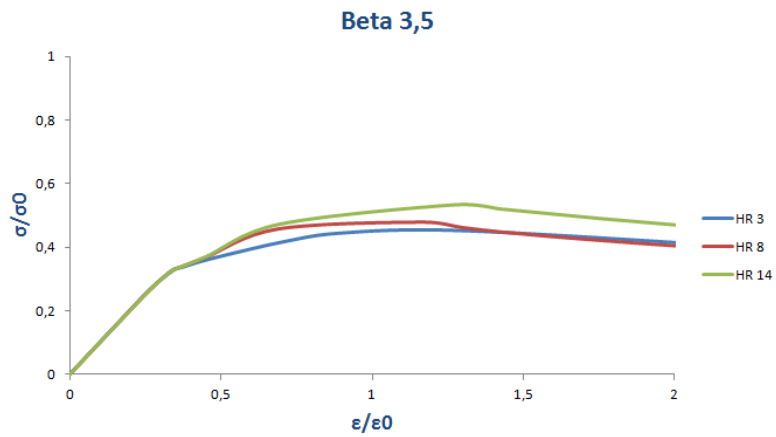


Gráfico 8 - Tensão x deformação Beta 3,5 (compressão uniaxial longitudinal)

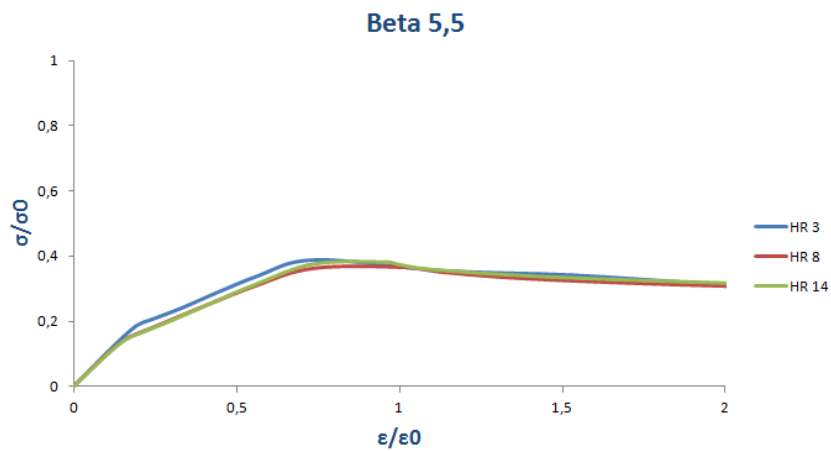


Gráfico 9 - Tensão x deformação para a chapa Beta 5,5 (compressão uniaxial longitudinal)

## 3.2 Carregamento Biaxial

O efeito da combinação de carregamentos longitudinais e transversais numa chapa está recebendo uma grande atenção atualmente. O carregamento biaxial tende a ocorrer em uma chapa naval reforçada devido às significativas componentes transversais de carregamento.

A rigidez biaxial da chapa é comumente apresentada em diagramas interativos que combinam a resistência última da chapa na direção longitudinal com a correspondente carga aplicada na direção transversal [9]. As tensões longitudinais e transversais são geralmente representadas de forma normalizada, dividindo-as pela respectiva tensão uniaxial compressiva da chapa na mesma direção da carga. Para isso, podemos, por exemplo, utilizar as fórmulas empíricas dadas por Faulkner [16] e Valsgard [17]. Assim,

$$R_x = \frac{\sigma_{med,x}}{\sigma_u} \quad R_y = \frac{\sigma_{med,y}}{\sigma_{uy}} \quad (6)$$

As fórmulas apresentadas na literatura, geralmente, representam uma forma parecida com o critério de von Mises [10] com os coeficientes no lugar de alguns termos. Desprezando os efeitos da tração e pressão lateral, a expressão ficaria da seguinte forma [5]:

$$(R_x)^{c1} + \gamma R_x R_y + (R_y)^{c2} = 1 \quad (7)$$

A equação acima pode representar a fórmula de von Mises se fizermos  $c1 = c2 = 2$  e  $\gamma = 1$ . Para chapas submetidas à tensão biaxial, é assumido que o campo de tensões é

constante ao longo da superfície da chapa. Assim, a falha ocorrerá quando a tensão resultante da combinação das cargas se tornar igual ao critério de escoamento de von Mises. Então, o diagrama de interação equivale à elipse de von Mises em toda a região de tensão.

Paik [10] sugere alguns valores de coeficientes para estimar a curva de interação quando as cargas nas duas direções são compressivas. Paik [18] sugere que se utilize  $c_1 = c_2 = 2$  e  $\gamma = 0$  quando as duas cargas são compressivas. Já a regra DNV HSLC [19] indica que para chapas de alumínio, podemos usar  $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 1.2$  e  $\gamma = -0,8$ .

Para simular em elementos finitos a situação de carregamento biaxial compressivo, foram feitos dois passos: primeiramente, foi aplicada uma pequena pressão (10% da tensão de escoamento do material) nos bordos da chapa no sentido transversal e, após isso, foi utilizado o mesmo procedimento para simular a situação de carregamento uniaxial, ou seja, deslocou-se um dos bordos, no sentido longitudinal, em direção ao bordo oposto que permaneceu fixo.

No primeiro passo, as condições de contorno utilizadas foram tais que restringiu-se os centroides de ambas as larguras da chapa para que os mesmos não se deslocassem nem sofressem rotação. O condição de contorno utilizada no segundo passo da análise é igual à condição de contorno apresentada para carregamento uniaxial compressivo, conforme figura 11. A figura 15 mostra as condições de contorno e a distribuição da pressão aplicada no primeiro passo da análise.



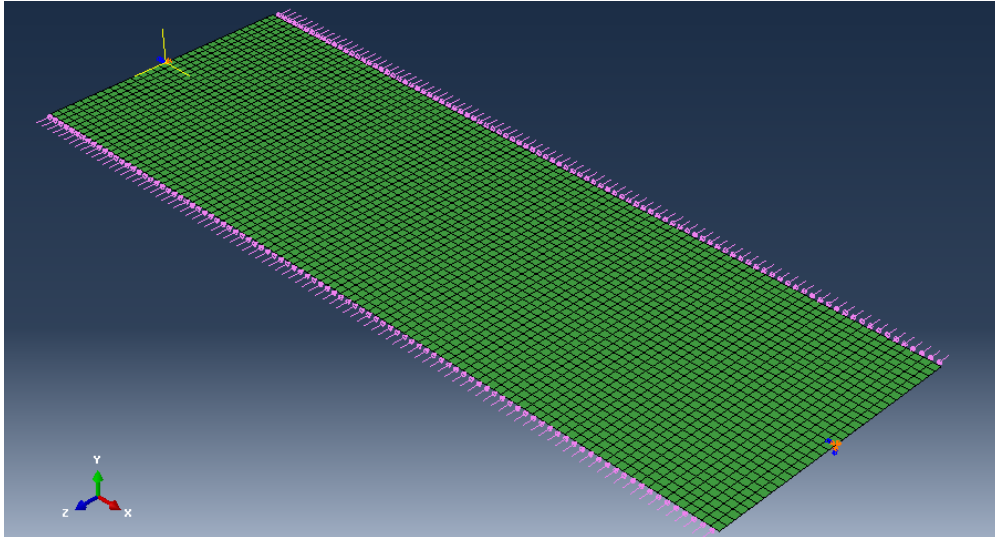


Figura 15 - Condições de contorno e pressão aplicada no sentido transversal

Para simular o comportamento das chapas sujeitas a um carregamento biaxial compressivo, foram analisadas as chapas de parâmetros  $\beta = 1,3$ ,  $\beta = 2,2$  e  $\beta = 5,5$ . Para cada uma delas, variou-se o  $HR$  para três valores: 3, 8 e 14. As dimensões dessas chapas podem ser verificadas na tabela 3. As figuras abaixo indicam a variação das tensões de *Von Mises*, em  $N/mm^2$ , em três das chapas analisadas. Nos exemplos abaixo, pode-se notar a diferença de comportamento conforme são variados os parâmetros  $\beta$  e  $HR$ . A figura 16 representa uma chapa com modo de falha em meia-onda ( $m = 1$ ) e as figuras 17 e 18 representam duas chapas com modo de falha em três meias ondas ( $m = 3$ ).

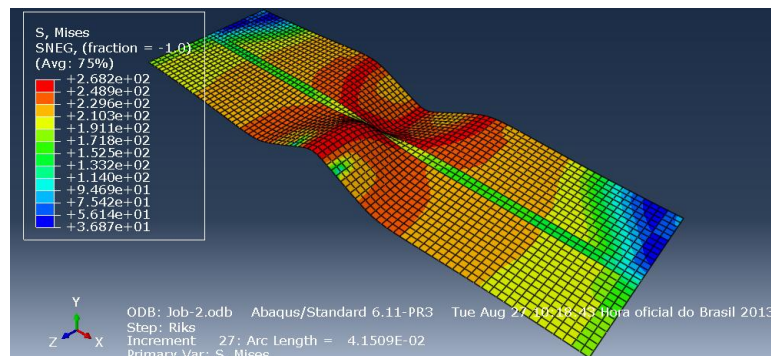


Figura 16 - Chapa com Beta 1,3 e HR 14 (compressão biaxial)

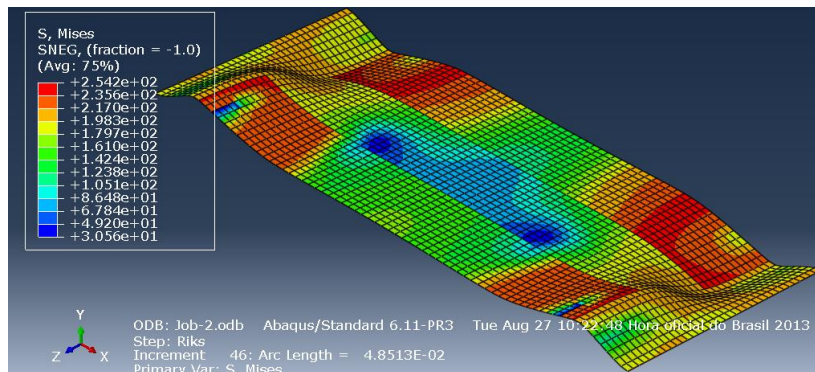


Figura 17 - Chapa com Beta 1,3 e HR 3 (compressão biaxial)

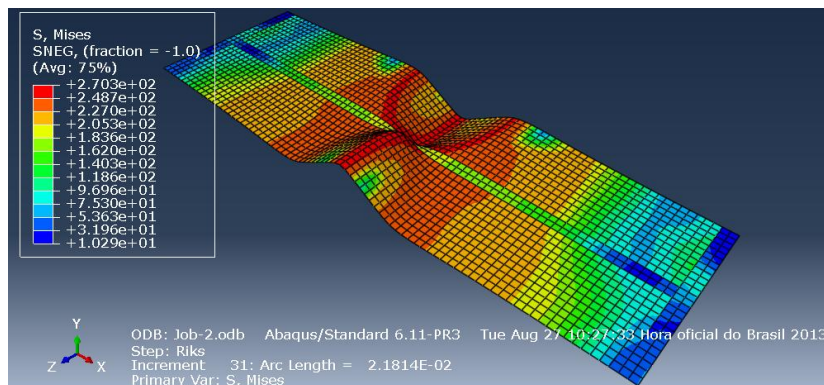


Figura 18 - Chapa com Beta 2,2 e HR 14 (compressão biaxial)

Conforme visto para os chapas em compressão uniaxial, é possível perceber que as chapas sob carregamento biaxial compressivo também possuem uma diferença na região termicamente afetada, que possui uma menor capacidade de resposta aos efeitos de compressão.

Os gráficos da tensão de resposta da chapa pela deformação, normalizadas respectivamente pela tensão de prova e pela deformação de prova, estão representados a seguir (gráficos 10 e 11).

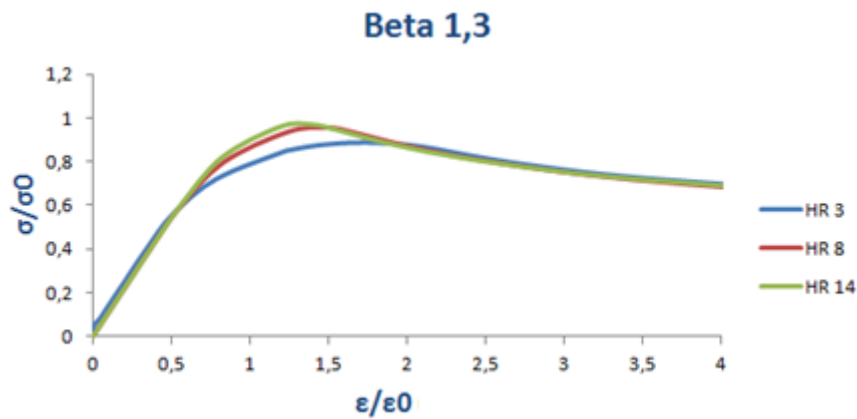


Gráfico 10 - Tensão x deformação para a chapa Beta 1,3 (compressão biaxial)

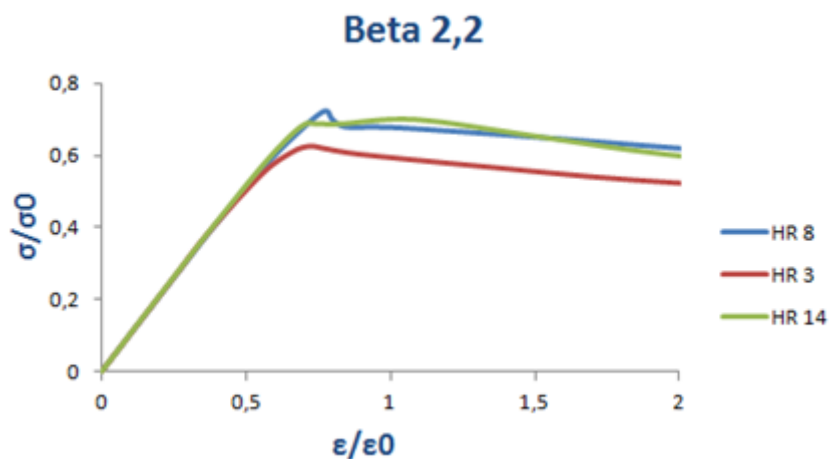


Gráfico 11 - Tensão x deformação para a chapa Beta 2,2 (compressão biaxial)

A partir dos gráficos 10 e 11, pode-se obter a resposta para qualquer combinação entre a Razão de Esbeltez e Razão de largura afetada pelo calor, utilizando o método da interpolação em três partes. O item 4 apresenta um exemplo do uso do método de interpolação para chapas sujeitas a carregamento uniaxial, que pode ser utilizado de maneira análoga para obtenção da resposta de chapas sujeitas a carregamento biaxial.

## 4. Método de Interpolação

Agora, será apresentado como aplicar o método de interpolação para obtenção de chapas com parâmetros intermediários aos parâmetros das chapas anteriormente analisadas. Será desenvolvido um exemplo para obter a resposta da chapa de parâmetros  $\beta = 1,8$  e  $HR = 5$  sujeita a carregamento uniaxial compressivo. Vale ressaltar que o procedimento utilizado aqui pode ser igualmente aplicado às chapas sujeitas a carregamento biaxial compressivo. Primeiramente, devemos perceber que nenhuma chapa analisada nesse trabalho possuía  $\beta$  ou  $HR$  iguais aos desejados. Portanto, para chegarmos ao resultado desejado, utilizaremos as chapas  $\beta = 1,3$  e  $\beta = 2,2$ . Obteremos, então, a chapa  $\beta = 1,3$  e  $HR = 5$  através da interpolação das chapas de mesmo  $\beta$  com  $HR$  igual a 3 e 8 (valores imediatamente abaixo e acima do desejado). Procedimento análogo é feito para obter a chapa  $\beta = 2,2$  e  $HR = 5$ . Os resultados dessa interpolação podem ser visto no gráficos 12 e 13.

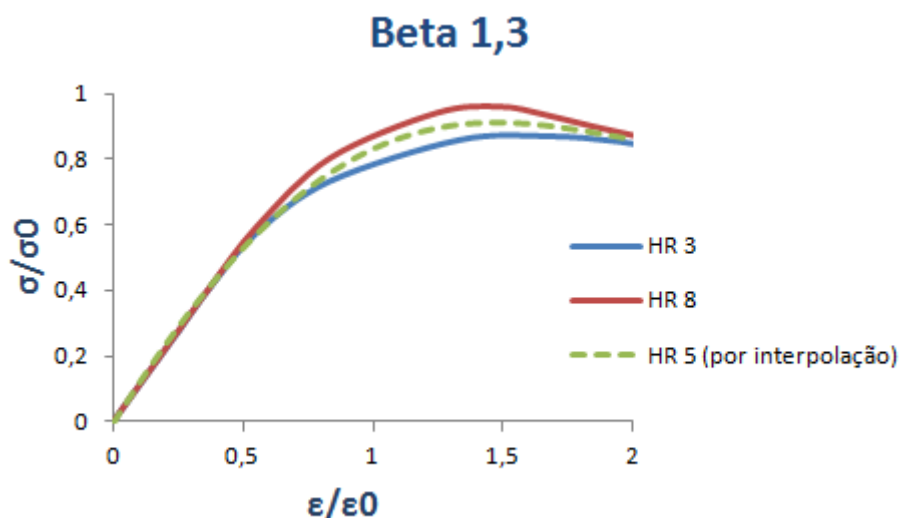


Gráfico 12 - Interpolação do HR (Beta 1,3)

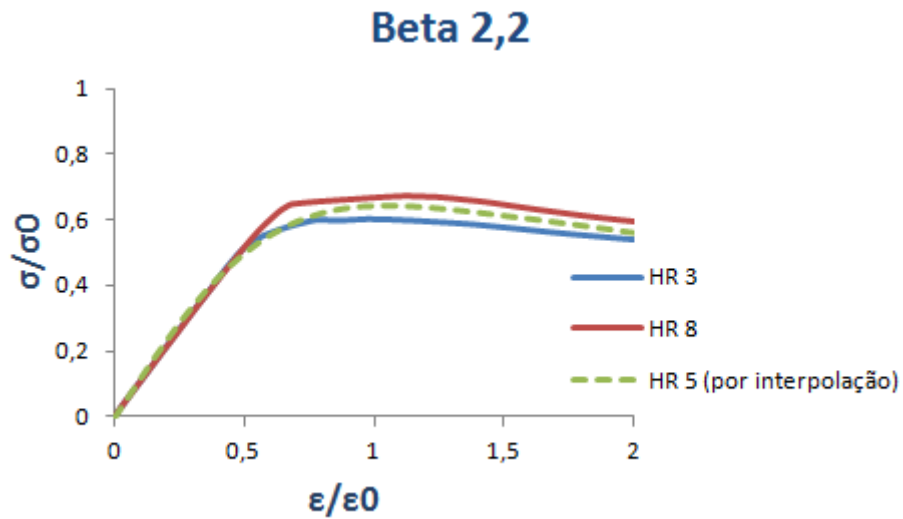


Gráfico 13 - Interpolação do HR (Beta 2,2)

Obtidos os gráficos 12 e 13, o próximo passo é a obtenção da chapa desejada interpolando  $\beta$  para as chapas com  $\beta = 1,3$  e  $2,2$  e  $HR = 5$ . O resultado final está indicado no gráfico 14.

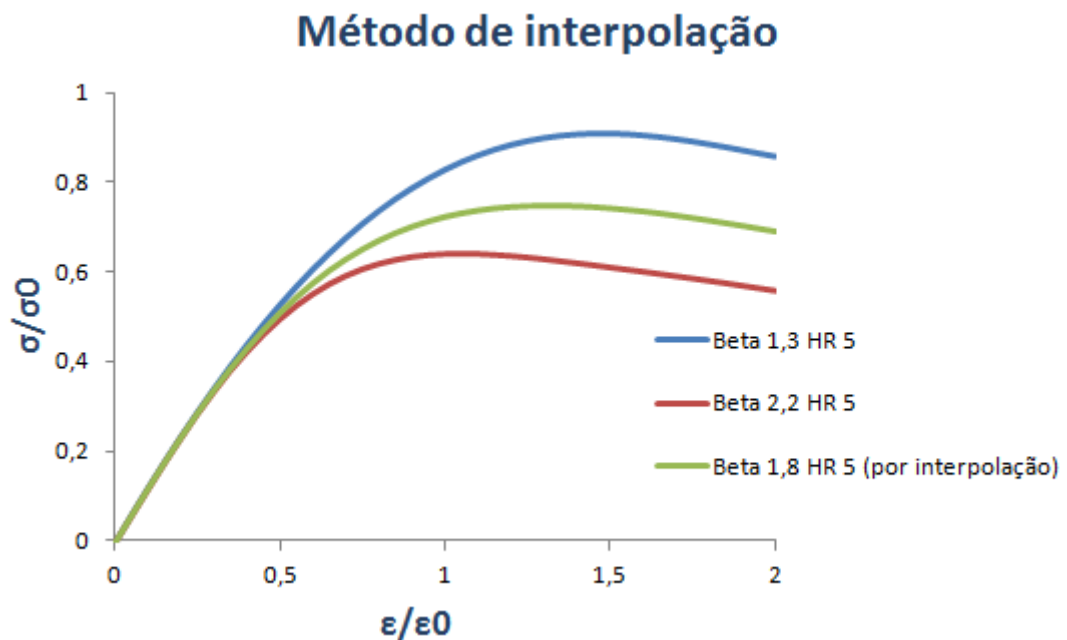


Gráfico 14 - Beta 1,8 HR 5 (por interpolação)

Por fim, o resultado obtido será comparado com o resultado obtido para a mesma chapa através de elementos finitos. A comparação entre os resultados está indicado no gráfico 15.

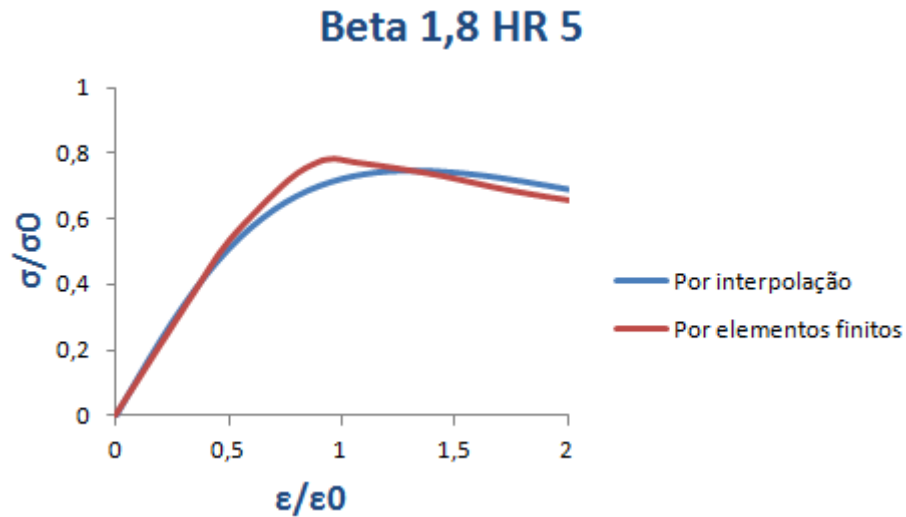


Gráfico 15 - Comparação de resultados

Pela comparação acima, podemos perceber que os obtidos por interpolação e por elementos finitos não foram muito diferentes. As pequenas diferenças encontradas podem ser explicadas pelas aproximações polinomiais durante o processo de interpolação.

## 5. Conclusão

Como visto no decorrer do trabalho, uma estimativa da resistência última das chapas pode representar uma ideia de como a estrutura se comportará em sua totalidade. Para isso, vimos que o método de estimativa da resistência através de elementos finitos pode fornecer excelentes resultados. Foi possível observar, também, que alguns fatores podem ou não influenciar na resposta final da chapa quando um carregamento compressivo, seja ele uniaxial ou biaxial, é aplicado à mesma. A análise da influência do refinamento da malha, da tensão residual e da forma da imperfeição geométrica não podem ser negligenciadas na análise, uma vez que esses fatores podem representar uma grande diferença no resultado final da análise dependendo do tipo de modelo que está sendo desenvolvido. Outra questão importante discutida no trabalho foi a avaliação da localização da zona termicamente afetada no modelo. A utilização de diferentes disposições da HAZ pode resultar em diferentes respostas das chapas sujeitas a algum tipo de carregamento, quer seja uniaxial ou biaxial.

Por fim, os resultados obtidos com as análises feitas no presente trabalho foram considerados satisfatórios, uma vez que confirmaram predições feitas por outros autores em trabalhos antigos. A interpolação se mostrou um método eficaz para obtenção de resultados para chapas utilizando resultados já conhecidos. Em trabalhos futuros, os resultados aqui obtidos podem ser utilizados de forma a se obter a resposta à compressão (uniaxial ou biaxial) para chapas com parâmetros intermediários aos que aqui foram analisados, bem como para utilizá-los para fins de se obter a resposta total de um painel reforçado através de métodos semi-analíticos.

## 6. Referências Bibliográficas

- [1] Muckle, W., 1964, "The Development of The Use of Aluminium in Ships," Transactions of the North-East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, 80(6), pp. 219-238.
- [2] Arthur, K.M., 2011, "Predicting the Failure of Aluminum Exposed to Simulated Fire and Mechanical Loading Using Finite Element Modeling", Blacksburg, VA.
- [3] Cui, W., Wang, Y., Pedersen, P.T., 2001, "Strength of ship plates under combined loading", Elsevier Science Ltd.
- [4] Guedes Soares C., "Design equation for ship plate elements under uniaxial compression". J Construct Steel Res 1992;22:99–114.
- [5] Modenesi, P.J., 2008, "Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico", Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [6] Nicol, G., 1909, "Ship Construction and Calculations", J. Brown and Son.
- [7] Sielski, R. A., 2007, "Aluminium Marine Structure Design and Fabrication Guide", Ship Structures Committee.
- [8] Mazzolani, F.M., 2nd ed. 1995, "Aluminium Alloy Structures", London, New York: E & FN Spon, xix, 693.
- [9] Benson, S., 2011, "Progressive Collapse Assessment of Lightweight Ship Structures", Newcastle University, UK.
- [10] Paik, J.K., Thayambally, A.K., 2003. "Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures".
- [11] Paik, j.K., Duran, A., "Ultimate Strength of Aluminium Plates and Stiffened Panels for Marine Applications". Marine Technology, 2004. 41(3): p. 108-121.
- [12] Benson, S., Downes, J., Dow, R.S., 2009, "Ultimate strength characteristics of aluminium plates for high speed vessels".



- [13] da Silva, P.S.B, 2012, "Método Semi-Analítico para Estimativa da Resistência de Painéis Enrijecidos", Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [14] Conrardy, C., Dull, R., "Control of Distortion in Thin Ship Panels", *Journal of Ship Production*, 1997. 13(2): p. 83-92.
- [15] Rigo, P., Sarghiuta, R., Otelea, S.C., Pasqualino, I., Wan, Z., Yao, T., Toderan, C., Richir, T., 2004, "Ultimate strength of aluminium stiffened panels: Sensitivity analysis".
- [16] Faulkner, D., 1975, "A Review of Effective Plating for use in the Analysis of Stiffened Plating in Bending and Compression", *Journal of Ship Research*, 19(1): p. 1-17.
- [17] Valsgard, S., 1980, "Numerical Design Prediction of the Capacity of Plates in Biaxial In-Plane Compression", *Computers and Structures*, 12(5): p. 729.
- [18] Paik, J.K., Thayamballi, A.K., Kim, B.J., 2001, "Advanced Ultimate Strength Formulations for Ship Plating Under Combined Biaxial Compression/Tension, Edge Shear, and Lateral Pressure Loads", *Marine Technology*, 38(1).
- [19] DNV, 2001, "Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft", Det Norske Veritas.