

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

GABRIEL ZILIO

OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DO ARRANJO DE UM PAINEL ESTRUTURAL
SUBMETIDO A PRESSÃO UNIFORME, UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

Joinville
2018

GABRIEL ZILIO

OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DO ARRANJO DE UM PAINEL ESTRUTURAL
SUBMETIDO A PRESSÃO UNIFORME, UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Naval, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Naval.

Orientador: Dr. Eng. Thiago Pontin
Tancredi

Joinville
2018

OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DO ARRANJO DE UM PAINEL ESTRUTURAL
SUBMETIDO A PRESSÃO UNIFORME, UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

GABRIEL ZILIO

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título do bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville.

Joinville (SC), 05 de julho de 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr. Eng.
Presidente / Orientador

Prof. Rafael Gallina Delatorre, Dr. Eng.
Membro

Prof. Vitor Takashi Endo, M. Eng.
Membro

RESUMO

O mercado de embarcações navais está cada vez mais competitivo. Esta disputa instiga engenheiros à busca de processos eficientes no corte de custos. O uso de técnicas de otimização vem se mostrando uma poderosa estratégia no processo de tomada de decisão. Nesse contexto, propõe-se a aplicação de técnicas de otimização ao projeto da unidade básica que compõe a estrutura de um navio, o painel estrutural. O objetivo é um projeto eficiente, resultando em melhor aproveitamento dos materiais e dos processos de fabricação. O painel estrutural corresponde a uma porção contínua de chapa reforçada por perfis ortogonais. A otimização da eficiência passa pela determinação de diversas variáveis de decisão, como espessura de chapa e geometria e espaçamentos dos reforçadores. A análise estrutural considerou o painel com extremidades engastadas e apoiadas, submetido a uma pressão uniforme. A determinação do campo de tensões da estrutura empregou o Método dos Elementos Finitos, com elementos de casca e viga, utilizando o *Ansys Workbench*. Por fim utilizou-se o algoritmo genético NSGA-II para buscar a topologia ótima da estrutura. Foram realizadas diferentes abordagens de otimização, buscando a minimização da massa, tensão e comprimento de solda. A verificação do tamanho da população inicial (DOE), mostrou que uma população correspondendo a 5% do máximo de análises permitidas, resultou na Fronteira de Pareto dominante e com maior número de indivíduos ótimos. Os indivíduos de Pareto apresentam uma tendência de possuírem 2 reforçadores pesados longitudinais. Foi verificado que vários indivíduos ótimos possuem um comprimento mínimo comum com diferentes massas estruturais.

Palavras-chave: Otimização. Painel Estrutural. MEF. Multiobjetivo.

ABSTRACT

The market of naval vessels is getting more competitive. That dispute instigate engineers to search for efficient process on cost reduction. The use of optimization technics shows a powerful strategy on decision making process. In this concept, is proposed an application of optimization technics in the basic unity of a naval structure, the structural panel. The goal is an efficient project, resulting in better use of materials and fabrication process. Structural panel corresponds to a continuous portion of plate reinforced with orthogonal profiles. Efficiency optimization pass through the determination of innumerous decision variables, like plate thickness, geometry and spaces between beams. Structural analysis considerate fixed and supported extremities, with uniform pressure. The stress field for that structure was determined with Finite Element Method, using shell and beam elements and the *Ansys Workbench*. It will be used the NSGA-II genetic algorithm, searching for better topology. Many different approach was used for optimization, searching for the minimization of mass, stress and weld length. The investigation of distinct sizes for initial population (DOE) show that the one with 5% presented dominance and bigger number of optimum designs. Pareto designs who have 2 heavy longitudinal stringers are a trend. When the topic is weld length, was contacted that are several great configurations with the same minimum length, showing different mass.

Keywords: Optimization. Structural Panel. FEM. Multi-objective.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Madrid Maersk e Vale Beijing.....	14
Figura 2 – Cargas estáticas.....	19
Figura 3 – Onda de alquebramento e de tosamento.....	20
Figura 4 – Decomposição de esforços variando a ordem de grandeza.	21
Figura 5 – Resposta dos reforçadores a pressão local.	23
Figura 6 – Unidade de chapeamento solicitada por pressão hidrostática.	24
Figura 7 – Alternativas para compra do caminhão.....	33
Figura 8 – Fronteira de Pareto.	34
Figura 9 – Número de indivíduos na fronteira de Pareto para cada total.	38
Figura 10 – Comparação das fronteiras de Pareto para diferentes totais.	39
Figura 11 – Fluxograma do processo de otimização.....	41
Figura 12 – Detalhamento de um painel estrutural no fundo de uma embarcação. ..	43
Figura 13 – Espaçamento entre perfis.	43
Figura 14 – Especificações de geometria da chapa e perfis.....	44
Figura 15 – Corpo de superfície representando a chapa do fundo.	46
Figura 16 – Multiplicação dos corpos de linha (reforçadores).....	47
Figura 17 – Modelagem geométrica do painel reforçado.	48
Figura 18 – Painel estrutural discreto com 8740 elementos.....	50
Figura 19 - Efeito de rotação dos costados.....	51
Figura 20 – Campo de distorções em um painel estrutural.	52
Figura 21 – Comparação entre numérico e analítico dos indivíduos na fronteira de Pareto com 500 análises.....	61
Figura 22 – Valores de S/p equivalentes à população inicial e total com DOE de 1%.	62
Figura 23 – Valores de S/p equivalentes à população inicial e total com DOE de 5%.	62
Figura 24 – Otimizações limitadas a 500 indivíduos (modelo analítico).....	64
Figura 25 – Otimizações limitadas a 500 indivíduos (modelo MEF).....	64
Figura 26 – Comparação entre Fronteiras de 5% DOE e 500 indivíduos.....	65
Figura 27 – Comparação entre numérico e analítico dos indivíduos na fronteira de Pareto com 1000 análises.....	68
Figura 28 – Otimizações limitadas a 1000 indivíduos (modelo MEF).....	69

Figura 29 – Otimizações limitadas a 1000 indivíduos (modelo analítico).	69
Figura 30 – Comparação entre Fronteiras de 5% DOE e 500 indivíduos.....	70
Figura 31 – Influência da espessura de chapa " t_c " nos indivíduos de Pareto.	73
Figura 32 – Influência do espaçamento entre leves " S_l " nos indivíduos de Pareto. .	73
Figura 33 – Influência do espaçamento entre pesados " S_{lp} " nos indivíduos de Pareto.	75
Figura 34 – Influência do espaçamento entre transversais " S_t " nos indivíduos de Pareto.....	76
Figura 35 – Influência das dimensões da alma do reforçador leve nos indivíduos de Pareto.....	77
Figura 36 – Influência das dimensões do flange do reforçador leve nos indivíduos de Pareto.....	77
Figura 37 – Influência de W_{fl} na massa contabilizando ótimos de Pareto e DOE de 20%.....	79
Figura 38 – Influência da inércia de seção transversal do reforçador leve nos indivíduos de Pareto.....	79
Figura 39 – Comportamento da variável H_{ap} durante a otimização da tensão.	81
Figura 40 – Comportamento da variável H_{ap} durante a otimização da massa.	82
Figura 41 – Comparação entre fronteiras de Pareto com diferentes totais.	83
Figura 42 – Limites das fronteiras de Pareto.....	84
Figura 43 – Regiões da Fronteira escolhidas para refino.....	86
Figura 44 – Indivíduos pertencentes a fronteira para modelagem 3d.	90
Figura 45 – Arranjo que representa os painéis levianos.	91
Figura 46 – Arranjo que representa os painéis de massa mediana.	91
Figura 47 – Arranjo que representa os painéis robustos.....	92
Figura 48 – Indivíduos selecionados para comparação aço e alumínio.	94
Figura 49 – Painel com tensão equivalente limitada a tensão de escoamento do alumínio.....	95
Figura 50 – Painel com tensão equivalente limitada a tensão de escoamento do aço.	95
Figura 51 – Indivíduos de Pareto em uma otimização de minimizar o comprimento solda.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Etapas de execução.....	37
Tabela 2 – Otimizações realizadas para minimizar massa e tensão.....	40
Tabela 3 – Caracterização das dimensões utilizadas no projeto.....	45
Tabela 4 – Intervalos para realização da síntese.....	54
Tabela 5 – Mínimos e máximos das respectivas curvas de Pareto para 500 análises.	66
Tabela 6 – Porcentagem de soluções inviáveis (limitada a 500 análises).....	67
Tabela 7 – Mínimos e máximos das respectivas curvas de Pareto para 1000 análises.	70
Tabela 8 – Porcentagem de soluções inviáveis (limitada a 1000 análises).....	71
Tabela 9 – Valores ótimos locais das variáveis de decisão.	80
Tabela 10 – Comparação de resultados.	85
Tabela 11 – Arranjos de base para refino de 48 toneladas.....	87
Tabela 12 – Intervalos de valores para as variáveis no refino de 48 toneladas.....	87
Tabela 13 – Configurações equivalentes após refino de 48 toneladas.	88
Tabela 14 – Arranjo ótimo com relação ao comprimento de solda.....	98

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

TEU	Unidade equivalente de vinte pés	
x	Posição longitudinal do ponto de análise	[m]
σ	Tensão longitudinal na viga navio	[Pa]
Z_p	Altura do ponto de interesse na seção transversal da viga	[m]
Z_{LN}	Altura da linha neutra da seção transversal da viga navio	[m]
I_{LN}	Inercia de seção transversal da viga navio em relação a linha neutra	[m ⁴]
$M(x)$	Momento fletor na posição x	[N*m]
X	Vetor de variáveis de decisão	
x_n	Variável de decisão n	
$f(X)$	Função objetivo	
c_n	Peso relativo de cada função objetivo	
$x_{máx}$	Limite superior de restrição explícita	
$x_{mín}$	Limite inferior de restrição explícita	
$f'_i(X)$	Restrição de desigualdade	
$f''_k(X)$	Restrição de igualdade	
AG	Algoritmo genético	
DOE	Número de indivíduos presentes na população inicial	
W	Largura do painel estrutural	[m]
L	Comprimento do painel estrutural	[m]
Slp	Distância entre reforçadores longitudinais pesados	[m]
Sll	Distância entre reforçadores longitudinais leves	[m]
St	Distância entre reforçadores transversais	[m]
tc	Espessura de chapa	[m]
Ha	Altura da alma do reforçador	[m]
Wf	Largura do flange do reforçador	[m]
ta	Espessura da alma do reforçador	[m]
tf	Espessura do flange do reforçador	[m]
P	Pressão	[Pa]
ρ_{sw}	Massa específica da água salgada	[kg/m ³]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
H	Calado	[m]

<i>Cop</i>	Número de cópias dos reforçadores	
<i>Si</i>	Espaçamento entre extremidade e reforço	[m]
<i>F1</i>	Objetivo de minimizar massa	
<i>F2</i>	Objetivo de minimizar tensão	
<i>F3</i>	Objetivo de minimizar comprimento de solda	
<i>M</i>	Massa total de cada reforçador	[kg]
<i>Mc</i>	Massa do chapeamento	[kg]
<i>Mt</i>	Massa total do painel	[kg]
<i>CS</i>	Comprimento de solda	[m]
<i>Svm</i>	Tensão equivalente de Von Mises	[Pa]
<i>I</i>	Inércia de cada reforçador	[m ⁴]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	16
1.1.1	<i>Objetivos Específicos</i>	17
1.1.2	<i>Estrutura do trabalho</i>	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Mecânica de estruturas navais.....	18
2.2	Estrutura secundária.....	22
2.3	Estrutura terciária.....	23
2.4	Elementos finitos.....	24
2.5	Painel estrutural.....	26
2.6	Otimização	28
2.7	Formulação de um problema de otimização	29
2.7.1	<i>Variáveis de projeto</i>	29
2.7.2	<i>Função objetivo</i>	30
2.7.3	<i>Restrições.....</i>	31
2.8	Problemas multiobjetivos	32
2.8.1	<i>Conceito de Pareto ótimo</i>	33
2.9	Algoritmos genéticos	35
3	METODOLOGIA.....	36
4	DESENVOLVIMENTO.....	42
4.1	Parâmetros e variáveis de um painel estrutural	42
4.2	Construção e detalhamento do painel reforçado	45
4.2.1	<i>Modelagem geométrica</i>	45
4.2.2	<i>Discretização de elementos finitos</i>	48
4.3	Formulação da otimização de um painel estrutural	53

4.3.1	<i>Modelagem matemática referente ao processo de otimização.....</i>	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1	Minimização de massa e tensão limitada a 500 análises	60
5.2	Minimização de massa e tensão limitada a 1000 análises	67
5.2.1	<i>Influência das variáveis de decisão nos indivíduos de Pareto.....</i>	71
5.3	Otimização mono objetivo	80
5.4	Validação da característica multimodal.....	85
5.5	Análise 3d de indivíduos ótimos em diferentes localidades de Pareto .	89
5.5.1	<i>Comparação entre diferentes materiais.....</i>	93
5.6	Minimização do comprimento de solda.....	96
6	CONCLUSÃO.....	99
	REFERÊNCIAS.....	101
	APÊNDICE A – Estrutura primária	104
	APÊNDICE B – Algoritmos genéticos.....	108
	APÊNDICE C – Ilustração de diferentes elementos finitos.....	112
	APÊNDICE D – Influência das variáveis na Fronteira de Pareto	115
	APÊNDICE E – Dados dos refinamentos utilizados.....	118
	APÊNDICE F – Configuração dos painéis utilizados na demonstração 3d de diferentes regiões da fronteira.....	122
	APÊNDICE G – Configuração dos painéis utilizados na comparação entre painéis de aço e alumínio	123

1 INTRODUÇÃO

Navios mercantes possuem um papel importante na economia mundial, uma vez que são responsáveis por cerca de 95% dos bens comercializados internacionalmente. (HUGHES; PAIK, 2010). Ainda de acordo com este autor, conforme as dimensões e a complexidade das embarcações aumentam (com intuito de transportar uma maior quantidade de carga), exige-se que os procedimentos de cálculo e análises estruturais evoluam, motivando constantes desenvolvimentos e abordagens associadas ao projeto destas estruturas.

Como exemplo desse processo, pode-se citar o caso do navio Vale Beijing, um dos maiores navios mineraleiros já construídos. Em seu primeiro carregamento, o Vale Beijing sofreu uma falha catastrófica, com o completo afundamento do convés principal. A análise técnica mostrou que o navio sofrera uma flambagem dos elementos transversais do casco. Um tipo de falha nunca antes ocorrido e que, portanto, não era verificado durante o projeto do navio. Hoje, navios de carga com grandes valores de boca exigem esta análise estrutural.

O navio Madrid Maersk mostrado na Figura 1 junto do Vale Beijing é outro exemplo deste processo, já que trata-se da embarcação com maior capacidade de carga já construída, sendo o primeiro de uma série de 11 cargueiros que irão compor a classe EEE Mark 2 com capacidade para transportar até 20568 TEUs. (CINTRA, 2017). Nesse caso, as largas escotilhas e a elevada carga sobre o convés, exigiram um projeto estrutural bastante elaborado a fim de assegurar a integridade da viga navio.

Figura 1 – Madrid Maersk e Vale Beijing.



Fonte: Adaptado de Cintra (2017) e Bulletin (2018).

No que diz respeito ao projeto de embarcações, é cada vez menos comum observarmos projetos fundamentados apenas no conhecimento tácito. Atualmente, projetos de navios são baseados em análises racionais, sendo possível assim obter um dimensionamento coerente da estrutura em função dos esforços atuantes na embarcação.

Uma das etapas do projeto de navios é o projeto estrutural, a qual é foco deste trabalho. Vale salientar uma diferenciação entre análise e projeto. A análise consiste no estudo de uma situação bem caracterizada. Enquanto o projeto remete a uma

atividade de criação que estabelece as dimensões e cargas a serem consideradas. (TANCREDI, 2009).

O futuro da análise de estrutura se assemelha ao que sempre foi praticado, porém agora, com as ferramentas computacionais disponíveis, é possível um aprimoramento, podendo realizar testes confiáveis antes mesmo da construção do protótipo. (BROWN; DALEY, 1999).

A demanda dos armadores por confiabilidade e eficiência em embarcações comerciais de grande porte motivou a introdução e o desenvolvimento de métodos de elementos finitos, permitindo que os engenheiros explorem novos limites para o projeto. Esta abordagem numérica concede liberdade ao projetista na busca por novas soluções, mas é preciso conhecimento de análise estrutural, com intuito de construir um modelo de simulação que represente corretamente o comportamento estrutural diante das diferentes combinações de esforços possíveis. (HUGHES; PAIK, 2010).

Apesar de ferramentas computacionais serem úteis na realização de projetos estruturais, é necessária correta definição dos parâmetros considerados no projeto, incluindo restrições e objetivos a serem alcançados.

Uma das maneiras de realizar a otimização de arranjos e tomar uma decisão coerente de projeto é através de algoritmos genéticos. Entre as técnicas de otimização mais difundidas estão as que utilizam conceitos da seleção natural, conhecidos como algoritmos evolutivos. (LAMB, 2003).

O projeto estrutural deve compreender e prever modos de falha para uma ampla gama de carregamentos, garantindo a integridade da estrutura. Para isso, a análise estrutural de uma embarcação pode ser subdividida em dois grupos, efeitos globais e locais. (AUGUSTO, 2007).

Existem diversos parâmetros e variáveis que representam os arranjos estruturais e o comportamento destes, tais como, os espaçamentos, as dimensões de perfis, entre outros. Tais parâmetros são conhecidos como variáveis de projeto e são definidos pelo engenheiro na atividade de criação. E é na determinação destas variáveis que reside a possibilidade de otimização de uma estrutura naval. (MULLER, 2016).

O trabalho de Chaves (2013), mostra que mesmo obedecendo a norma de uma sociedade classificadora, existem inúmeras variações possíveis para o arranjo estrutural de uma embarcação, algumas mais e outras menos eficientes.

Este trabalho segue neste contexto, e seguirá o desenvolvimento daquele apresentado por Muller (2016). Contudo, com uma diferença crucial, o trabalho base utiliza uma abordagem totalmente analítica, enquanto o presente trabalho utiliza procedimentos numéricos, baseados no método dos elementos finitos, para a obtenção de um painel otimizado.

A realização do trabalho compreenderá o desenvolvimento de um modelo paramétrico capaz de descrever um painel estrutural em um programa de elementos finitos. Um esboço do painel será modelado e conforme as variáveis de projeto são alteradas, a configuração de tensão atuante no painel, assim como a respectiva massa, variam.

A alteração das variáveis de projeto será feita com o auxílio de um algoritmo genético, acoplado diretamente ao programa de modelagem.

Trabalhos anteriores, em especial de Chaves (2013) e Muller (2016), mostraram que existem diferentes configurações igualmente ótimas para o arranjo de um painel estrutural submetido a pressão uniforme. Ou seja, existem diferentes arranjos topológicos que resultam em níveis consideravelmente próximos de tensão e massa.

Assim, outro fator a ser avaliado será o comprimento de solda no painel. Embora a massa total do painel não considere o volume de solda necessário para a fabricação do painel, o processo de soldagem representa um importante custo associado à construção de um navio.

Portanto, o comprimento de solda representa uma interessante estratégia para selecionar as características de um projeto estrutural dentro de um conjunto de opções igualmente ótimas quando se considera o objetivo de minimizar a massa de uma estrutura submetida ao mesmo limite de tensão.

1.1 Objetivos

Diante do contexto descrito na introdução e motivado pela importância do setor da construção naval tanto no cenário nacional, quanto no estado de Santa Catarina, este trabalho tem como objetivo principal:

- Obter, usando técnicas de otimização, o conjunto de parâmetros ótimos que minimiza a massa do painel e a tensão equivalente, cuja análise é realizada aplicando-se o método dos elementos finitos. Posteriormente verifica-se a influência do comprimento de solda na solução do problema associado ao projeto de um painel estrutural submetido a pressão uniforme.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Compreender os conceitos envolvidos na análise da estrutura local de um navio;
- Desenvolver um modelo paramétrico para o projeto de um painel estrutural de embarcações considerando apenas esforços locais;
- Desenvolver o modelo paramétrico descrito anteriormente de tal forma que esse possa ser analisado utilizando-se o método dos elementos finitos;
- Acoplar uma ferramenta de otimização ao modelo desenvolvido;
- Obter o painel otimizado, visando a diminuição da massa e a tensão;
- Discutir os resultados obtidos, confrontando-os com as soluções analíticas, em especial propostas por Muller (2016);
- Obter o painel otimizado considerando a minimização da massa e do comprimento de solda, desta vez utilizando a tensão como restrição do modelo;
- Analisar os resultados, discutindo as diferenças observadas entre os arranjos que compõe a fronteira de Pareto obtida.

1.1.2 Estrutura do trabalho

No primeiro capítulo será apresentada certa introdução a temática. No segundo serão revisados conceitos necessários para entendimento do trabalho, realizando uma revisão de literatura. A partir desta fundamentação, será investigada geração do painel em si, demonstrando etapas de modelagem e discretização. Então, por fim, serão abordados resultados e análises pertinentes a conclusão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão descritos os fundamentos teóricos necessários para o entendimento do trabalho. A apresentação será dividida em etapas, buscando fundamentar as considerações feitas, deixando o texto organizado e conciso. Os conteúdos mostrados na fundamentação serão necessários para total compreensão de conceitos, teorias, ferramentas e métodos envolvidos na realização dos procedimentos referentes ao projeto de um painel estrutural.

2.1 Mecânica de estruturas navais

Segundo Augusto (2007) a estrutura da embarcação deve ter resistência suficiente para suportar todas as cargas a bordo, sem que estas ocasionem em falhas ou deformações permanentes.

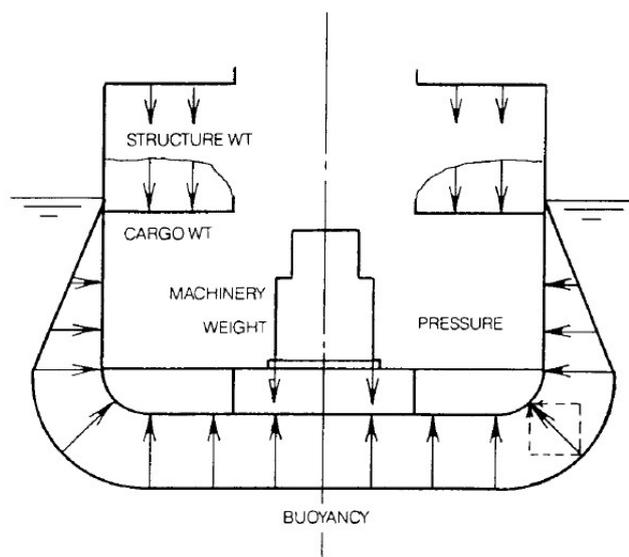
Sistemas navais precisam respeitar duas condições de equilíbrio fundamentais, que são:

- Peso total igual a massa de água deslocada;
- Posição longitudinal do centro de gravidade igual à posição longitudinal do centro de carena.

Os carregamentos que fazem com que estas condições sejam válidas são denominados de estáticos, e levam em conta os pesos contidos no navio (superestrutura, praça de máquinas, carga, casco, entre outros).

Mesmo que o peso seja igual ao empuxo, não necessariamente é observada uma distribuição uniforme de carga ao longo do comprimento. Isso significa que é necessário alocar as cargas estáticas em lugares estratégicos, para que a diferença de magnitude existente entre elas gere uma resultante que faça a embarcação permanecer em uma posição estável. (LEWIS, 1988). Na Figura 2 é mostrado um esquema da distribuição de pesos, através de um corte transversal da embarcação.

Figura 2 – Cargas estáticas.

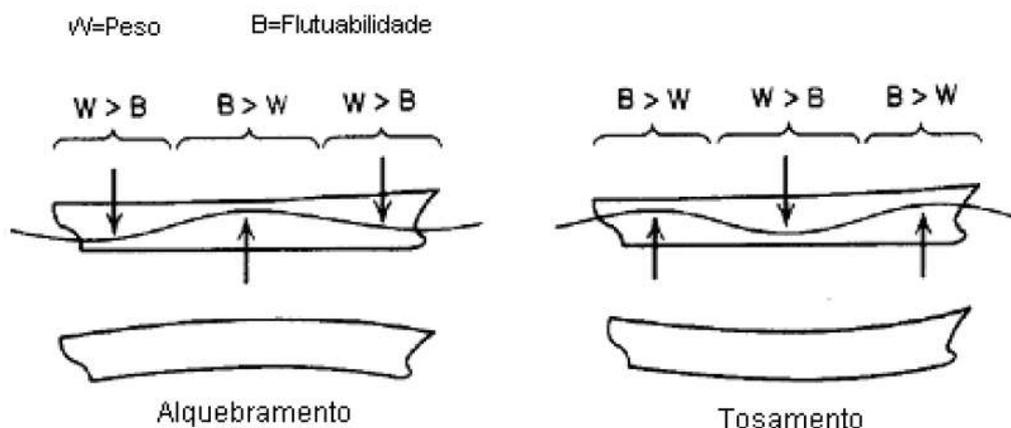


Fonte: (LEWIS, 2017, p. 209).

Além das cargas estáticas, a estrutura do navio está sujeita a ocorrência de cargas dinâmicas, que variam ao longo da operação do navio. Entre as cargas dinâmicas, a de maior importância decorre da passagem de ondas ao longo do casco. (OROZCO, 2009). A passagem da onda modifica a flutuação em diferentes regiões, que em uma situação de mar calmo é quase uniforme.

A literatura descreve duas ondas críticas, que resultam nas maiores solicitações estruturais no casco. A onda de tosamento possui comprimento igual ao comprimento do navio e crista localizada na meia nau da embarcação. Neste caso, a onda gera excesso de flutuação próximo a seção mestra e faz com que haja uma acentuação nos esforços de tração na região acima da linha neutra da viga navio. Por outro lado, a onda de alquebramento, a qual possui também comprimento igual ao do navio, é caracterizada por possuir uma cava próxima a meia nau, e ter o efeito contrário, aumentando a compressão na região acima da linha neutra. (LEWIS, 1988). Ambas condições são mostradas no esquema da Figura 3.

Figura 3 – Onda de alquebramento e de tosamento.



Fonte: (OROZCO, 2009).

Os carregamentos apresentados na figura acima influenciam as pressões atuantes nos painéis estruturais que constituem o casco da embarcação.

O escopo do trabalho apresentará uma situação de mar calmo, onde o calado é constante por todo o comprimento, fazendo com que a pressão seja uniforme. Porém, além destas condições, ainda existem outras, tais como cargas térmica e aquelas resultantes de impactos. Como estas cargas são ocasionais, elas não serão abordadas, uma vez que possuem modelagem matemática complexa e que foge ao escopo deste trabalho.

Diferente das estruturas típicas da engenharia civil, as embarcações não possuem nenhuma fundação. Portanto, é essencial que as condições de equilíbrio sejam mantidas. (TANCREDI, 2009).

Uma das abordagens mais utilizadas no projeto estrutural consiste no desacoplamento dos diferentes elementos da estrutura de um navio. Deste modo é feito um estudo do macro até o micro, uma vez que as tensões geradas pela flexão da viga navio, devem ser compostas com a tensão oriunda da deformação local de cada elemento da estrutura.

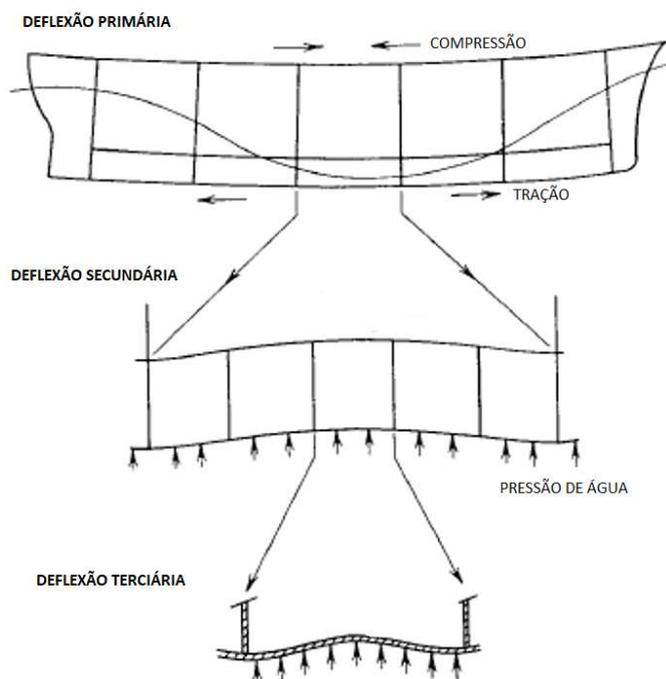
O desacoplamento da análise baseia-se na hipótese de que o raio de curvatura referente a deformação de cada um dos elementos que compõe a estrutura de um navio possui ordem de grandeza diferente, tornando os fenômenos linearmente independentes. (TANCREDI, 2009).

Assim, a superposição dos efeitos consiste na simples soma algébrica da resposta obtida na análise de cada componente da estrutura analisado individualmente. (TUPPER, 2004).

Nessa abordagem, a estrutura é dividida em três campos de análise. A resposta primária refere-se as tensões geradas pela deformação global do casco, o qual passa a ser considerado uma viga em flexão. Já o campo de deformação secundário diz respeito as tensões geradas pela deformação dos reforçadores. Por fim, o campo terciário trata da deformação das unidades de chapeamento, localizada entre 4 reforçadores quaisquer. (OROZCO, 2009).

A abordagem baseada no desacoplamento dos efeitos é mostrada na Figura 4, onde é possível verificar a hipótese dos diferentes raios de curvatura associados a deformação de cada um dos elementos da estrutura de uma embarcação de grande porte.

Figura 4 – Decomposição de esforços variando a ordem de grandeza.



Fonte: Adaptado de Lewis (2017, p. 210).

O detalhamento de cada uma das análises (Primária, Secundária e Terciária) foge ao escopo principal deste trabalho, no entanto, uma breve descrição pode ser vista na fundamentação e também no apêndice A.

2.2 Estrutura secundária

A estrutura secundária de um navio é composta pelos perfis, também chamados de enrijecedores da estrutura. (AUGUSTO, 2004). Os perfis tratam-se de vigas posicionadas longitudinalmente e/ou transversalmente ao navio, e que apresentam uma maior inércia apenas no sentido de atuação da flexão (ortogonais a chapa), com intuito de garantir rigidez e balancear a adição de peso. São dispostos em forma de grelha, a qual é revestida pela unidade de chapeamento.

Os perfis longitudinais podem ser classificados em reforçadores leves e pesados. A diferença entre eles é relativa, uma vez que para ser considerado pesado, o perfil precisa possuir uma inércia transversal uma ordem de grandeza superior ao perfil leve.

Como uma embarcação não possui fundação, é comum existirem elementos estruturais apoiados no restante da estrutura. Porém, é necessário que a estrutura que suporta o apoio ou engaste apresente rigidez superior na direção de deflexão. (OROZCO, 2009). Por este motivo, os longitudinais leves são considerados “apoiados” em transversais leves, os quais são chamados de cavernas. Por outro lado, os perfis pesados são considerados apoiados nas anteparas.

Em mecânica dos sólidos, o tipo de vínculo é determinado pelo número de reações impostas ao corpo no ponto vinculado. No caso da engenharia naval os elementos locais, tais como chapas e reforçadores, são sempre considerados engastados nos elementos de suporte, desde que ocorra simetria de carregamento entre dois elementos subsequentes.

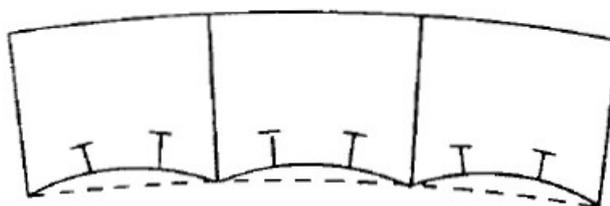
A simetria de carregamento impede a rotação da seção e por essa razão impõe ao elemento uma reação do tipo momento, o qual atua no ponto vinculado. A presença do momento caracteriza um vínculo do tipo engaste, o qual independe da geometria dos elementos, ou da qualidade da solda realizada. Pode ser observada na figura 5, onde os reforços se deformam igualmente nos dois lados da antepara.

Assim, a resposta secundária é dependente dos campos de pressão atuando no local de interesse, portanto costumam ser classificados como elementos pertencentes a estrutura local. (SCHOOFS, 1987). A principal componente de força atuante nos reforçadores localizados no fundo, é a pressão hidrostática, cujo valor depende do calado da embarcação na seção analisada; respeitando a condição de carga analisada.

Entretanto este pode não ser o único carregamento atuante nos perfis, pois a pressão que solicita a estrutura refere-se a diferença entre a pressão interna e externa ao painel estrutural. Caso exista carga interna sustentada diretamente pelo reforçador, esta deve ser considerada na análise.

Em muitos casos práticos, tanques de lastro, carga ou combustível, são apoiados em algum reforço. Nesse caso a análise do reforçador deve considerar a resultante entre a pressão d'água e a pressão aplicada pelo tanque na estrutura.

Figura 5 – Resposta dos reforçadores a pressão local.



Fonte: OROZCO (2009).

Em teoria, a pressão causada pela carga interna pode ser inclusive maior que a pressão externa (hidrostática), levando a estrutura a se deformar para fora do casco. A Figura 5 mostra a deflexão usual da estrutura secundária quando submetida a uma pressão hidrostática maior que as pressões de carga equivalente (deflexão com concavidade para baixo).

2.3 Estrutura terciária

A análise da estrutura terciária refere-se basicamente ao estudo da deflexão das placas planas (chapas) que revestem o casco da embarcação.

A unidade de chapeamento que deve ser considerada é sempre a menor unidade existente em um painel estrutural. Ou seja, define-se unidade de chapeamento como uma porção contínua de chapa delimitada por 4 reforçadores quaisquer. É importante observar que a presença de cordões de solda, não delimita unidades de chapeamento, pois, do ponto de vista estrutural, a soldagem não representa descontinuidade. (TANCREDI, 2009).

De maneira análoga à análise da estrutura secundária, o argumento de simetria de carregamento que permitiu considerar os reforçadores engastados nos elementos de suporte (transversais), também permitirá considerar as unidades de chapeamento engastadas nos reforçadores que as delimitam (TANCREDI, 2009). No caso onde são apenas apoios articulados, não é restringida rotação no eixo de simetria.

Em relação ao carregamento atuante, também de maneira análoga a análise da estrutura secundária, as unidades de chapeamento estarão sujeitas a diferença entre a pressão externa e a pressão interna à chapa. (TANCREDI, 2009). No entanto, se a carga for sólida e estiver apoiada diretamente sobre a flange dos reforçadores (fato muito pouco recomendado) essa não irá realizar solicitação estrutural nas unidades de chapeamento. A Figura 6 mostra a deformação da chapa.

Figura 6 – Unidade de chapeamento solicitada por pressão hidrostática.



Fonte: Adaptado de Lewis (1988, p. 210).

2.4 Elementos finitos

Entre as diferentes técnicas que realizam um procedimento numérico visando a determinação da distribuição de esforços, deslocamentos, deformações e temperaturas, destaca-se o método dos elementos finitos. (OROZCO, 2009).

Este método possibilita discretizar um corpo contínuo (de difícil formulação), em um modelo constituído por um número finito de elementos (de formulação conhecida) e interconectados entre si. (RADE, 2011). Este corpo subdividido é conhecido como a malha de elementos finitos.

Um dos principais cuidados associados a qualquer método numérico, consiste na verificação do grau de discretização do modelo. Em elementos finitos, essa análise é conhecida como estudo de convergência de malha. É necessário verificar se a malha

discretizada representa adequadamente o domínio contínuo. Malhas pouco discretizadas não são capazes de representar corretamente o domínio contínuo, enquanto malhas muito discretizadas, exigem um elevado custo computacional.

No entanto, devido a sua robustez e eficiência, o método dos elementos finitos tem se tornado cada vez mais presente em projetos de engenharia, incluindo os projetos de navios.

A discretização passa por determinadas etapas. Primeiramente é modelada geometria do problema real, em seguida são atribuídas as propriedades dos materiais envolvidos. Só então são aplicadas condições de contorno e esforços submetidos. Por fim, ocorre o processo numérico de resolução do sistema de equações composto pelas equações e interligações de cada um dos elementos discretizados na modelagem.

Se a modelagem for coerente, o sistema de equações poderá ser resolvido, permitindo que se conheçam a distribuição dos esforços ao longo do corpo.

É importante destacar que, a maneira mais confiável de reproduzir uma análise estrutural adequada é através de testes em laboratório. No entanto, o elevado custo e a complexidade para a realização de ensaios, em muitos casos inviabilizam tais análises, em especial nas fases iniciais do projeto.

É neste momento que entra o procedimento numérico de elementos finitos, pois esse permite analisar diferentes situações sem gastar demasiado tempo em procedimentos experimentais caros. (MAHEN, 2007).

Quando comparado com modelos analíticos, os modelos numéricos permitem a rápida análise de geometrias complexas, difíceis (ou até impossíveis) de serem modeladas. Pois, no procedimento numérico ocorre uma sobreposição simultânea, uma vez que há interligação entre elementos, mesmo os de diferente natureza.

É preciso salientar que os resultados observados são aproximados, quando comparados com testes práticos ou analíticos, ou seja, possuem certo erro.

O processo em si é de certa forma iterativo, pois a acurácia destes resultados deve ser contestada, e se não satisfatória quando comparada com a solução do modelo matemático, alterada. (BATHE, 2014). Existem inúmeras variáveis a serem exploradas para apresentação de resultados coerentes, de modo a aumentar a certeza de resultados. Uma das maneiras mais relevantes de atuar no erro consiste no refinamento de malha, diminuindo o tamanho dos elementos, fazendo com que o modelo apresente um maior número de nós (conexões).

É justamente por proporcionar confiabilidade, apresentar erros capazes de serem caracterizados, economizar tempo, gerar valor agregado, que o MEF vem sendo utilizado em larga escala pela indústria. (ZIENKIEWICZ, 1994). Sua utilização tem ocorrido em situações inesperadas (fora da área estrutural), tais como desenvolver novas tecnologias ligados a mecânica clássica, fluídos, transferência de calor, eletromagnetismo, entre outros.

Conforme já mencionado, o MEF pode ser usado para analisar diferentes fenômenos físicos. Logo, a modelagem realizada deve considerar a representação dimensional e o tipo de esforço ao qual estará sujeita a estrutura. Assim, para esta modelagem, existem diferentes formulações de elementos pré-definidos, que visam representar esforços de diferentes naturezas (OROZCO, 2009).

De maneira geral, os elementos podem ser divididos de acordo com o nível topologia que representam, podendo ser classificados em elementos unidimensionais (barra e viga), elementos bidimensionais (casca) e elementos tridimensionais (sólido).

Destaca-se ainda que, mesmo em um mesmo nível hierárquico, existem inúmeros tipos de elementos, que variam em relação ao número de nós e graus de liberdade; representando assim diferentes fenômenos físicos.

A descrição das formulações dos diferentes tipos de elementos foge ao escopo deste trabalho. No entanto, uma breve descrição será utilizada no tópico de desenvolvimento.

2.5 Painel estrutural

O conjunto formado pela chapa e reforçadores é denominado de painel estrutural. Usualmente é definido entre duas anteparas transversais e duas longarinas¹.

Os perfis têm o objetivo principal de suportar cargas consideradas locais, e devido a sua continuidade, transmiti-los para estrutura como um todo. Já a chapa deve ser o elemento que garante estanqueidade para a embarcação. Em navios de grande porte, o painel é o “elemento estrutural comum” que se repete em grandes regiões, como popa, meia nau, conveses.

¹ O termo longarinas é amplamente utilizado para se referir a reforçadores pesados longitudinais.

Os reforçadores são posicionados ortogonalmente às chapas. Por esta razão, os painéis são elementos que conferem alta resistência à flexão ao navio, tanto na longitudinal como na transversal mesmo sem adicionar uma quantidade significativa de massa.

Como apresentado anteriormente, a deformação das estruturas primárias, secundárias e terciárias geram tensões, que, embora possam ser calculadas isoladamente, devem ser combinadas, pois atuam concomitantemente. Essa sobreposição representa o total de esforços que irá atuar no chapeamento reforçado, e para os quais o painel deve ser projetado.

Logo, o projeto de um painel estrutural depende de diversos fatores, entre os quais destacam-se:

- Custos de material e fabricação;
- Utilização do espaço visando maior capacidade de carga;
- Continuidade estrutural para que não haja pontos concentradores de tensão;
- Ausência de cantos vivos;
- Margem de corrosão;
- Eficiência estrutural.

Segundo Augusto (2004), o mais significativo desses fatores é a eficiência estrutural, uma vez que ela leva em consideração todos os demais fatores. Por isso, é onde as mudanças surtem maior efeito na qualidade de um projeto estrutural. Em linhas gerais, define-se eficiência estrutural como a razão entre a magnitude de esforços que este elemento pode suportar e a massa do elemento.

A análise de um painel estrutural pode ser feita utilizando-se diferentes teorias analíticas, tais como a teoria da chapa ortotrópica e a teoria da chapa colaborante composta com a teoria de cascas finas.

Entretanto este não é o escopo do presente trabalho, uma vez que este estudo analítico já foi apresentado por Muller (2016), assim omite-se a descrição de tais métodos em razão da concisão deste relatório.

Para modelagem em CAE o painel foi modelado utilizando-se elementos de viga e casca, representando respectivamente os reforçadores e a chapa.

Conforme descrito anteriormente, além da geometria, o modelo utilizado na análise usando o MEF deve conter as informações referentes as condições de contorno e os esforços atuantes. Assim, conforme também discutido na fundamentação teórica, em se tratando de um painel estrutural de um navio, utilizou-se a condição de engastes e apoios nas extremidades do painel e uma pressão uniforme aplicada em toda a chapa

A solução do modelo é realizada utilizando-se o princípio dos deslocamentos virtuais. Esse princípio estabelece que o trabalho realizado pela pressão aplicada ao painel é igual ao trabalho realizado pela tensão interna, de acordo com sua deformação virtual. O uso do trabalho virtual permite conectar os reforçadores com a chapa, fazendo com que estes nós possuam deslocamentos dependentes um do outro. Nesta situação, o painel se comportará como um só. Desta maneira, será possível obter um campo de tensões que já leva em consideração todos os enrijecedores. (OROZCO, 2009).

Ainda, no painel estrutural, outro fator importante é o comprimento de solda. Não só a massa, que é um parâmetro do painel que quanto menor, mais lucro gera com fabricação. A solda referente a ligação entre reforçador e chapa. Estima-se que o custo com processos também é contundente a este trabalho, assim como o de economia em material (minimizando a massa). Porém, será analisado apenas este custo com processo, e não o efeito que esta possui na tensão e massa do painel. Desta maneira, o importante mesmo é comprimento total de solda que cada configuração de painel pode apresentar.

2.6 Otimização

Otimização é o ato de obter o melhor resultado diante das devidas circunstâncias. Independente da área em que se aplica, a otimização de um produto ou serviço têm dois objetivos principais, minimizar o esforço requerido e maximizar o benefício desejado. (RAO, 2009).

É muito comum confundir o termo otimização com análise. Muitos trabalhos acadêmicos apresentam em seu título “otimização”, quando na verdade o que foi desenvolvido é nada mais que um algoritmo robusto de análise. Propondo melhorias com relação à solução inicial para problemas mecânicos ou elétricos. (SILVA, 2007).

A verdadeira síntese consiste em analisar o universo de soluções possíveis, e através de um código numérico de otimização, obter uma solução ótima sem que o resultado dependa do analista.

Por fim, Tancredi (2008) defini o processo de otimização como a busca automática, direcionada e sistemática para obter a melhor solução possível dentre um conjunto viável de soluções.

2.7 Formulação de um problema de otimização

Buscando otimizar problemas diários de engenharia, é necessário modelar matematicamente o problema de projeto baseado em otimização. Esse modelo segue uma formulação genérica que pode ser expandido para diversos estudos diferentes dentro de uma vasta gama de problemas.

Segundo Muller (2016) a correta implementação matemática dos conceitos, interpretação dos resultados finais e aplicação das restrições está intimamente relacionada ao grau de conhecimento que se tem do problema a ser estudado.

A seguir descrevem-se os principais elementos que compõem o modelo matemático de um problema de otimização.

2.7.1 Variáveis de projeto

Um componente de engenharia é definido por um certo número de dados. Alguns dados são prefixados, sendo conhecidos como parâmetros do projeto. Entretanto, dados que podem ser alterados buscando obter uma diferente configuração, são conhecidos como variáveis de projeto, ou variáveis de decisão.

Estas n variáveis são determinantes para a otimização e são agrupadas no vetor mostrado pela equação 1.

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (\text{Equação 1})$$

Estas variáveis ainda podem ser de dois tipos, discretas e contínuas. Variáveis discretas são aquelas que podem assumir apenas valores específicos, como a espessura de uma chapa de aço, devido à restrição de mercado. Já as variáveis

contínuas podem assumir quaisquer valores dentro de um determinado intervalo, como por exemplo o comprimento de um navio. (TANCREDI, 2008).

De acordo com Silva (2007) a escolha das variáveis de decisão é crítica para sucesso da síntese. Exigindo conhecimento por parte do projetista para determinar tais intervalos de maneira a não influenciar ou então tornar o resultado inverossímil.

2.7.2 Função objetivo

A função objetivo deve quantificar o resultado que se busca no projeto. É uma função das variáveis de síntese, como descrita pela equação 2.

$$f(X) = f[x_1, x_2 \dots x_n] \quad (\text{Equação 2})$$

Pode ser simples ou multiobjectivo, visando a quantidade de fatores a serem aprimorados no desenvolvimento da problemática.

Pode-se buscar a minimização da função, como no caso do peso de uma aeronave, ou dos custos em uma manufatureira. Ou a maximização, como no exemplo da eficiência de um sistema ou do lucro de um empreendimento. Estes são exemplos de problemas mono objetivo, cujo mérito de uma solução é definido por apenas uma única função objetivo.

Um exemplo de uma função com dois objetivos consiste no projeto de uma caixa de engrenagem, onde deseja-se maximizar a eficiência do sistema, ao mesmo tempo que se quer minimizar o peso do equipamento. (RAO, 2009).

Em otimizações com mais de um objetivo, há diversas soluções consideradas ótimas. Quando esses objetivos são conflitantes, as soluções representam uma gama de possíveis soluções que ponderam os diferentes objetivos considerados. Por isso o motivo utilizado para a escolha dentre uma e outra, deve ser subjetivo, ou utilizar critérios que não foram usados na modelagem inicial do problema.

Como pode ser observado na equação 3, é possível montar uma combinação linear quando há mais de um objetivo, onde as constantes como c_1 e c_2 , representam o peso relativo de cada um dos objetivos.

$$f(X) = c_1 f_1(X) + c_2 f_2(X) \quad (\text{Equação 3})$$

Consoante à Tancredi (2008) deve-se sempre buscar critérios objetivos para formulação desta equação, evitando-se critérios como preço², estética, entre outros. Essa afirmação se deve à aspectos subjetivos serem de difícil contabilização e por consequência, formulação.

2.7.3 Restrições

Em problemas práticos, as variáveis não podem ser escolhidas de forma randômica, elas devem obedecer requisitos técnicos. Estas são as limitações impostas à síntese, e qualquer solução que não obedeça seus limites, deverá ser descartada.

As restrições podem ser divididas em 3 diferentes categorias, laterais, de desigualdade e igualdade. Cada forma é representada, respectivamente, através das equações 4, 5 e 6. De acordo com a formulação do vetor de variáveis apresentado na equação 2.

$$x_{\min} \leq x_j \leq x_{\max} \quad j = 1, 2 \dots n \quad (\text{Equação 4})$$

$$f'_i(X) \geq 0 \quad i = 1, 2 \dots n \quad (\text{Equação 5})$$

$$f''_k(X) = 0 \quad k = 1, 2 \dots n \quad (\text{Equação 6})$$

Pode ser observado que em problemas comumente estudados com algoritmos de otimização, utilizam-se restrições laterais para variáveis, para de fato restringir a superfície amostral. No entanto, quando o intuito é impor restrição a uma resposta, utilizam-se restrições de desigualdade ou igualdade³ na função objetivo.

Por exemplo, em um processo de otimização referente ao projeto de uma viga em balanço. O objetivo é diminuir a massa desta, para um mesmo carregamento aplicado. As variáveis seriam relacionadas à seção da viga. Com determinado conhecimento tácito, o projetista é capaz de determinar os limites dessas variáveis, ou seja, uma restrição lateral. A restrição de saída consiste na análise da máxima

² A definição do preço muitas vezes inclui uma margem subjetiva de lucro.

³ O uso de restrições de igualdade muitas vezes dificultam a convergência do problema, sendo recomendado a substituição de tais restrições por inequações que estabeleçam uma margem de erro aceitável.

tensão equivalente, que deverá ser menor que a tensão de escoamento do material. O que caracteriza uma restrição de desigualdade no dado de saída.

Conforme Rigo (2011), a diferença entre uma restrição e um objetivo é a presença de um limite bem definido. Enquanto na restrição deve ser maior ou menor que, nos objetivos buscamos minimizar ou maximizar determinado parâmetro de saída.

2.8 Problemas multiobjetivos

A natureza de problemas multiobjetivos já foi introduzida no tópico anterior. No entanto, destaca-se que a formulação matemática não difere muito da de um problema monoobjetivo, pois a mudança consiste apenas na consideração de mais de uma função objetivo.

Existem diferentes formas de tratar um problema desta natureza. Uma delas já foi apresentada, onde deve-se modelar uma equação que pondere os diferentes objetivos considerados, atribuindo-lhes diferentes pesos.

Entretanto, é difícil determinar a importância de cada objetivo na resposta ótima do problema, podendo resultar em uma solução que não represente a melhor conjunção de variáveis. (SILVA, 2007).

Outra abordagem consiste em converter um dos objetivos em uma restrição. Novamente surge a questão de qual objetivo deve ser convertido em restrição.

Voltando ao exemplo da viga, justificando o motivo de selecionar a massa como um objetivo e a tensão como restrição. A oportunidade de gerar valor agregado no projeto da viga está na massa, que é diretamente relacionada com a quantidade de material utilizado. O projetista reconhece através de estudos que quando o material atinge certa tensão, ele irá falhar, inviabilizando o projeto. A única saída que influencia no custo é a massa, selecionada com um objetivo a ser minimizado.

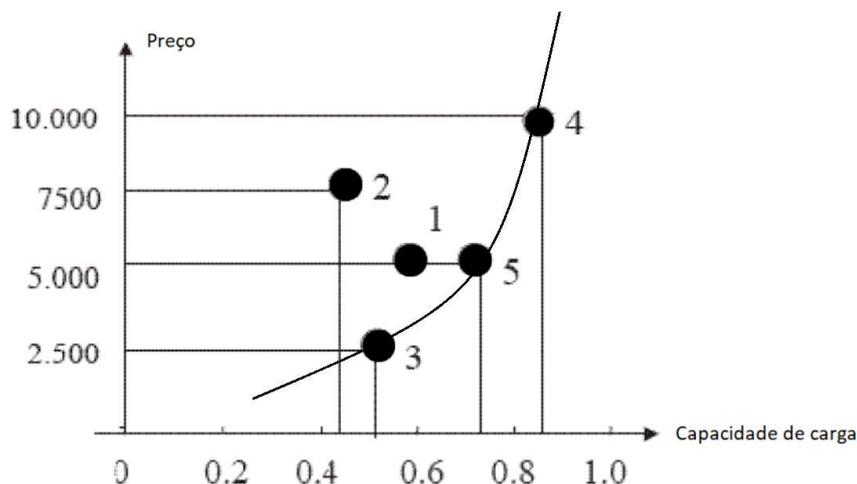
Por fim, encontram-se as estratégias realmente multiobjetivo, como por exemplo, as técnicas baseadas em algoritmos genéticos, que permitem avaliar os diferentes objetivos simultaneamente.

2.8.1 Conceito de Pareto ótimo

Técnicas de síntese auxiliam, principalmente, no processo de tomada de decisão em um projeto de engenharia. Portanto, em problemas multiobjetivos, a tomada de decisão pode não ficar óbvia. Isso deve-se ao fato de existirem mais de uma solução ótima, onde, em um contexto objetivo, nenhuma solução é de fato melhor que a outra.

Segundo Tancredi (2008), a melhor maneira de entender este conjunto de soluções ótimas, é através de um exemplo. A Figura 7 a seguir mostra 5 opções de compra de caminhão, considerando capacidade de carga e preço.

Figura 7 – Alternativas para compra do caminhão.



Fonte: Adaptado de Tancredi (2008, p. 31).

Intuitivamente observa-se que a solução 1 e 2 podem ser descartadas. Pois, a solução 1 possui o mesmo preço que a 5 e leva uma menor quantidade de carga, enquanto a 2 possui um preço mais elevado do que a 1, 5 e 3 e menor espaço para carga. Agora, dependendo da aplicação necessitada, as soluções 3, 4 e 5 são boas alternativas de compra. E não é possível dizer que uma é melhor que a outra pois, em termos quantitativos, uma maior capacidade de carga implica em um custo mais elevado. (TANCREDI, 2008).

Portanto, pode-se dizer que a solução 5 domina a solução 1 e não é dominada por nenhuma outra. Assim, realizando esta análise nos demais pontos do gráfico, obtém-se um conjunto de soluções não dominadas (3, 4 e 5). Por fim, é possível traçar

uma curva que contém o conjunto de soluções não dominadas para o problema, a qual é denominada curva de Pareto, ou conjunto ótimo de Pareto. (TANCREDI, 2008).

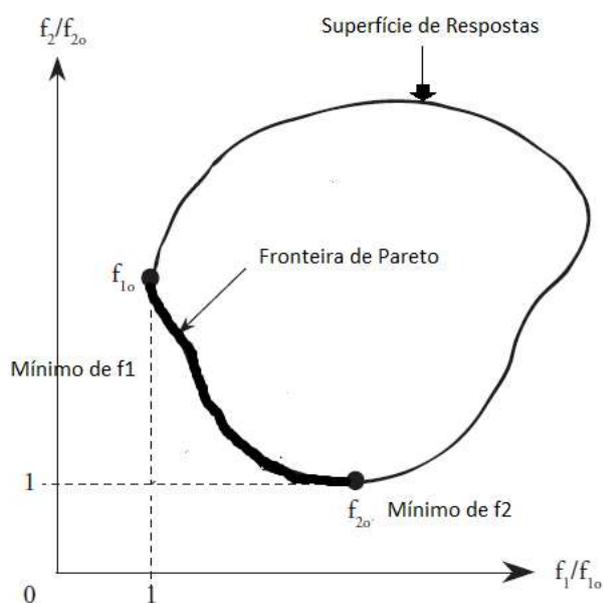
Propõe-se que o leitor imagine a potência do motor como uma das variáveis de projeto. É uma variável que influencia diretamente no preço e na capacidade de carga a ser movimentada. Com uma potência baixa, o caminhão tem um baixo custo, no entanto, também será baixa a sua capacidade de carga.

Se o mesmo problema fosse modelado de maneira mono objetivo, a maximização da capacidade de carga resultaria na solução de maior potência existente. Porém, ao se incluir o custo no processo de síntese, a solução passa a não mais ser óbvia, exigindo um processo racional para a tomada de decisão.

O motivo deste comportamento de difícil previsão é que a potência do motor irá influenciar tanto em um, quanto outro objetivo, diferente do que acontece em um caso mono objetivo, em que a resposta ótima de cada variável definirá o conjunto ótimo.

A Figura 8 mostra o espaço de objetivos, tanto quanto a fronteira de Pareto de um determinado problema. Caso for analisado o ponto mínimo da função objetivo f_1 , existe um valor f_2 correspondente na curva apontada em negrito. Neste caso, não há nenhuma maneira de minimizar f_2 sem que maximize f_1 .

Figura 8 – Fronteira de Pareto.



Fonte: Adaptado de Parsons (2009, p. 11).

Um indivíduo é considerado ótimo de Pareto se não houver outro que cumpra a melhora de todos objetivos simultaneamente, sem sacrificar um deles. (PARSONS, 2009). Soluções não dominadas pertencem a fronteira, enquanto soluções dominadas pertencem a todo o restante do espaço de soluções.

2.9 Algoritmos genéticos

Muitos problemas multiobjetivos têm utilizado algoritmos genéticos para a determinação da fronteira de Pareto. Estes nada mais são do que técnicas de busca utilizando conceitos apresentados pela seleção natural e genética. (PARSONS, 2009).

É um modelo que se baseia em uma população inicial, composta por indivíduos que representam diferentes combinações aleatórias de valores para as variáveis de projeto. Durante o processo de otimização, a população inicial evolui até convergir para uma população que contém diferentes indivíduos ótimos. Representantes estes que apresentam características mais aptas para atingir o objetivo requisitado.

Os detalhes do processo de otimização utilizando algoritmos genéticos fogem ao escopo central deste trabalho, e por isso são apresentados de maneira resumida no apêndice C. O leitor interessado poderá encontrar farta literatura sobre o assunto, destacando-se os trabalhos de Deb (2002) e Lucas (2002). Também no apêndice C pode ser encontrado características do algoritmo utilizado neste trabalho, o NSGA-II.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, visando atender aos objetivos estabelecidos.

O painel estrutural será modelado de acordo com os fundamentos apresentados no capítulo anterior, e cujo processo de análise seguirá as seguintes etapas:

- Definições das variáveis e parâmetros;
- Modelagem em CAD do painel estrutural totalmente parametrizado;
- Discretização do modelo obtido e seleção do tipo de elemento;
- Definição das condições de contorno e aplicação de esforços;
- Definição dos parâmetros referentes ao processo de otimização;
- Definição dos objetivos e restrições.
- Obtenção dos painéis otimizados;
- Caracterização dos painéis obtidos;
- Discussão dos resultados;

Os projetos serão representados e analisados através da aplicação das teorias e técnicas discutidas na fundamentação teórica e serão desenvolvidas com o auxílio dos programas *Ansys* e *ModeFrontier*.

O processo de escolha e definição das variáveis será apresentado no desenvolvimento, uma vez que este será aplicado diretamente no programa e está vinculado à construção do modelo paramétrico utilizado na análise baseada no método dos elementos finitos.

Posteriormente o modelo discretizado será acoplado à ferramenta de otimização permitindo que diversas análises de otimização sejam realizadas. A Tabela 1 resume a metodologia proposta.

Tabela 1 – Etapas de execução.

ETAPA	TÉCNICA	FERRAMENTA
Definição das variáveis e parâmetros	Análise paramétrica	[-]
Modelagem em CAD	Modelagem geométrica	ANSYS
Discretização de elementos finitos	MEF	ANSYS
Condições de contorno e esforços	Considerações estruturais	ANSYS
Variáveis de algoritmos genéticos	[-]	ModeFrontier
Objetivos e restrições	Estudo do processo de otimização	ModeFrontier
Obtenção de painéis ótimos	Otimização (NSGA-II)	ModeFrontier
Caracterização dos painéis	MEF	ModeFrontier
Discussão de resultados	[-]	[-]

Fonte: Autor (2018).

Como descrito previamente na fundamentação teórica, no processo de otimização utilizando algoritmos genéticos, dois parâmetros são relevantes: o número de indivíduos iniciais (DOE) e o número de gerações utilizadas.

Os indivíduos iniciais em geral são compostos por um conjunto randômico (ou semi-randômico). Assim, uma população inicial maior irá aumentar a variabilidade de soluções, aumentando a chance de se obter rapidamente uma solução ótima. No entanto, populações maiores, exigem um maior custo computacional para a análise.

Por outro lado, aumentar o número de gerações possibilita uma maior probabilidade de que o processo de seleção, cruzamento e mutação resulte em uma solução ótima para o problema. No entanto, cada nova geração representa um custo computacional adicional.

Assim, este trabalho utilizou a mesma abordagem proposta por Muller (2016), que consiste em se estabelecer o número máximo de análises que serão permitidas no processo de otimização. Sabendo que esse número é igual ao produto entre o número de gerações e o número de indivíduos na população (equação 7), pode-se definir uma porcentagem desse valor como tamanho da população inicial.

$$Total\ de\ análises = (População\ inicial * Número\ de\ gerações) \quad (Equação\ 7)$$

É importante destacar que, na ferramenta de otimização utilizada, o número de indivíduos na população inicial é definido pelo tamanho do DOE estabelecido para

o problema. Logo, ao longo do texto, a referência ao tamanho do DOE⁴ deve ser entendida como uma referência indireta ao tamanho da população inicial.

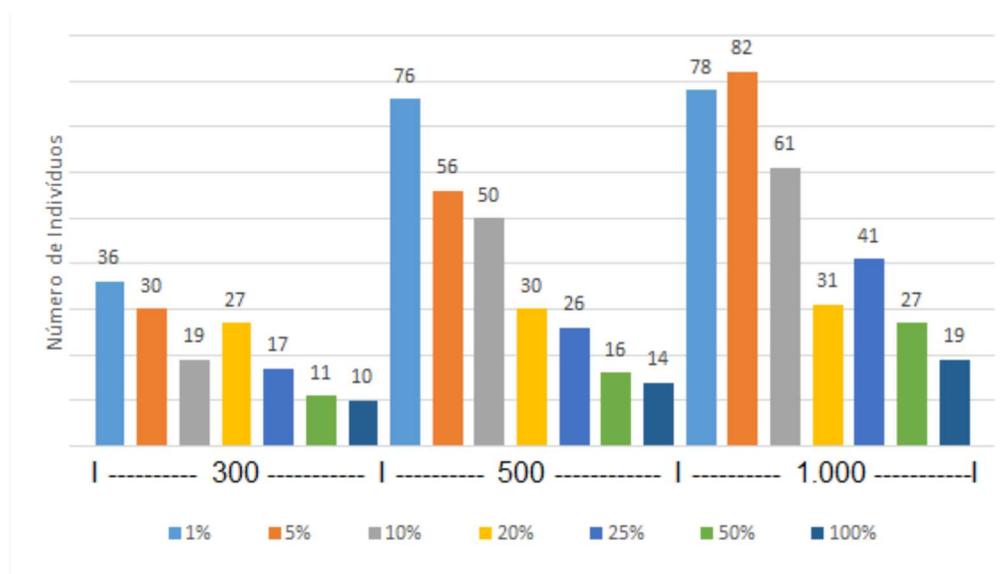
Visando realizar uma comparação direta entre os resultados, replicou-se os mesmos estudos realizados por Muller (2016). No entanto, Muller utilizou uma modelagem analítica que lhe permitiu estabelecer casos com um total de 300, 500 e 1000 análises, além de estudar o tamanho da população inicial usando 1%, 5%, 10%, 20%, 25%, 50% e 100% do número máximo de análises.

Uma vez que este trabalho utiliza um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos para a análise do painel estrutural, replicar todos os estudos realizados por Muller (2016) exigiria um alto custo computacional. Portanto, analisou-se os resultados de cada uma dessas otimizações (casos), buscando uma maneira de selecionar estudos que proporcionem a maior confiabilidade ao problema.

Em um processo de otimização multiobjetivo que busca a fronteira de Pareto, confiabilidade significa determinar a fronteira mais externa dentro do conjunto de soluções viáveis e que apresente uma quantidade suficiente de pontos para definir a fronteira mais longa possível.

A Figura 9 demonstra para cada estudo realizado por Muller (2016), a quantidade de indivíduos que, ao fim do total de gerações, pertencem à fronteira de Pareto.

Figura 9 – Número de indivíduos na fronteira de Pareto para cada total.



Fonte: (MULLER, 2016).

⁴ Do inglês *Design of Experiments*, refere-se ao número de análises realizadas antes do início do processo de otimização.

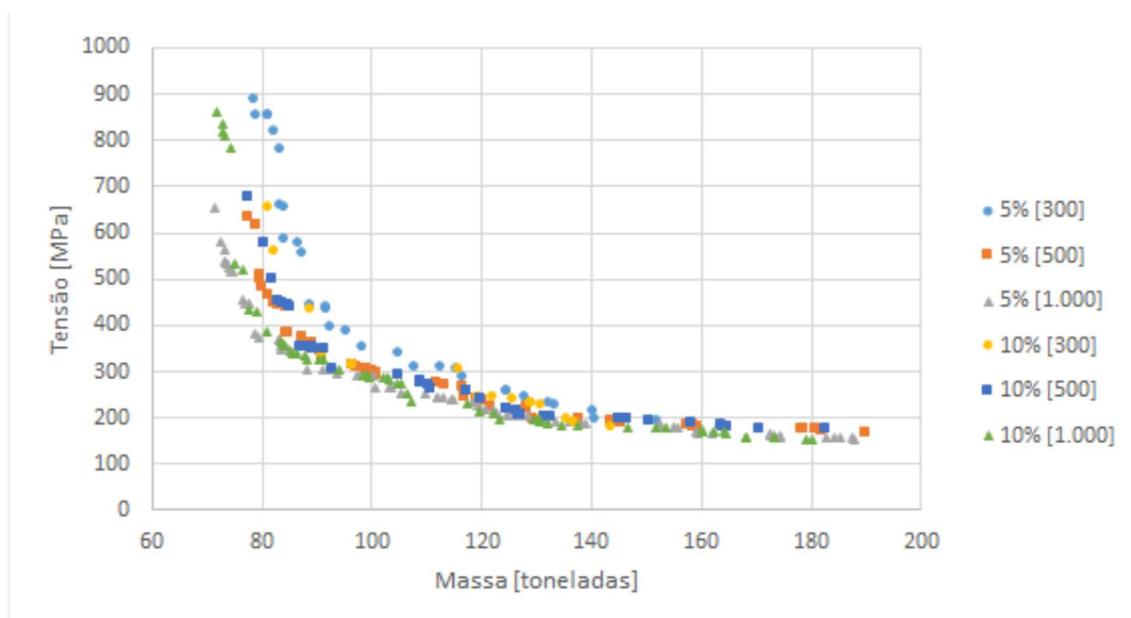
A partir dos resultados mostrados na Figura 9 e das discussões propostas por Muller (2016), algumas otimizações se mostraram pouco relevantes, e não foram realizadas neste trabalho.

Inicialmente, destaca-se que no caso que considera 300 indivíduos como o total de análises a serem realizadas, o estudo contendo um DOE correspondente a 1% desse total, apresenta um número de elementos na fronteira que é cerca de metade daquele obtido nos casos onde foram realizadas um total de 500 e 1000 análises.

Ainda segundo o autor, os pontos de concentração desses indivíduos estão nas extremidades da fronteira, o que não gera uma fronteira bem definida, apresentando baixa dispersão. Por este motivo, neste trabalho não será realizado o estudo de caso cujo total de análises é limitado a 300 indivíduos.

Um segundo motivo para descartar tal estudo pode ser visto na Figura 10. Pois, quando comparado com outros casos, a Fronteira de Pareto encontra-se posicionada mais internamente do que as fronteiras referentes aos casos limitados a 500 e 1000 análises.

Figura 10 – Comparação das fronteiras de Pareto para diferentes totais.



Fonte: (MULLER, 2016).

A seguir, avaliou-se a possibilidade da não realização dos estudos referentes as porcentagens de 50% e 100% do DOE. Quando estudado um total de 500 análises,

o número de indivíduos na fronteira de Pareto referente a essas porcentagens foi de apenas 20% do total obtido quando se utilizou um DOE com 1% do total de análises realizada.

A parcela subiu um pouco no caso de 1000 indivíduos, mas não o suficiente para justificar a realização desses estudos. Por fim, na Tabela 2 são apresentadas as otimizações referentes a otimização de massa e tensão.

Tabela 2 – Otimizações realizadas para minimizar massa e tensão.

DOE	GERAÇÃO	TOTAL	%
5	100	500	1
25	20	500	5
50	10	500	10
100	5	500	20
125	4	500	25
10	100	1000	1
50	20	1000	5
100	10	1000	10
200	5	1000	20
250	4	1000	25

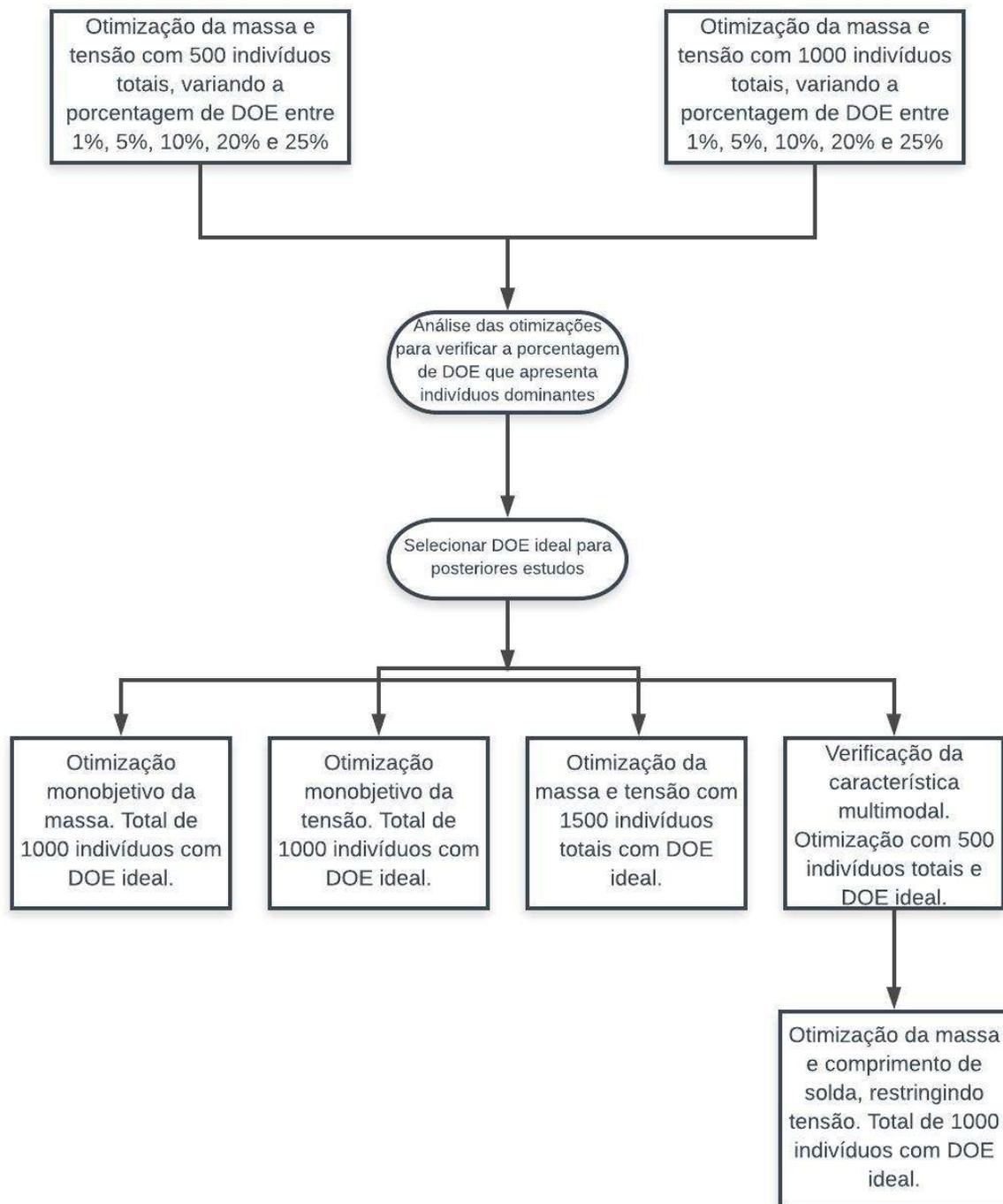
Fonte: Autor (2018).

Depois de retirar a informação do DOE mais eficiente, será ainda realizado uma análise de 1500 indivíduos, buscando comparações sobre convergência da otimização.

É importante observar que o estudo referente ao tamanho do DOE mostrado na Tabela 2 será realizado apenas na abordagem de otimização que visa a minimização simultânea da massa e da tensão existentes no painel. Pois, uma vez definidos os parâmetros mais eficientes para esse processo de otimização, os mesmos serão utilizados nas demais abordagens realizadas.

Além destas otimizações, serão realizados estudos mais específicos a partir destas. Adicionalmente serão utilizadas duas abordagens mono objetivo, buscando limites da fronteira de Pareto. Em seguida será estudada característica multimodal do painel. Esta verificação, se verdadeira, abrirá o estudo de minimização do comprimento de solda. A Figura 11 ilustra um fluxograma esquematizando o processo.

Figura 11 – Fluxograma do processo de otimização.



Fonte: Autor (2018).

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento realizado para a obtenção de resultados ótimos utilizando diferentes abordagens do processo de otimização.

Descreve-se a elaboração do modelo paramétrico tanto como a aplicação do algoritmo de otimização ao modelo desenvolvido.

Primeiramente são descritas as variáveis e parâmetros, bem como as restrições e objetivos utilizados no desenvolvimento proposto.

4.1 Parâmetros e variáveis de um painel estrutural

Como discutido na revisão bibliográfica, em um modelo de otimização aplicado a um projeto existem parâmetros e variáveis.

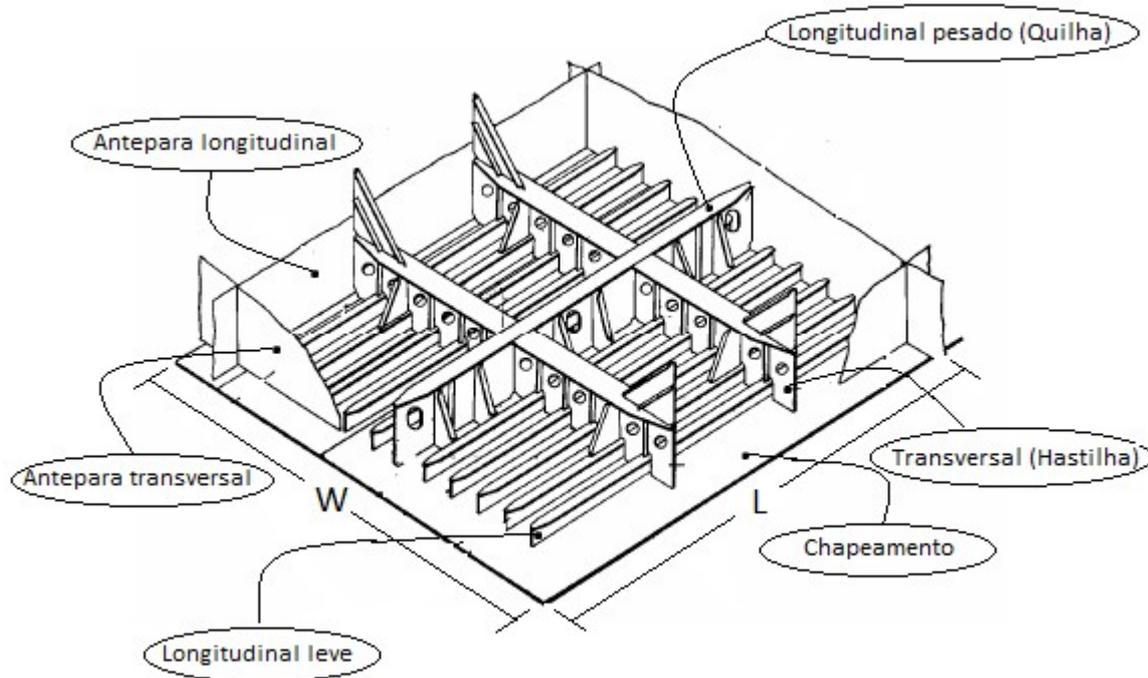
A construção de um painel estrutural envolve um conjunto de reforçadores fixados a uma chapa. Dessa forma, os espaçamentos e dimensões desses elementos definem o arranjo topológico a ser otimizado.

Nesse modelo existem dois parâmetros os quais definem a largura e o comprimento total do painel, sendo que as demais grandezas são consideradas variáveis de decisão.

A largura de um painel pode ser entendida como a distância entre duas anteparas longitudinais, ou até mesmo a distância entre costados da embarcação, quando esta não possui anteparas longitudinais. O comprimento, por sua vez, corresponde a medida entre as duas anteparas transversais. Ambos os parâmetros são respectivamente representados na Figura 12 como W e L .

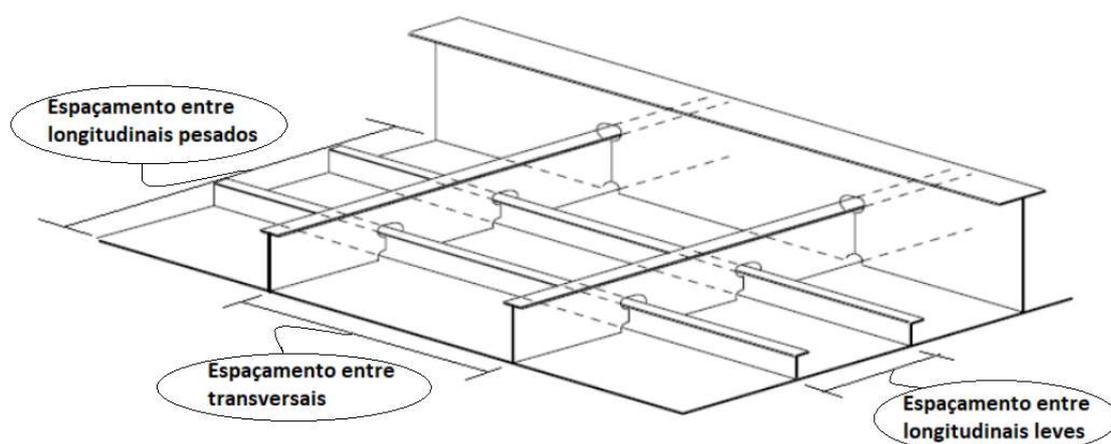
Ainda na Figura 12 são mostrados os componentes de um painel estrutural no fundo de um navio, enquanto que na Figura 13, são ilustrados os espaçamentos entre perfis, os quais correspondem ao primeiro grupo de variáveis do modelo de otimização.

Figura 12 – Detalhamento de um painel estrutural no fundo de uma embarcação.



Fonte: Adaptado de Augusto (2007, p. 46)

Figura 13 – Espaçamento entre perfis.

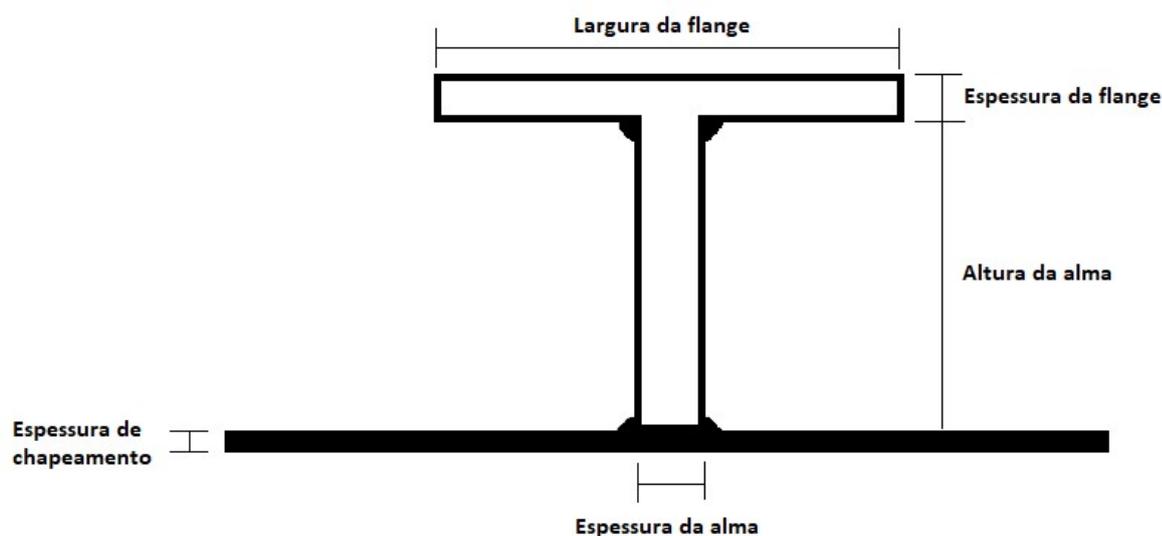


Fonte: Adaptado de Augusto (2007, p. 46)

O segundo grupo de variáveis de decisão corresponde aos parâmetros que descrevem a espessura da chapa e as características dos reforçadores. Serão

utilizados 3 diferentes perfis do tipo *T*, cujas variáveis descrevem as espessuras, a largura e a altura da secção. Apesar da secção transversal do reforçador ser equivalente para os perfis longitudinais e transversais, cada reforçador corresponde a 4 diferentes variáveis de projeto. As variáveis de síntese referentes ao perfil e chapa são representadas na Figura 14.

Figura 14 – Especificações de geometria da chapa e perfis.



Fonte: Autor (2018).

A Tabela 3 por sua vez resume todos os dados referentes ao painel a ser modelado. Será utilizada uma abreviação para cada dimensão, assim posteriores imagens e exemplos ficarão mais claros, sem poluição visual.

Tabela 3 – Caracterização das dimensões utilizadas no projeto.

Descrição	Abreviação	Caracterização
Distância entre anteparas longitudinais	<i>W</i>	Parâmetro
Distância entre anteparas transversais	<i>L</i>	Parâmetro
Distância entre longitudinais pesados	<i>Slp</i>	Variável
Distância entre longitudinais leves	<i>Sll</i>	Variável
Distância entre transversais	<i>St</i>	Variável
Espessura de chapa	<i>tc</i>	Variável
Altura da alma do perfil longitudinal pesado	<i>Hap</i>	Variável
Largura da flange do perfil longitudinal pesado	<i>Wfp</i>	Variável
Espessura da alma do perfil longitudinal pesado	<i>tap</i>	Variável
Espessura da flange do perfil longitudinal pesado	<i>tfp</i>	Variável
Altura da alma do perfil longitudinal leve	<i>Hal</i>	Variável
Largura da flange do perfil longitudinal leve	<i>Wfl</i>	Variável
Espessura da alma do perfil longitudinal leve	<i>tal</i>	Variável
Espessura da flange do perfil longitudinal leve	<i>tfl</i>	Variável
Altura da alma do perfil transversal	<i>Hat</i>	Variável
Largura da flange do perfil transversal	<i>Wft</i>	Variável
Espessura da alma do perfil transversal	<i>tat</i>	Variável
Espessura da flange do perfil transversal	<i>tft</i>	Variável

Fonte: Autor (2018).

4.2 Construção e detalhamento do painel reforçado

Nesta seção será apresentada a modelagem em CAD e também a geração da malha, que corresponde à discretização do modelo em elementos finitos.

4.2.1 Modelagem geométrica

Para a modelagem geométrica será utilizado o *Design Modeler*, o qual consiste em um módulo de modelagem 3D disponível no próprio programa do *Ansys*.

Existem duas geometrias diferentes presentes em um painel reforçado, as chapas de aço e os reforçadores (perfis de seção transversal constante). Como a chapa servirá de base para todos os reforçadores, este será o primeiro elemento a ser modelado.

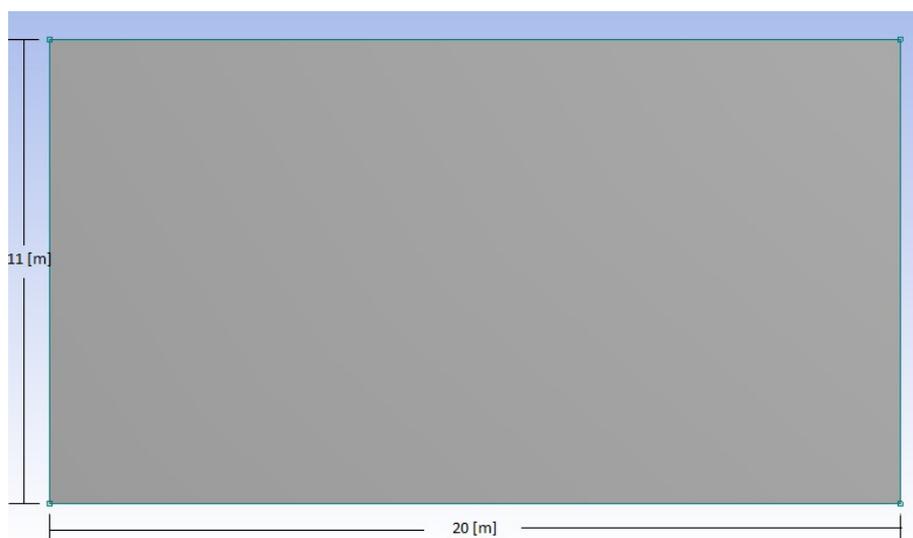
No tópico referente a parâmetros e variáveis foi ressaltado que seriam dois os parâmetros utilizados, os quais definem os limites da chapa do painel. O comprimento do painel *L*, que corresponde a distância entre anteparas, foi fixado em 20 metros.

Enquanto que a largura do painel W , que corresponde a distância entre anteparas longitudinais, foi fixado em 11 metros.

A geometria de uma chapa é relativamente simples. Inicia-se pelo esboço de um retângulo com as dimensões informadas, uma vez que estas não precisam ser modificadas durante o processo de otimização. Após o retângulo dimensional, é fundamental informar ao Ansys que a parte interna do retângulo corresponde a uma face. E então é utilizado um comando no programa que preenche a face e a define como um *Surface Body*, ou corpo de superfície.

Corpos de superfície apresentam apenas área, e não volume. Portanto, a espessura não é vista graficamente. Entretanto, ainda é capaz de ser considerada para o estudo, porém essa informação é adicionada durante o processo de discretização do modelo. Em outras palavras a influência da espessura pode ser contabilizada mas não visualizada.

Figura 15 – Corpo de superfície representando a chapa do fundo.



Fonte: Autor (2018).

Com relação aos reforçadores, a modelagem é realizada da mesma maneira, a partir de um esboço no qual define-se a seção do reforçador. Primeiramente, é preciso esboçar e depois definir qual estrutura aquele esboço representa. Elementos de viga são utilizados pelo programa quando se modela *Line Bodies*, ou seja, corpos representados por uma linha, a qual possui seção transversal constante. Corpos desse tipo serão utilizados para representar cada perfil, transversal ou longitudinal.

A modelagem de reforçador, inicia-se com o esboço de uma linha inicial correspondente, que vai de uma extremidade a outra do chapeamento. Uma vez modelada a linha, informa-se ao programa que aquela linha representa um corpo de linha.

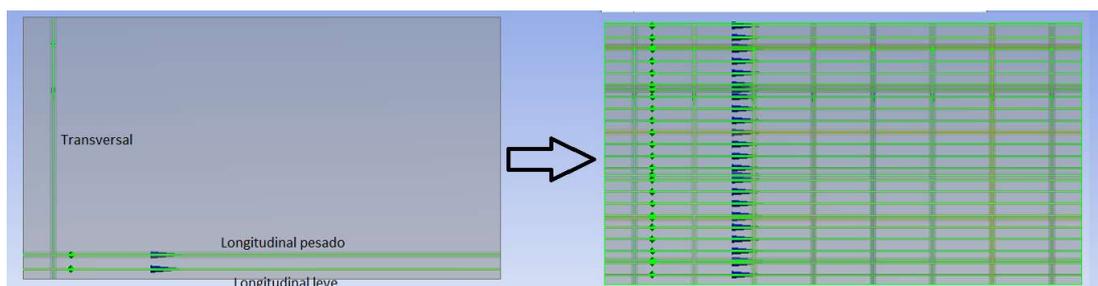
Como o arranjo de um painel estrutural é regular, ou seja, os reforçadores são igualmente espaçados, apenas um reforçador de cada tipo é modelado (leve, pesado e transversal).

Para criação dos demais reforçadores, utiliza-se de um recurso conhecido como *Pattern*. Essa é uma técnica que permite replicar estes corpos, a partir de uma referência inicial. Desta forma fazendo com que sejam criados a quantidade necessária de reforçadores.

Embora existam outros métodos de modelagem, utilizou-se o método descrito pois este permite definir o espaçamento e o número de réplicas, facilitando o processo de parametrização e, portanto, de otimização.

Para exemplificar o uso do comando, na Figura 16 é mostrado o processo de criação de um painel com reforçadores espaçados entre si. Sendo assim, com 3 corpos de linhas iniciais, é possível gerar todos os reforçadores que compõe a grelha ortogonal.

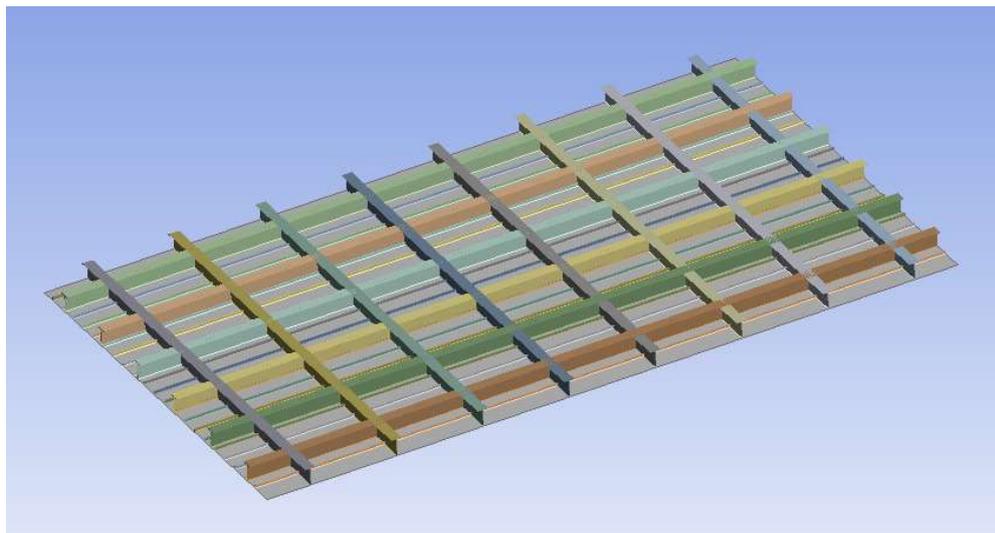
Figura 16 – Multiplicação dos corpos de linha (reforçadores).



Fonte: Autor (2018).

Por fim, deve-se definir a seção destes corpos, para realmente atuarem como vigas. Novamente, será utilizado todos com seção transversal tipo *T*, porém de diferentes dimensões. Todos os corpos terão orientação ortogonal a superfície. Na Figura 17 é mostrado o produto final da modelagem, incluído a definição de cada uma das 3 seções utilizadas nos reforçadores.

Figura 17 – Modelagem geométrica do painel reforçado.



Fonte: Autor (2018).

O programa realiza cálculos de área, inércia, centro de gravidade e apresenta estes valores em uma tabela, permitindo a verificação analítica dos elementos modelados. É importante destacar que a modelagem das seções utiliza um plano XY diferente do inicial, pois a seção será apenas atribuída a aqueles corpos já presentes no painel. Dentre estes valores existe um de importância maior, que é o I_{xx} , indicador da inércia que aquela seção transversal apresenta quando sob flexão. Este será utilizado nas restrições do modelo de otimização.

4.2.2 Discretização de elementos finitos

Uma vez modelada toda a geometria do painel, é necessário realizar a união entre os diferentes corpos. Em uma situação real, os reforçadores são soldados na chapa. Por consequência, será utilizado um modo de contato definido pelo programa como *Bonded*. Esta definição implica que os reforçadores serão colados na chapa, caracterizando a modelagem numérica uma simulação mais próxima do real possível.

Entretanto, precisa-se definir uma busca automática de onde estes contatos irão ocorrer. Devido ao fato de que os espaçamentos entre reforçadores serão variáveis durante a otimização. É conhecido que a ligação entre corpo de superfície e de linha deve ser uma aresta.

Portanto, um modo de criar estes contatos consiste no uso de uma linha de comando que seleciona todas as arestas do fundo (cota z igual a 0), excluindo aquelas

das extremidades, onde não existem reforços. Esta técnica somente é viável, pois as arestas da extremidade serão sempre as mesmas, o painel não muda de tamanho. Desta forma, durante a otimização, os espaçamentos podem ser modificados aleatoriamente sem que ocorra perda da definição correta dos contatos.

A discretização consiste na geração de uma malha com um número finito de elementos. Para isso, existem inúmeras opções disponíveis no *Ansys*. O painel consiste de apenas elementos de casca e viga, portanto a definição dos elementos é restrita a esses dois níveis topológicos.

Como elemento finito para os reforçadores foi utilizado o *BEAM188*. Recomendado, segundo o manual do programa, para estruturas moderadamente espessas e que também apresenta deformação irrestrita para a seção transversal. É um elemento capaz de contabilizar a parcela de tensão de cisalhamento, necessária para uma resposta adequada de tensão equivalente, por exemplo.

O elemento 3D de viga possui 3 nós, cada qual com 6 graus de liberdade. No apêndice C se encontram figuras que apresentam diferentes características deste elemento. Tanto sua formulação quanto a representação destes nós em seções transversais e também pontos de integração de Gauss entre dois nós..

O elemento de casca utilizado possui 4 nós, cada qual com 6 graus de liberdade. Também no apêndice C são encontradas 3 imagens com relação a este elemento, definição, saídas de tensão e possíveis aplicações. Para a chapa foi utilizado o elemento finito *SHELL181*, indicado para análise de estruturas moderadamente espessas, em situações onde há alta rotação e deformação, e também deformações não lineares. Pode-se observar na figura 18 que entre dois reforçadores transversais, os longitudinais leves se deformam, o que caracteriza uma situação não linear, reforçando a escolha deste tipo de elemento.

Destaca-se que é nesse momento da modelagem que é definida a espessura referente ao chapeamento do painel.

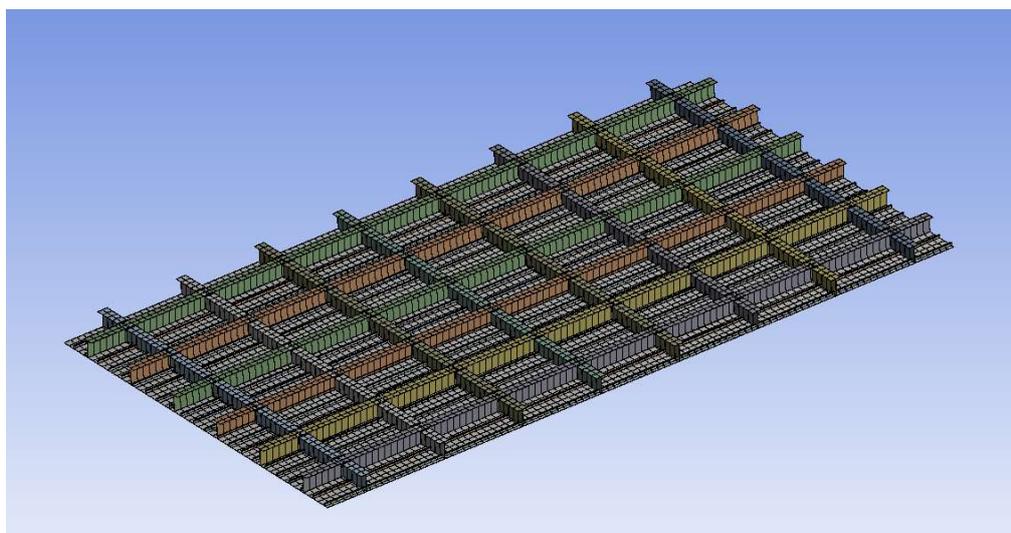
Em relação ao processo de geração de malha, o programa disponibiliza uma função de aprimoramento no tamanho de malha, que permite refinar a malha nas proximidades entre elementos (contatos) e em curvaturas de forma mais controlada.

No caso do painel não há curvaturas e furos, essa opção foi desativada. Mesmo desligada, observou-se que ainda existe um refinamento de malha em condições de quebramento de geometria, porém que não pode ser controlado pelo usuário.

O tamanho máximo de malha foi definido para 0,2 metros, para todas as iterações síntese análises realizadas. No entanto, conforme já mencionado, o algoritmo de geração de malha tende a utilizar elementos menores nas regiões do contato, fazendo com que o número de nós e elementos possa variar de painel para painel, uma vez que número de reforçadores varia. Na Figura 18 é possível observar a discretização de um exemplo de painel estrutural.

É importante lembrar que o grau de discretização da modelagem é de extrema importância para assegurar a qualidade da resposta obtida na análise. Assim, procedeu-se a uma análise de convergência de malha a qual mostrou que uma malha com elementos de até 0,15 metros não representou modificação significativa na qualidade da resposta referente a distribuição dos campos de tensão ao longo da estrutura, permitindo que o valor 0,2 fosse usado ao longo de todos os processos de otimização realizados.

Figura 18 – Painel estrutural discreto com 8740 elementos.



Fonte: Autor (2018).

A seguir, é necessário estabelecer as condições de contorno e carregamento aplicadas ao modelo. Essa tarefa é relativamente simples, uma vez que ambas as definições envolvem o chapeamento, o qual não sofre modificação na geometria durante o processo de otimização⁵. Além disso, quando se aplica uma condição de

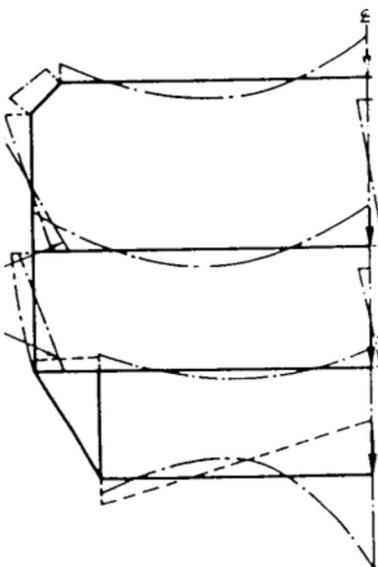
⁵ Convém lembrar que embora a espessura seja alterada durante o processo de otimização, essa é descrita apenas no processo de discretização do modelo, e não na geração do modelo geométrico.

contorno na aresta lateral da chapa, essa também é aplicada aos vértices dos reforçadores, uma vez que estes são considerados colados à superfície, por meio do vínculo do tipo *Bonded*.

Duas condições de contorno diferentes são alocadas. Nas extremidades referentes as anteparas transversais, o painel será considerado engastado, por meio da utilização da opção “suporte fixo” existente no programa. No entanto, nas extremidades referentes a posição dos costados, o painel foi considerado apoiado, utilizando a opção “apoio” do programa. A consideração de que os painéis estruturais se apoiam nos costados da embarcação deve-se ao fato de que não existe simetria de carregamento no plano do costado, portanto esse apresenta a tendência de rotação, conforme pode ser visto na Figura 19.

Os efeitos da consideração de que o painel possui 2 lados engastados e 2 lados apoiados pode ser visto na Figura 20, na qual observa-se claramente que os reforçadores transversais sofrem rotação, enquanto os reforçadores longitudinais são fixos.

Figura 19 - Efeito de rotação dos costados.



Fonte: (LEWIS, 2008).

Por fim deve-se realizar a aplicação de uma condição de carregamento. No fundo do navio, atuam a pressão atmosférica dos dois lados do painel, se anulando. Assim a resultante de forças refere-se apenas a pressão hidrostática, a qual atua na parte inferior da chapa.

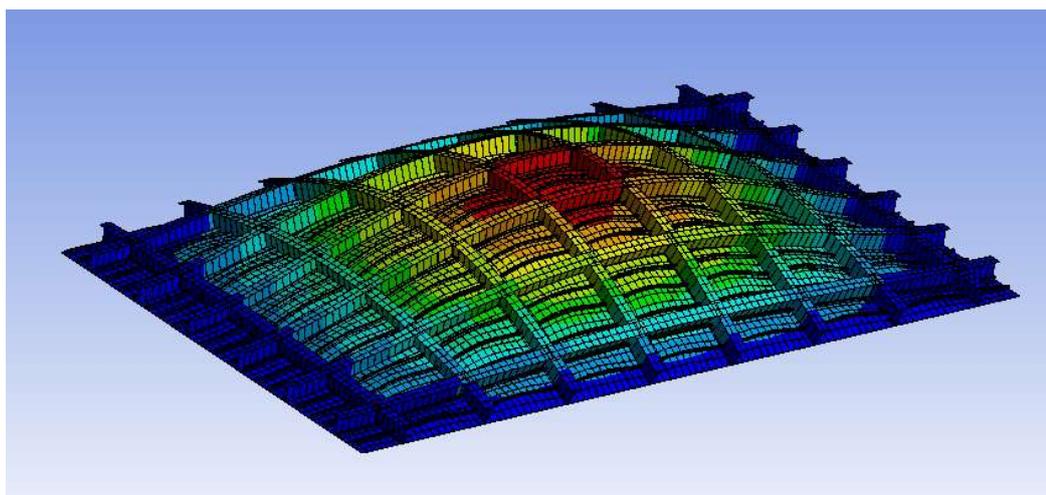
Considerou-se o calado da embarcação a ser estudada é equivalente a 12 metros. Esta informação foi baseada na profundidade de atracação do porto de Santos. A pressão atuante no fundo do navio será dada pela formulação 7, a qual corresponde a $1,20663 \cdot 10^5$ Pa. Os dois outros parâmetros considerados foram $9,81 \text{ m/s}^2$, referente aceleração da gravidade e 1025 kg/m^3 , referente a densidade da água salgada.

$$P = \rho_{sw}gH \quad (\text{Equação 8})$$

Na Figura 20 é mostrado um exemplo da estrutura deformada de um painel com 8 reforçadores transversais, 6 longarinas e 18 leves, submetido a pressão definida resultante da equação 7. É importante observar que a escala da deformação foi majorada para permitir uma melhor visualização do comportamento estrutural.

Nota-se que a maior distorção ocorre na chapa, e em seguida nos reforçadores leves e assim por diante. Estes perfis leves não só acompanham a deformação dos reforçadores pesados, mas também deformam entre eles. Este fenômeno deve-se ao fato de que a inercia dos reforçadores pesados é no mínimo 10 vezes maior e, portanto, funcionam como engaste para os reforçadores leves.

Figura 20 – Campo de distorções em um painel estrutural.



Fonte: Autor (2018).

4.3 Formulação da otimização de um painel estrutural

A modelagem e discretização do painel estrutural foi parametrizada de modo a permitir a alteração de qualquer uma das variáveis de decisão do projeto e ainda assim realizar todos os procedimentos numéricos necessários para determinar a correta distribuição das tensões ao longo da estrutura.

A aplicação do processo de otimização foi realizado por meio da utilização do programa *ModeFrontier*. Este, por sua vez, possui inúmeros algoritmos genéticos em seu código, proporcionando uma ampla gama de possibilidades, entre eles o NSGA-II, cuja descrição foi apresentada anteriormente. Outra vantagem da utilização dessa ferramenta é a fácil interação com o programa utilizado para realizar a análise do painel a partir do método dos elementos finitos.

As variáveis de decisão utilizadas na modelagem foram apresentadas em tópico anterior, restando a necessidade de definir os limites de cada uma, assim como apresentar considerações necessárias para o processo de otimização.

É preciso salientar que todos os intervalos e definições foram os mesmos utilizados por Muller (2016), apresentados na Tabela 4. A otimização em elementos finitos têm, entre seus objetivos, fazer uma comparação com àquela realizada por Muller (2016) utilizando teorias analíticas. Por esta razão, será feito uma cópia destes limites, para que os resultados apresentados sejam passíveis de comparação.

Tabela 4 – Intervalos para realização da síntese.

Limite inferior	Variável	Limite superior
1,8 [m]	<i>Slp</i>	5,5 [m]
0,5 [m]	<i>Sll</i>	1 [m]
2,5 [m]	<i>St</i>	5 [m]
15 [mm]	<i>tc</i>	25 [mm]
500 [mm]	<i>Hap</i>	1400 [mm]
300 [mm]	<i>Wfp</i>	1000 [mm]
10 [mm]	<i>tap</i>	40 [mm]
10 [mm]	<i>tfp</i>	50 [mm]
85 [mm]	<i>Hal</i>	500 [mm]
50 [mm]	<i>Wfl</i>	400 [mm]
5 [mm]	<i>tal</i>	25 [mm]
5 [mm]	<i>tfl</i>	35 [mm]
500 [mm]	<i>Hat</i>	1400 [mm]
300 [mm]	<i>Wft</i>	1000 [mm]
10 [mm]	<i>tat</i>	40 [mm]
10 [mm]	<i>tft</i>	50 [mm]

Fonte: Autor (2018).

A parametrização do modelo referente ao painel estrutural utilizou o recurso *Parameter* do *Ansys*. Esta opção permite selecionar qualquer valor usado na modelagem ou então qualquer valor exibido como resposta do programa e transformá-lo em um parâmetro de entrada ou saída do modelo.

Uma vez definidos os parâmetros de modelagem no *Ansys*, o programa *ModeFrontier* é capaz de ler e escrever esses parâmetros, associando-os a variáveis, restrições ou funções objetivo referentes ao modelo de otimização.

É importante mencionar que, quando utilizado o comando *Pattern*, mencionado anteriormente, são requeridos dois valores: a distância a partir do primeiro reforçador e o número de cópias que se deseja criar. Entretanto, no caso de um painel com uma chapa de tamanho fixo, o espaçamento irá determinar o número de cópias daquele reforçador que precisam ser criadas, para que estas fiquem uniformemente espaçadas ao longo do chapeamento.

Por essa razão, o número de cada um dos tipos de reforçador (longitudinal leve, longitudinal pesado e transversal) é definido a partir do espaçamento, através das equações 9, 10 e 11.

$$CopLP = inteiro\left(\frac{11-2*Silp}{Slp}\right) \quad (\text{Equação 9})$$

$$CopLL = inteiro\left(\frac{11-2*Sill}{Sll}\right) \quad (\text{Equação 10})$$

$$CopT = inteiro\left(\frac{20-2*Sit}{St}\right) \quad (\text{Equação 11})$$

Por fim, observa-se que o primeiro espaçamento, ou seja, aquele entre a extremidade da chapa (sem reforço) e o primeiro reforçador, também foi definido com o auxílio de equações (11, 12 e 13). Esta consideração foi implementada por dois motivos principais, e também justifica a escolha da utilização dos espaçamentos e não dos números de reforçadores como variáveis de decisão.

$$Silp = \frac{[11 - [inteiro\left(\frac{11}{Slp}\right) - 1] * Slp]}{2} \quad (\text{Equação 12})$$

$$Sill = \frac{[Slp - [inteiro\left(\frac{Slp}{Sll}\right) - 1] * Sll]}{2} \quad (\text{Equação 13})$$

$$Sit = \frac{[20 - [inteiro\left(\frac{20}{St}\right) - 1] * St]}{2} \quad (\text{Equação 14})$$

Será utilizado de outro exemplo para ilustrar a situação favorável ao utilizar espaçamentos constantes no meio do painel e menores na extremidade. Propõe-se que o leitor queira utilizar 3 reforços longitudinais pesados. Caso a entrada do software fosse o número de reforçadores, só seria possível definir um espaçamento comum, que seria 2,75 metros, uma vez que a largura do painel é igual a 11 metros.

O que será mostrado agora, é como utilizar os mesmos 3 reforçadores, com intervalos diferentemente espaçados. Baseando-se apenas na escolha por variar o espaçamento, e utilizar de equações que levam este espaçamento como variável, para definir o espaçamento da extremidade.

Definindo o Slp igual a 3 metros são obtidos 3 reforços apenas utilizando os espaçamentos da extremidade igual a 2,5 metros. Com esta mesma abordagem, caso o Slp fosse 3,5 metros, ainda seriam utilizados 3 reforçadores com espaçamento nas extremidades de 2 metros.

Basicamente, utilizar espaçamento como variável aliado a espaços diferentes na extremidade, obtemos um maior número de configurações no painel. Estas equações mencionadas acima são demonstradas detalhadamente na apresentação da formulação matemática do problema de otimização.

Outro ponto positivo do uso das equações, é que pode ser utilizado mais reforços no painel, sem vãos exagerados. Também, como dependem dos espaçamentos intermediários, não fazem com que reforçadores leves e pesados se sobreponham.

Entre as restrições do problema, existem duas relacionadas a geometria. Quanto ao momento inércia no eixo x (pode ser visualizado no tópico de modelagem do painel), a magnitude dos reforçadores leves deve ser 10 vezes menor do que dos pesados (longitudinais e transversais). E o espaçamento entre o primeiro reforço e a extremidade deve ser menor do que o espaçamento comum na parte central do painel, já exemplificado.

Já discutido as variáveis de decisão e algumas restrições, é necessário analisar os objetivos propostos. Este estudo irá realizar a otimização de 3 maneiras diferentes. Primeiramente será utilizado objetivos de minimização de massa e tensão, para obter resultados passíveis de comparação com o trabalho apresentado por Muller (2016).

Após esta comparação inicial, será utilizada tensão máxima no painel como restrição, menor do que a tensão de escoamento do material, e o objetivo será minimizar a massa e o comprimento de solda. Ainda serão analisados efeitos de troca de material, visualizando a mesma minimização de massa e comprimento de solda, utilizando o alumínio, outro material utilizado na construção de navios.

As saídas necessárias, para ser possível realizar as otimizações são: massa do painel, tensão equivalente de *Von Mises* e comprimento de solda.

No caso da massa, já foi mostrada modelagem das seções dos perfis, chapeamento, pois então, o software informa o peso de cada elemento presente no painel, precisando apenas montar uma equação que some todos estes. Esta soma também precisa ser paramétrica.

Com relação ao comprimento de solda, serão considerados 4 cordões de solda em cada perfil, como visto na figura 15. Dois na parte inferior, e dois na junção entre alma e flange. Com a quantidade de reforçadores, obtemos a metragem de cordão de solda. Novamente através das equações montadas no *Ansys*.

A tensão máxima é uma saída direta do programa, não precisa de equacionamento. Apenas informar ao software que depois de simulado aquela situação, uma das respostas a serem visualizadas, é a tensão equivalente de *Von Mises*.

4.3.1 Modelagem matemática referente ao processo de otimização

Parâmetros:

Z1 = 20 m; #Comprimento do painel

Z2 = 12 m; #Calado da embarcação

Z3 = 11 m; #Largura do painel

Z4 = 0,2 m; #Tamanho máximo dos elementos finitos

Variáveis:

X = [X1, X2, X3, X4...X16];

X1 = Wfl;

X2 = Wfp;

X3 = Wft;

X4 = tfl;

X5 = tfp;

X6 = tft;

X7 = Hal;

X8 = Hap;

X9 = Hat;

X10 = tal;

X11 = tap;

X12 = tat;

X13 = tc;

X14 = Sll;

X15 = Slp;

X16 = St;

Restrições:

Explícitas:

$X1 \geq 0,05 \text{ m}; X1 \leq 0,4 \text{ m};$
 $X2 \geq 0,3 \text{ m}; X2 \leq 1 \text{ m};$
 $X3 \geq 0,3 \text{ m}; X3 \leq 1 \text{ m};$
 $X4 \geq 0,005 \text{ m}; X4 \leq 0,035 \text{ m};$
 $X5 \geq 0,01 \text{ m}; X5 \leq 0,05 \text{ m};$
 $X6 \geq 0,01 \text{ m}; X6 \leq 0,05 \text{ m};$
 $X7 \geq 0,085 \text{ m}; X7 \leq 0,5 \text{ m};$
 $X8 \geq 0,5 \text{ m}; X8 \leq 1,4 \text{ m};$
 $X9 \geq 0,5 \text{ m}; X9 \leq 1,4 \text{ m};$
 $X10 \geq 0,005 \text{ m}; X10 \leq 0,025 \text{ m};$
 $X11 \geq 0,01 \text{ m}; X11 \leq 0,04 \text{ m};$
 $X12 \geq 0,01 \text{ m}; X12 \leq 0,04 \text{ m};$
 $X13 \geq 0,015 \text{ m}; X13 \leq 0,025 \text{ m};$
 $X14 \geq 0,5 \text{ m}; X14 \leq 1 \text{ m};$
 $X15 \geq 1,8 \text{ m}; X15 \leq 5,5 \text{ m};$
 $X16 \geq 2,5 \text{ m}; X16 \leq 5 \text{ m};$

Implícitas:

$G = [G1, G2, G3 \dots G6];$
 $G1 = \text{Inércia perfil leve};$
 $G2 = \text{Inércia perfil pesado};$
 $G3 = \text{Inércia perfil transversal};$
 $G4 = \text{Equação 12};$
 $G5 = \text{Equação 13};$
 $G6 = \text{Equação 14};$
 $G2 / G1 \geq 10;$
 $G3 / G1 \geq 10;$
 $G4 \leq X15;$
 $G5 \leq X14;$
 $G6 \leq X16;$

#Saída do ANSYS

#Saída do ANSYS

#Saída do ANSYS

Objetivos:

$$F = [F1, F2, F3];$$

$$F1 = M_c + M1 + M2 + M3;$$

#Minimização da massa

$$F2 = S_{vm};$$

#Minimização da tensão

$$F3 = C_{SI} + C_{Sp} + C_{St};$$

#Minimização do comprimento de solda

Onde para a massa:

$$M_c = \text{Massa da chapa};$$

#Saída do ANSYS

$$M1 = M_l \cdot (1 + C_{opLL});$$

#Massa total dos reforçadores leves

$$M2 = M_p \cdot (1 + C_{opLP});$$

#Massa total dos reforçadores pesados

$$M3 = M_t \cdot (1 + C_{opT});$$

#Massa total dos reforçadores transversais

$$M_l = \text{Massa de um reforçador leve};$$

#Saída do ANSYS

$$M_p = \text{Massa de um reforçador leve};$$

#Saída do ANSYS

$$M_t = \text{Massa de um reforçador leve};$$

#Saída do ANSYS

$$C_{opLL} = \text{Equação 10};$$

$$C_{opLP} = \text{Equação 9};$$

$$C_{opT} = \text{Equação 11};$$

Para a tensão:

$$S_{vm} = \text{Tensão equivalente de Von Mises};$$

#Saída do ANSYS

Para o comprimento de solda:

$$C_{SI} = (C_{opLL} + 1) \cdot (Z1)^4$$

$$C_{Sp} = (C_{opLP} + 1) \cdot (Z1)^4$$

$$C_{St} = (C_{opT} + 1) \cdot (Z3)^4$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta e o desenvolvimento realizado. O objetivo é fazer uma comparação concisa com os resultados apresentados por Muller (2016) quanto à minimização de massa e tensão.

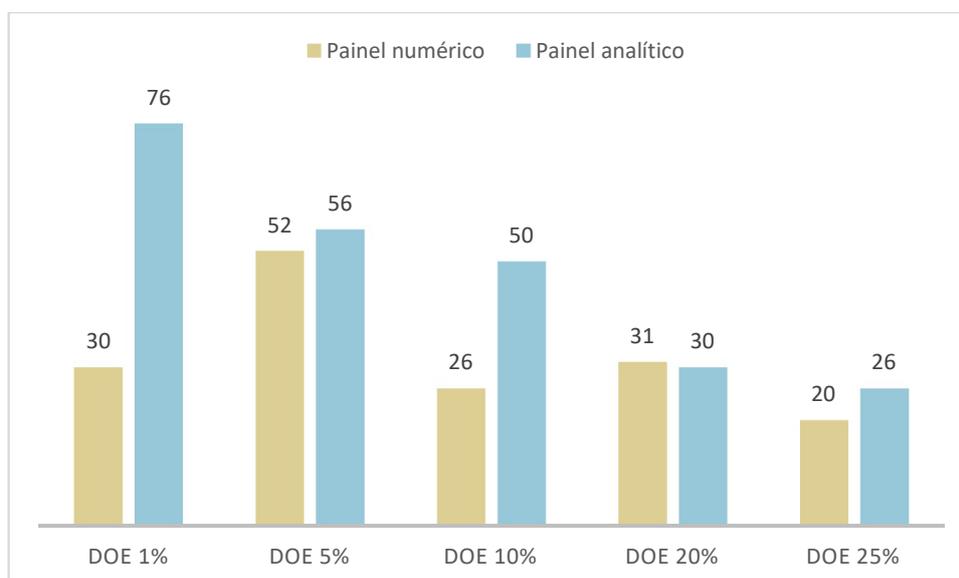
5.1 Minimização de massa e tensão limitada a 500 análises

Nesta seção serão mostrados os resultados do modelo de otimização cujas variáveis e limites da região viáveis são mostrados na Tabela 4 e cujos objetivos consistem em minimizar a massa e a tensão presente no painel estrutural descrito na fundamentação teórica. Por fim, considera-se a restrição de que a inércia da secção dos reforçadores leves precisa ser pelo menos 10 vezes menor do que a inércia da secção dos reforçadores longitudinais pesados e transversais, conforme discussão apresentada na metodologia.

Inicialmente realiza-se uma comparação referente à quantidade de indivíduos presentes na fronteira de Pareto ao final do processo de otimização. Otimização esta que apresenta objetivos de massa e tensão, com restrições referentes apenas a geometria do reforço e espaçamentos.

Embora o caráter randômico associado ao algoritmo NSGAI impeça uma comparação direta, valores muito distintos entre a abordagem analítica de (MULLER, 2016) e a abordagem numérica deste trabalho podem alertar para eventuais inconsistências na modelagem. Tal comparação pode ser vista na Figura 21.

Figura 21 – Comparação entre numérico e analítico dos indivíduos na fronteira de Pareto com 500 análises.



Fonte: Autor (2018).

O estudo analítico apresentou um decréscimo no número de indivíduos pertencentes a fronteira ao final do processo de otimização; conforme se aumenta o tamanho do DOE gerado. Com o uso de algoritmos evolutivos, as amostras que mais sofrem cruzamento e mutação são as de menor porcentagem de DOE, permitindo uma maior possibilidade de exploração da região viável e aumentando a dispersão das soluções. Esta foi, inclusive, a conclusão apresentada por Muller (2016).

Entretanto é preciso levar em consideração que a população inicial é gerada randomicamente, além do fato de que as características são baseadas nos indivíduos mais adaptados da iteração anterior. Com 1% de DOE, a dispersão destes indivíduos pode se tornar restrita, por gerar muita diferença em uma determinada variável de decisão entre uma solução e outra. Basicamente, com poucos indivíduos na população inicial, a qualidade desses indivíduos tem forte influência na qualidade final da Fronteira de Pareto.

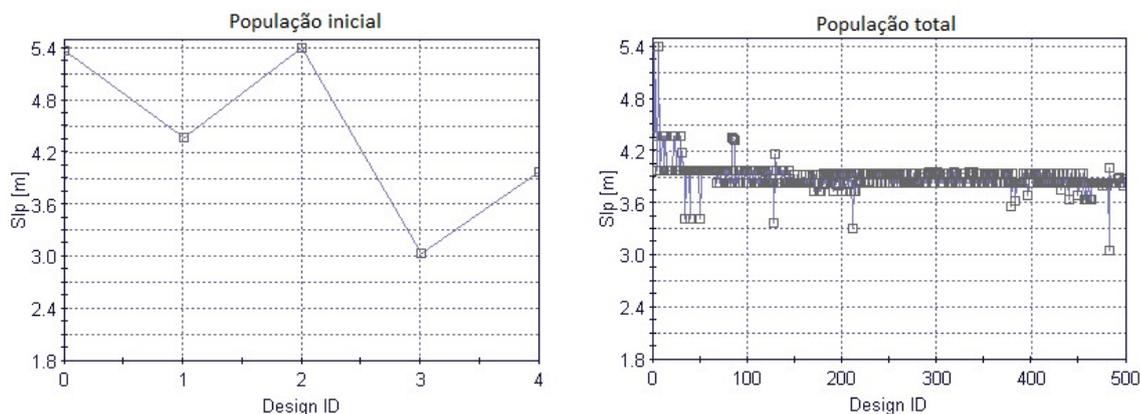
Como mencionado na fundamentação, em um algoritmo genético, a probabilidade típica de uma mutação ocorrer, é baixa. Pois o cruzamento é o operador dominante no processo de evolução.

Desta forma, famílias iniciais com mais indivíduos geram uma maior variabilidade de soluções. Já, em DOEs pequenos, as características dos pais não serão tão dispersas e a chance de convergir para um indivíduo ótimo é de fato menor.

Basicamente os poucos indivíduos referentes ao caso onde a população inicial representa 1% do total de análises, precisariam de uma maior probabilidade de mutação para explorarem todo o espaço amostral.

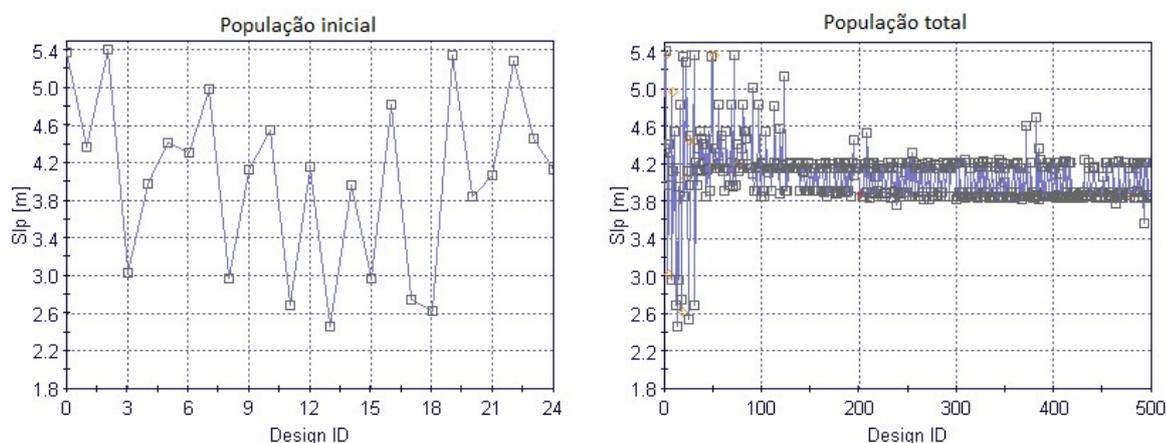
Para verificar esta afirmação, é possível utilizar um gráfico referente ao comportamento de um parâmetro considerando apenas os indivíduos da população inicial de um DOE de 1% (Figura 22) e 5% (Figura 23). A variável de síntese utilizada para tal comparação foi o espaçamento entre longitudinais pesados (S/p). Os gráficos mostram, no eixo x, o número do indivíduo da população, enquanto no eixo y é mostrado o respectivo valor da variável de decisão.

Figura 22 – Valores de S/p equivalentes à população inicial e total com DOE de 1%.



Fonte: Autor (2018).

Figura 23 – Valores de S/p equivalentes à população inicial e total com DOE de 5%.



Fonte: Autor (2018).

A Figura 22 mostra que na população inicial de 1%, aparentemente há fragilidade em abranger toda a região viável. Ao contrário do que é visto na Figura 23, cuja população inicial preenche de forma mais homogênea a região viável.

O mesmo pode ser levantado sobre o comportamento de tal variável em todos os designs. Foi observado uma tendência a certo valor nos dois casos, 1% e 5%. Entretanto, a variação em torno deste valor no caso de 1% é visivelmente menor.

A questão é, quanto mais indivíduos iniciais forem gerados, menor vai ser o intervalo de espaçamento sem que haja representantes. Porém, conforme se aumenta demais o número do DOE, menor o número de gerações possíveis para aquele total convergir para um ótimo de Pareto. E é por este motivo que é preciso encontrar um meio termo que apresente uma fronteira bem definida e com número de representantes significativo.

Esta pode ser a razão que, distintamente do estudo analítico, pode ser observado na Figura 21, que o caso de 1% de DOE apresentou menos indivíduos na fronteira de Pareto do que os casos de 5% e 20%. No caso deste trabalho com 500 indivíduos, a otimização com DOE de 5% mostrou o melhor balanço entre DOE e número de gerações, apresentando mais indivíduos na fronteira.

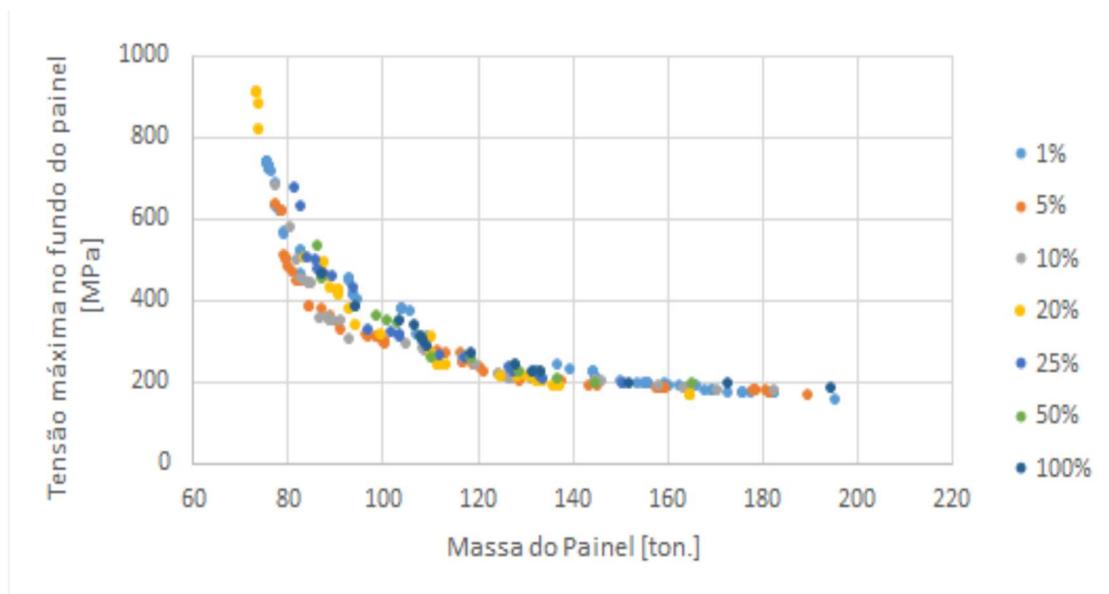
Quando se confronta a Figura 24 com a Figura 25, que mostram os limites da fronteira, observam-se duas diferenças cruciais. A primeira consiste no fato de que a faixa de tensão apresentada pelos painéis numéricos é mais estreita do que aquelas obtidas com o método analítico. Enquanto a segunda, consiste no fato de que os valores de tensão máxima das soluções obtidas na abordagem utilizando MEF apresentam valores menores quando comparados a aqueles obtidos com o modelo analítico.

Também, o estudo computacional apresenta painéis mais leves. A massa dos painéis otimizados de MEF chega a um mínimo em cerca de 45 toneladas, enquanto no estudo analítico, apenas 65 toneladas.

A diferença entre o comportamento estrutural observado no modelo analítico e no modelo numérico pode ser resultado de inúmeros fatores. No entanto, conforme pode ser visto em Augusto (2004) um desses fatores possui maior importância. No modelo analítico, os reforçadores longitudinais pesados e os reforçadores transversais são considerados vigas engastadas apenas em suas extremidades, não considerando portanto, a interação entre esses elementos. Por outro lado, no modelo numérico, a interação entre os reforçadores é considerada, aumentando a rigidez e reduzindo a

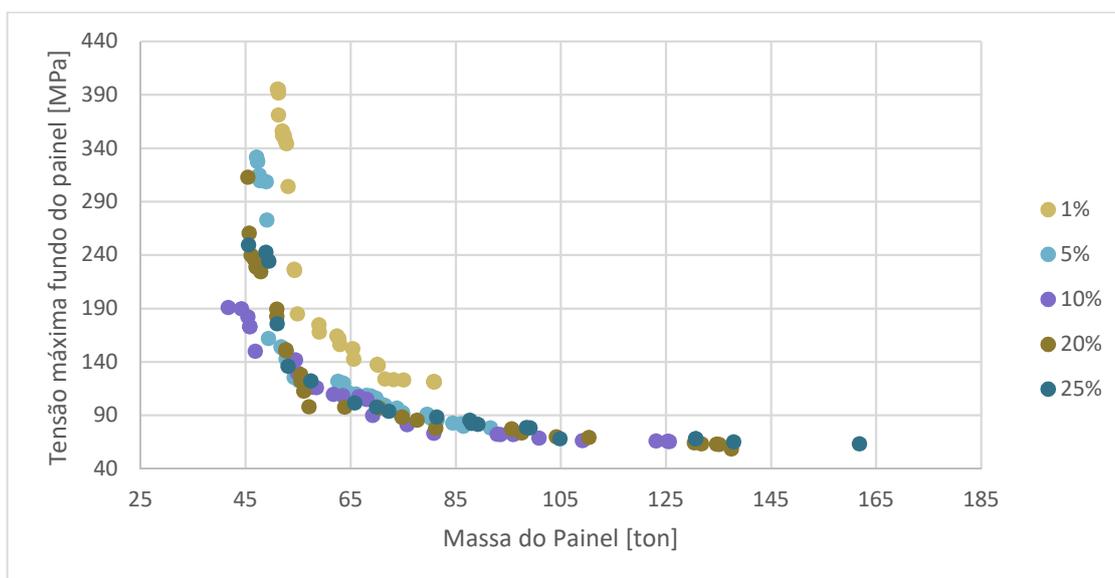
tensão presente na estrutura. A limitação do método analítico é justamente esta, não considerando estas interseções e fazendo com que o conjunto seja menos rígido.

Figura 24 – Otimizações limitadas a 500 indivíduos (modelo analítico).



Fonte: MULLER (2016, p. 57).

Figura 25 – Otimizações limitadas a 500 indivíduos (modelo MEF).

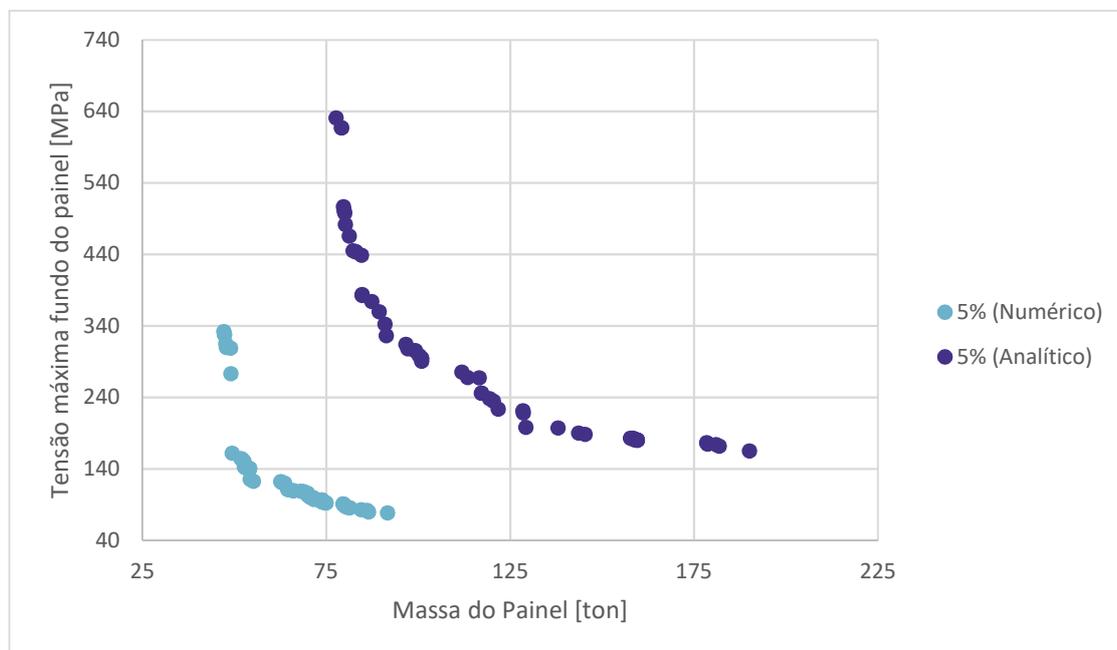


Fonte: Autor (2018).

A Figura 26 demonstra a comparação entre as duas porcentagens ótimas de DOE, que foi considerada 5% pelos dois estudos. Pode ser visto diferença de tensão, com painel numérico apresentando resultados com massa e tensão abaixo do

analítico. Também se nota que a otimização no painel analítico deixa a fronteira mais definida, apresentando maior variação nos dois eixos de objetivo.

Figura 26 – Comparação entre Fronteiras de 5% DOE e 500 indivíduos.



Fonte: Autor (2018).

Em relação aos diferentes estudos realizados para uma otimização com um total de 500 análises, e cujas análises são realizadas utilizando o MEF, conclui-se que a curva de 1% é a mais interna entre todas, apresentando resultados que não representam adequadamente o conjunto de soluções ótimas do problema, além de não apresentar soluções com massa maior do que 85 toneladas. Já a curva referente a 10% de DOE apresenta comportamento contrário, não gerando soluções com tensão acima de 190 Mpa.

Por fim, as curvas de 5%, 20% e 25% contém pontos distribuídos que podem definir a fronteira de Pareto com boa dispersão, apresentando boa variação tanto em massa como em tensão. O critério de diferenciação entre elas é apresentado pela quantidade de indivíduos presentes na fronteira. No caso da fronteira de 25% são apresentadas poucas soluções, gerando indivíduos com baixa dispersão, dificultando uma fronteira bem definida por todo o domínio. O conjunto amostral com 20% de DOE apresenta uma fronteira mais externa do que as demais, porém, poucos indivíduos em comparação com a fronteira obtida no caso de 5%.

A Tabela 5 apresenta os limites das fronteiras observados em cada um dos casos analisados nesta secção. É importante observar que embora as porcentagens de 5% e 20% de DOE parecem indicar resultados promissores, é evidente que o processo de otimização ainda não convergiu completamente, pois existem soluções descritas na fronteira referente ao caso 10% que não aparecem nas fronteiras referentes aos casos de 5% e 20%, como por exemplo, a solução com massa de 41,6 toneladas.

Tabela 5 – Mínimos e máximos das respectivas curvas de Pareto para 500 análises.

% DOE	MASSA [t]		TENSÃO [MPa]	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
1	80,9	51,1	395	121,
5	91,6	47,1	332	78,4
10	126	41,6	191	65,7
20	137	45,4	313	58,8
25	162	45,5	250	63,6

Fonte: Autor (2018).

Em um processo de otimização é importante analisar não apenas o comportamento das funções objetivo, mas também das restrições. Assim, na Tabela 6 são apresentadas as porcentagens de soluções viáveis e inviáveis analisadas durante o processo de otimização, bem como a porcentagem de eventuais erros ocorridos durante a análise das soluções.

Os erros de simulação ocorrem quando a conversação entre a ferramenta de análise (*Ansys*) e a ferramenta de otimização (*ModeFrontier*) falha, fazendo com que a ferramenta de otimização seja incapaz de receber os dados resultantes do processo de simulação.

Para verificar o comportamento do modelo paramétrico desenvolvido, selecionou-se um exemplo de solução gerada durante o processo de otimização e que resultou em erro de simulação.

Os valores das variáveis de decisão desta solução foram então inseridos manualmente diretamente na ferramenta de simulação, visando verificar se a simulação incorreria em erro. Desta forma foi possível investigar se o problema era um intervalo não suportado pelo modelo parametrizado, ou apenas erro

computacional de sincronismo de dados. Foi constatado que a simulação ocorria normalmente, sugerindo que o erro observado se deve a um problema de sincronismo de dados entre as ferramentas.

Tabela 6 – Porcentagem de soluções inviáveis (limitada a 500 análises).

500 Soluções analisadas					
% DOE	1,00	5,00	10,0	20,0	25,0
% Soluções inviáveis	1,20	2,00	2,60	5,60	6,60
% Erros de simulação	0,40	1,20	0,20	0,20	0,40
% Soluções viáveis	98,4	96,8	97,2	94,2	93,0

Fonte: Autor (2018).

5.2 Minimização de massa e tensão limitada a 1000 análises

Nesta seção são apresentados os resultados referentes ao mesmo problema descrito na seção anterior, no entanto, utilizando um total máximo de 1000 análises realizadas durante o processo de otimização.

Como já pode ser observado nas otimizações que levaram em consideração um total máximo de 500 indivíduos, a comparação com relação a valores absolutos de tensão e massa não pode ser feita. Pois já foi estabelecido que o modelo MEF apresenta resultados com tensão consideravelmente menor, do que o modelo analítico, quando considerado painéis de mesma topologia submetidos ao mesmo carregamento.

Porém resultados referentes somente à otimização podem ser comparados, tais como dominância entre curvas e definição espacial destas.

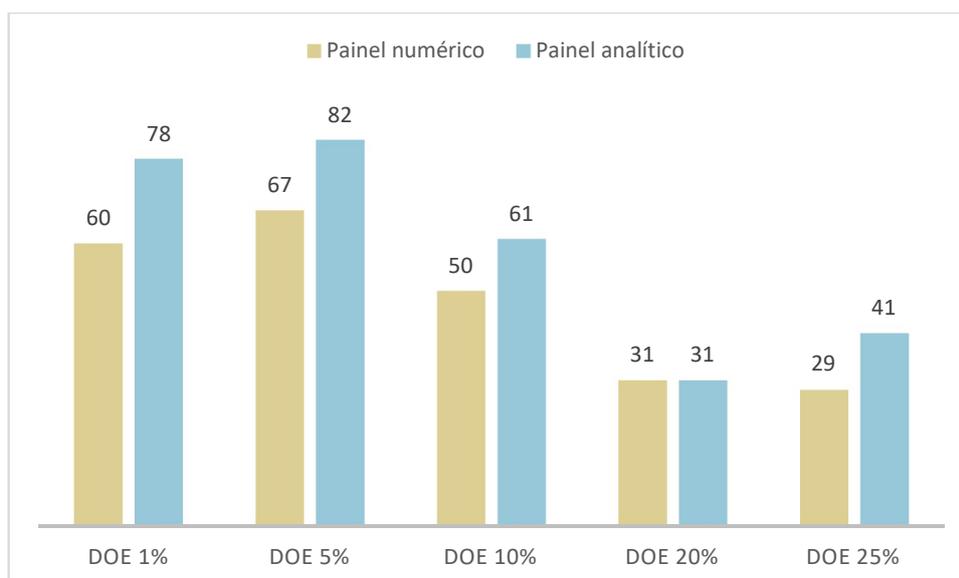
É importante recordar que esta etapa do projeto está sendo utilizada como uma verificação de quais são os parâmetros ideais a serem utilizados na otimização deste problema. Uma vez determinado tais parâmetros, estes serão utilizados no restante do trabalho.

Neste novo caso, o número de indivíduos na fronteira de Pareto aumentou, como esperado, para um estudo que realizou duas vezes mais análises; chegando a 1000 indivíduos.

Novamente, as otimizações tiveram comportamento parecido com aquele observado no estudo limitado a 500 análises. Observou-se que o número de indivíduos é crescente entre 1% e 5% de DOE, e então diminui para os demais valores

de DOE. Segundo Muller (2016), os possíveis fatores para este comportamento são os mesmos já observados no caso da otimização limitada a 500 análises e que foram discutidos no capítulo anterior.

Figura 27 – Comparação entre numérico e analítico dos indivíduos na fronteira de Pareto com 1000 análises.



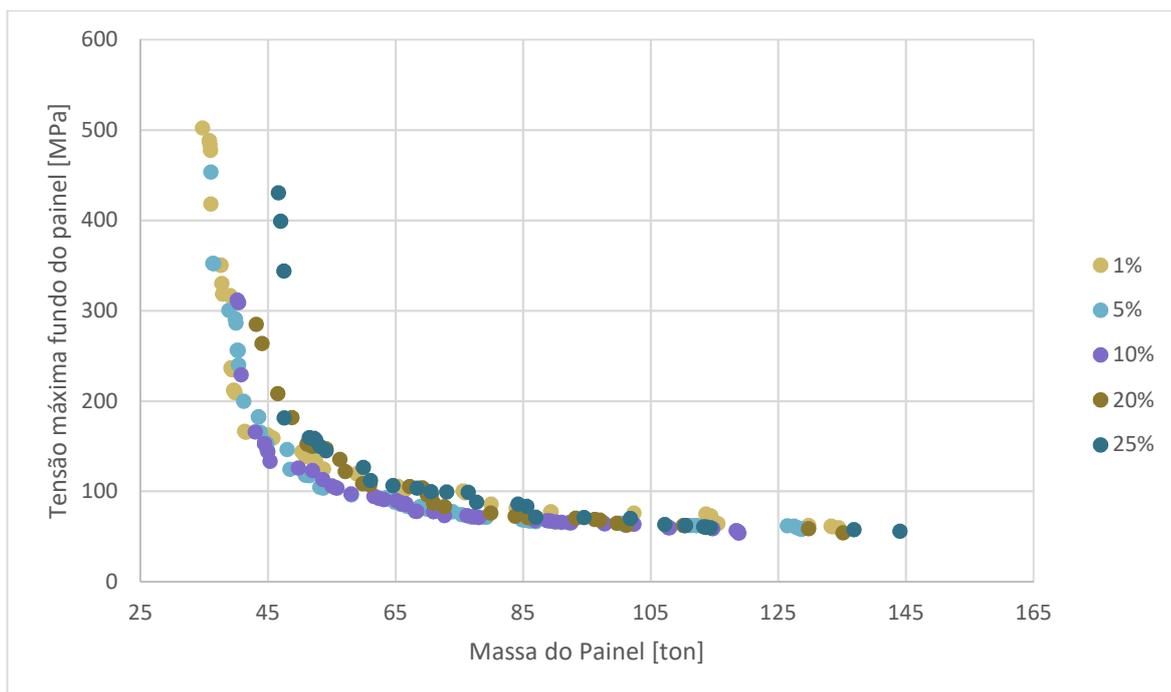
Fonte: Autor (2018).

Diferente dos resultados observados no capítulo anterior, o espaçamento entre as diferentes fronteiras diminuiu. Desta forma é mais confuso enxergar quais são as fronteiras mais externas. Esse resultado é importante e indica que com limite de 1000 análises, os procedimentos de otimização realizados com diferentes porcentagens de DOE alcançaram a convergência, resultando em uma mesma Fronteira.

Quando é analisado uma faixa abaixo de 85 toneladas, pode-se observar que as curvas referentes à 20% e 25%, se mostram internas as demais. No entanto, nas outras regiões fica difícil estabelecer uma diferenciação clara entre as curvas.

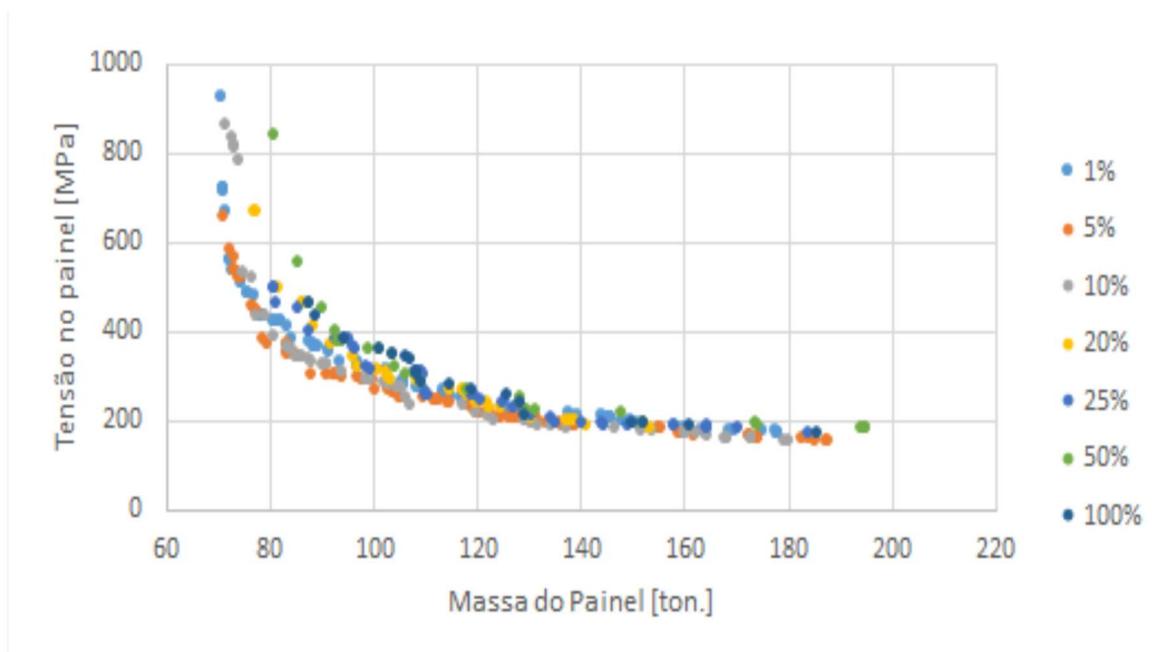
No entanto, a curva de 5% apresenta novamente um melhor comportamento, conforme já havia sido, inclusive, observado por Muller (2016), resultando na fronteira mais externa e com uma boa dispersão das soluções.

Figura 28 – Otimizações limitadas a 1000 indivíduos (modelo MEF).



Fonte: Autor (2018).

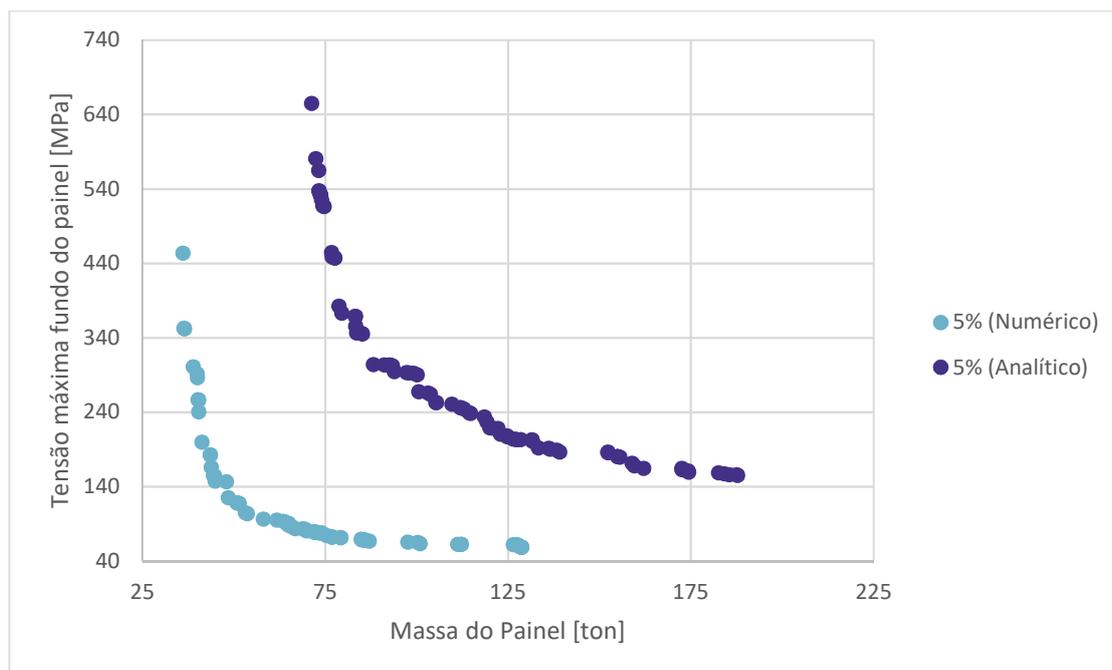
Figura 29 – Otimizações limitadas a 1000 indivíduos (modelo analítico).



Fonte: (MULLER, 2016).

Novamente é feita comparação entre as duas melhores fronteiras na Figura 30. Como esperado, as curvas são posicionadas em regiões diferentes do gráfico. Porém, desta vez a curva de Pareto do modelo numérico foi mais extensa, explorando mais os limites de tensão e massa.

Figura 30 – Comparação entre Fronteiras de 5% DOE e 500 indivíduos.



Fonte: Autor (2018).

Assim como foi feito no capítulo anterior, na Tabela 7, são mostrados os extremos das diferentes fronteiras de Pareto obtidas nos diferentes casos analisados.

Tabela 7 – Mínimos e máximos das respectivas curvas de Pareto para 1000 análises.

% DOE	MASSA [t]		TENSÃO [MPa]	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
1	134	34,7	503	59,9
5	129	36,0	454	58,3
10	119	40,2	312	54,0
20	135	43,1	285	54,1
25	144	46,6	431	56,1

Fonte: Autor (2018).

É importante observar que as porcentagens de 5% e 10% de DOE parecem indicar resultados promissores, no entanto, a exemplo do que ocorreu no capítulo anterior, os resultados parecem evidenciar que o processo de otimização ainda não convergiu completamente, pois existem soluções descritas na fronteira referente ao caso 1% que não aparecem nas fronteiras referentes aos casos de 5% e 10%, como por exemplo, a solução com massa de 34,7 toneladas.

No entanto, verifica-se que o uso de até 1000 análises durante o processo de otimização permitiu que ao algoritmo encontrar soluções melhores do que aquelas encontradas no processo limitado a 500 análises. Esse fato pode ser evidenciado pela busca dos extremos da fronteira. No caso do processo com 500 análises a solução de menor massa possuía 41,6 t, enquanto que a solução de menor tensão possuía 58,8 MPa. Já no processo limitado a 1000 análises, a solução de menor massa apresentou 34,7 t enquanto que a solução de menor tensão apresentou 54,0 MPa.

Por fim, serão enumeradas na Tabela 8 a porcentagem de soluções inviáveis analisadas durante o processo de otimização limitada a 1000 análises. Observou-se que curiosamente, quanto maior for o tamanho do DOE, maior é a quantidade de soluções inviáveis geradas durante o processo de otimização. Infelizmente não se encontrou motivos que justificassem tal observação.

Tabela 8 – Porcentagem de soluções inviáveis (limitada a 1000 análises).

1000 Soluções analisadas					
% DOE	1,00	5,00	10,0	20,0	25,0
% Soluções inviáveis	0,50	2,10	3,10	4,70	7,00
% Erros de simulação	0,50	0,30	0,30	0,40	0,60
% Soluções viáveis	99,0	97,6	96,6	94,9	92,4

Fonte: Autor (2018).

5.2.1 Influência das variáveis de decisão nos indivíduos de Pareto

A partir dos resultados apresentados nos capítulos anteriores, concluiu-se que quando utilizado 5% da população total como amostra inicial, e um limite total de 1000 análises, os resultados são satisfatórios, obtendo-se uma Fronteira de Pareto com boa dispersão e que passa a não mais sofrer mudanças significativas ao longo das gerações.

Uma vez definido o conjunto de soluções ótimas para o problema de projeto de um painel estrutural sujeito a pressão uniforme, passasse então a análise das características dessas soluções. Tal análise é apresentada nesta secção, a qual utiliza exclusivamente os dados resultantes do caso no qual se considera o limite de 1000 análises com uma população inicial de 5% desse valor.

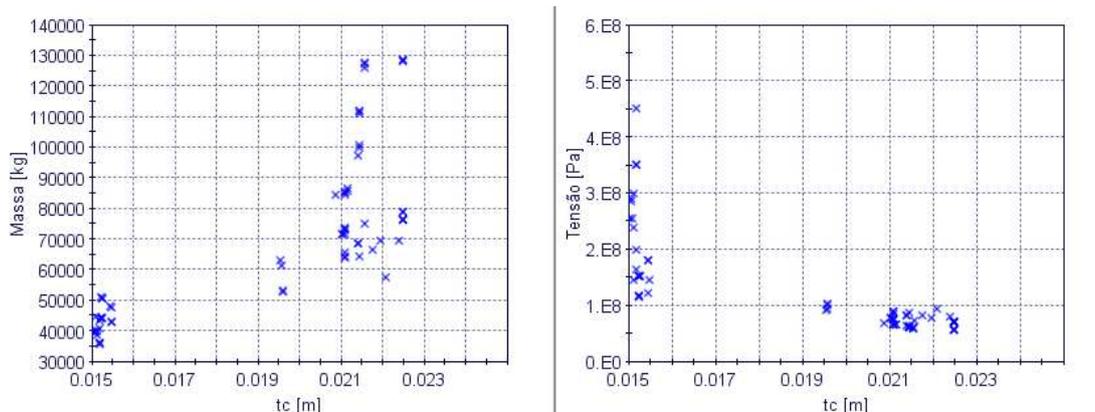
A Fronteira de Pareto apresenta soluções ótimas considerando-se dois objetivos, a minimização da massa e a minimização da tensão. Por este motivo, é esperado que as seções transversais sejam menores para indivíduos de baixa massa e maiores para painéis pesados. O contrário é válido para a tensão. Também, com relação aos espaçamentos, quanto menor esta variável, mais volumoso o painel ficará, mais rígido e, por fim, menores serão as tensões atuantes na estrutura.

Inicialmente verifica-se a variação da espessura de chapa (t_c) ao longo da Fronteira de Pareto (Figura 31). É possível observar claramente que a variável t_c tende a aumentar de valor conforme se anda na fronteira em direção a região de maior massa e menor tensão, conforme previsto no parágrafo anterior.

O efeito contrário ocorre em amostras com espessura elevada, gerando indivíduos próximos no quesito tensão e dispersos na massa. Não é possível desenhar uma linha de tendência para esta variável, podendo apenas afirmar que houve concentração de indivíduos em duas regiões distintas do intervalo.

A mesma conclusão foi encontrada por Muller (2016), conforme se aumenta a espessura, maior a massa e menor a tensão. No entanto, em seus resultados, os indivíduos de Pareto apresentam valores de espessura que cobrem todo o domínio do intervalo, diferentemente dos indivíduos pertencentes a Fronteira de Pareto obtida no processo de otimização utilizando o MEF, os quais se concentraram no entorno de dois valores (15 mm e 22 mm).

Figura 31 – Influência da espessura de chapa "tc" nos indivíduos de Pareto.



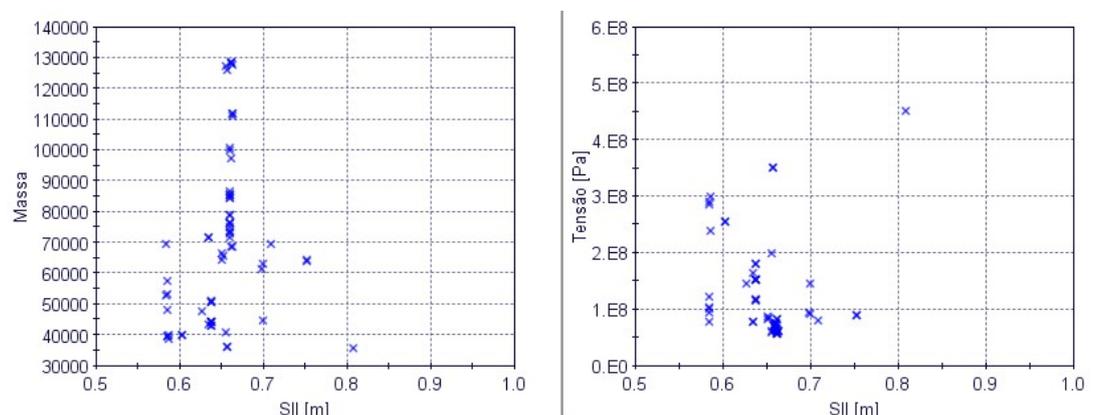
Fonte: Autor (2018).

Em relação ao espaçamento leve (S/l), as soluções ótimas de Pareto apresentaram um valor típico que está na metade inferior do intervalo, em torno de 0,66 m (Figura 32).

A concentração de soluções em um determinado valor de uma variável de decisão, a respeito da posição que a solução ocupa na Fronteira de Pareto, costuma indicar que esse valor pode ser considerado ótimo para ambos os objetivos estudados.

Por fim, observa-se que as flutuações observadas em torno desse valor, podem indicar que o processo de otimização não foi capaz de gerar, por mutação e cruzamento, uma solução com tal valor para todas as regiões da Fronteira de Pareto, indicando também a necessidade de mais gerações para a convergência completa das soluções.

Figura 32 – Influência do espaçamento entre leves "S/l" nos indivíduos de Pareto.



Fonte: Autor (2018).

Comparando-se o comportamento da variável S/p com o resultado obtido por Muller (2016), pode-se verificar que houve tendências à valores ótimos também no estudo analítico. Sendo que Muller observou concentrações em torno dos valores 0,55 m e 0,8 m.

Como conclusão final, apesar das regiões serem levemente distintas em ambos os estudos, a faixa de valores ideal para essa variável, parece estar limitada a faixa 0,6 e 0,8 metros.

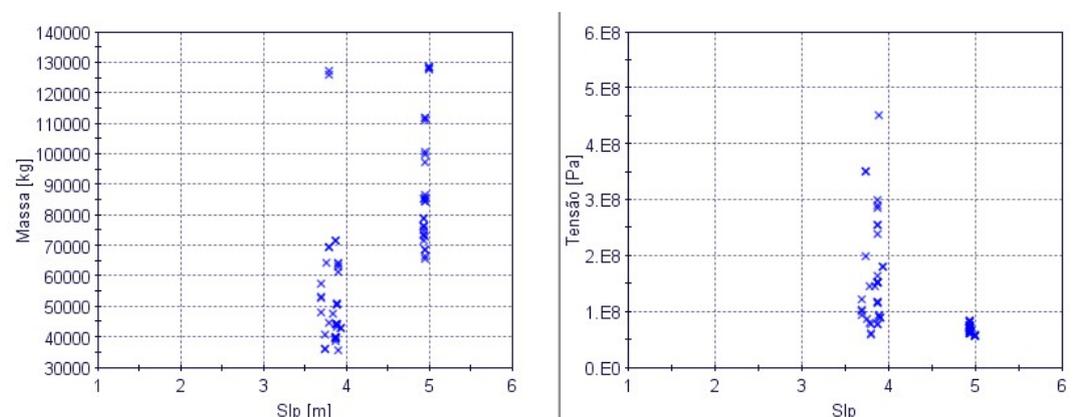
O comportamento da variável espaçamento entre perfis pesados S/p pode ser considerado inesperado. Observou-se que a influência é diretamente proporcional a massa e inversamente à tensão, resultado contrário ao observado por Muller (2016).

Esse fato decorre da constatação de que todas as soluções ótimas resultaram em S/p maiores do que 3,5 m. Para essa faixa de valores, o modelo paramétrico considera sempre a existência de 2 eforços longitudinais pesados, correspondendo a aglomeração de valores em torno do 3,7 m e do 5,0 m, conforme visto na Figura 33.

As flutuações em torno desses valores implicam apenas na redução da margem existente entre o último reforçador e o final do painel, não alterando o número de reforçadores. A mudança para um reforçador somente seria possível para valores de S/p acima de 5,5 m; o que representa uma violação da região viável estabelecida para o problema.

Assim, levantam-se duas possíveis conclusões. Na primeira, existem de fato uma região da fronteira de Pareto (baixa massa) onde o valor ótimo de S/p é de aproximadamente 3,7 m, enquanto que para regiões de alta massa, o valor ótimo de S/p é de aproximadamente 5,0 m. Outra possibilidade é que todas as soluções com S/p em torno de 5,0 m na verdade não conseguiram alcançar o valor ótimo global para esta variável que é 3,7 m, ficando presas em um ótimo local.

Figura 33 – Influência do espaçamento entre pesados "Slp" nos indivíduos de Pareto.



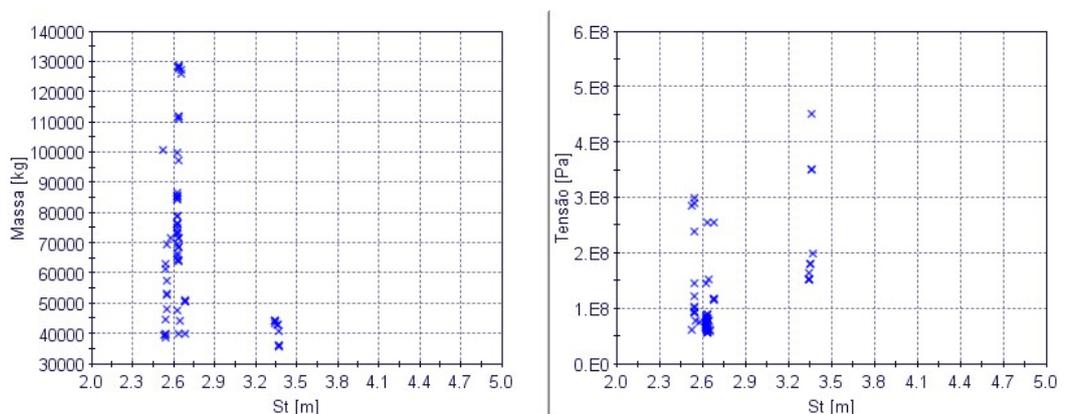
Fonte: Autor (2018).

Ao contrário do espaçamento entre pesados, o espaçamento entre transversais St , visto na Figura 34, é inversamente proporcional à massa e diretamente à tensão. Desta vez concordando com resultados apresentados no estudo analítico realizado por Muller (2016).

Na primeira, existem de fato uma região da fronteira de Pareto (baixa massa) onde o valor ótimo de St é de aproximadamente 3,7 m, enquanto que para regiões de alta massa, o valor ótimo de St é de aproximadamente 5,0 m. Outra possibilidade é que todas as soluções com St em torno de 5,0 m na verdade não conseguiram alcançar o valor ótimo global para esta variável que é 3,7 m, ficando presas em um ótimo local.

Outra conclusão que pode ser obtida consiste no fato de que o espaçamento ótimo entre longitudinais pesados está próximo do limite superior, enquanto que para os reforçadores transversais, se localiza próximo ao limite inferior da região viável.

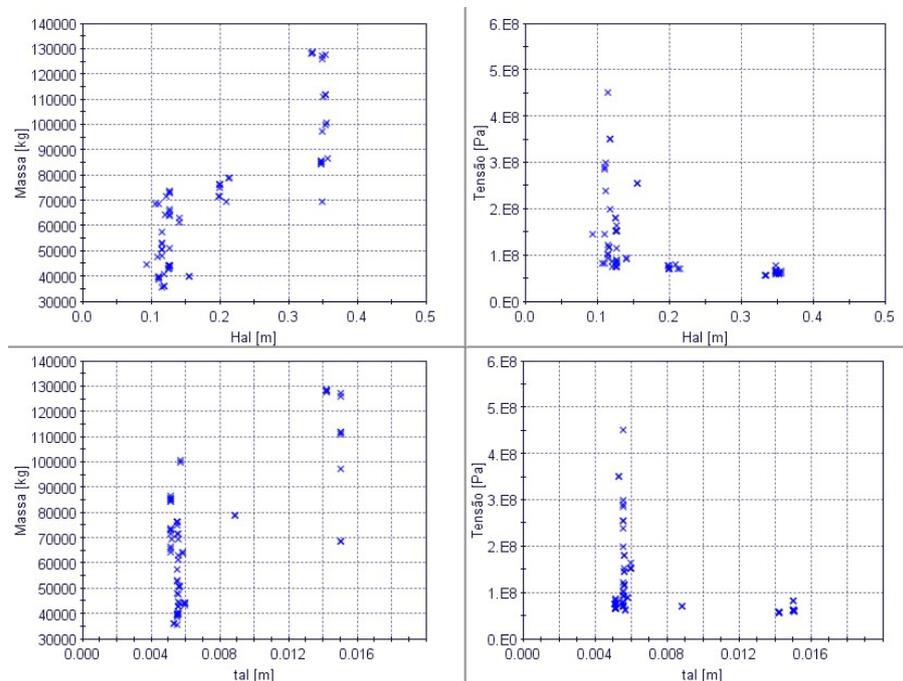
Figura 34 – Influência do espaçamento entre transversais "St" nos indivíduos de Pareto.



Fonte: Autor (2018).

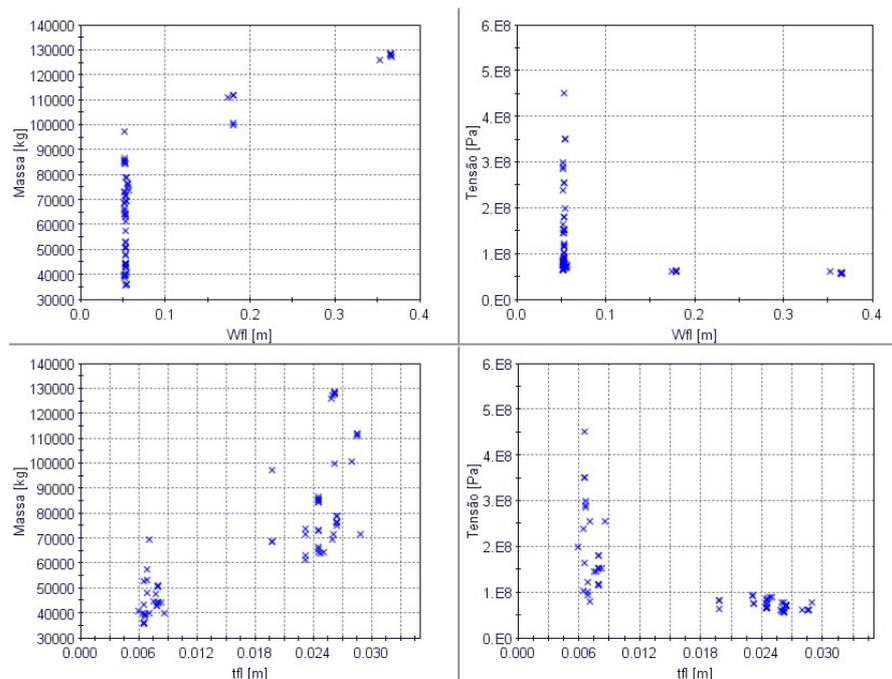
Em relação as dimensões do perfil leve longitudinal, a altura da alma tem comportamento diretamente proporcional com a massa, como esperado, e inversamente proporcional com a tensão. Esta variável aparentemente possui dois valores para onde as soluções de Pareto convergem. Amostras com massa inferior à 80 toneladas ficam no entorno de 0,1 e 0,2 metros, demonstrando flutuação no gráfico da tensão. Já as configurações mais robustas se aglomeram no valor de 0,35 metros, com pontos de tensão abaixo de 100 MPa. Comportamento similar pode ser observado em relação as demais dimensões desse reforçador, conforme pode ser visto na Figura 35.

Figura 35 – Influência das dimensões da alma do reforçador leve nos indivíduos de Pareto.



Fonte: Autor (2018).

Figura 36 – Influência das dimensões do flange do reforçador leve nos indivíduos de Pareto.



Fonte: Autor (2018).

Para os perfis pesados, a aglomeração de indivíduos ocorre na região inferior, em torno de 0,6 m, e apresentam uma massa que varia entre 30 e 80 toneladas. Como outras variáveis já apresentadas, estes indivíduos próximos ao limite inferior apresentam boa flutuação no gráfico de tensão. Já, os indivíduos ótimos que apresentam o valor em torno de 1,2 m, têm sua massa variando entre 70 e 130 toneladas e tensão abaixo dos 100 MPa.

Entre os três reforçadores, os transversais se mostraram os mais robustos, com altura da alma ótima tipicamente em torno de 1,4 m.

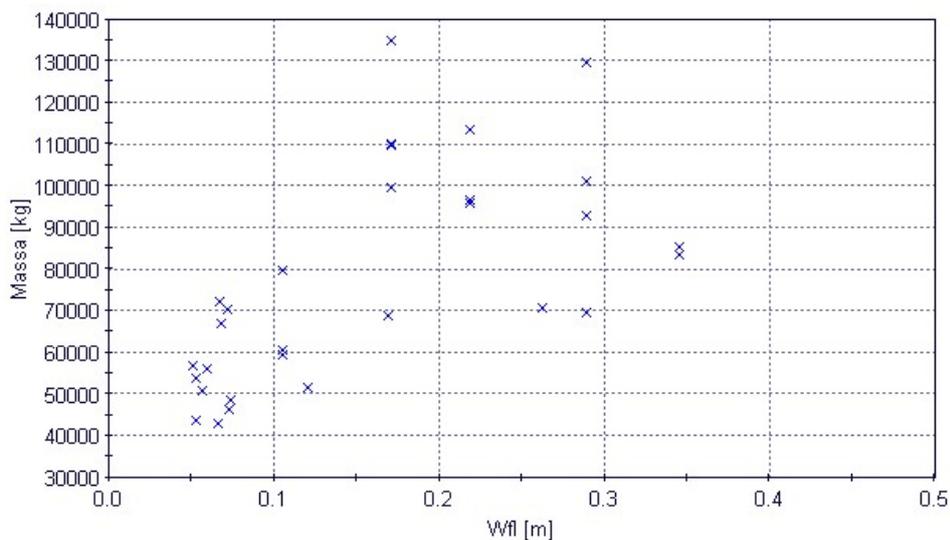
Com relação a inércia da seção transversal de um reforçador, existe um termo que é elevado ao cubo. Este termo refere-se a dimensão que é ortogonal ao eixo de flexão, e que neste caso corresponde à altura da alma. Isto indica que, qualquer modificação nessa variável, pode influenciar fortemente a resistência a flexão do painel. É o que se observa nos gráficos referentes a alma dos reforçadores, onde os indivíduos de menor tensão geralmente possuem um alto valor de altura da alma.

Anteriormente foi investigado se uma otimização com maior porcentagem de DOE resultaria em uma melhor distribuição de valores nos intervalos. Esta afirmação pode ser confirmada através de outra verificação.

Analisando-se a largura do flange do reforçador leve (Figura 36) observa-se que, no caso de um DOE de 5% verifica-se a convergência desta variável para alguns valores fixos, enquanto que no caso do DOE de 20%, verifica-se uma boa dispersão dessa variável ao longo da região viável, conforme pode ser visto na Figura 37.

Esse comportamento indica que, potencialmente, um maior DOE tende mesmo a gerar uma maior variabilidade genética, produzindo uma melhor distribuição dos indivíduos ao longo da região viável.

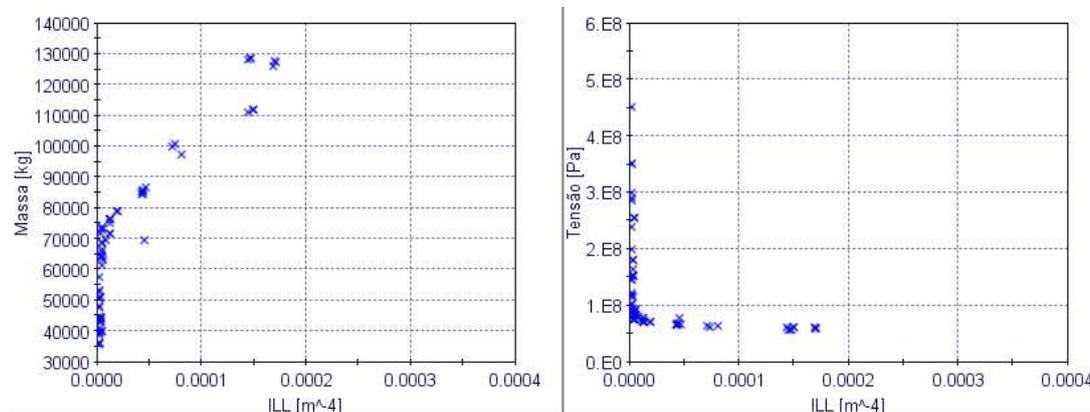
Figura 37 – Influência de Wfl na massa contabilizando ótimos de Pareto e DOE de 20%.



Fonte: Autor (2018).

Os gráficos analisando a influência da inércia de um reforçador com os objetivos do problema são os que melhor evidenciam a relação direta com a massa e inversa com tensão, pois dentro da inércia de um reforçador estão sintetizadas todas as outras variáveis, como alturas e espessuras de alma e flange. O mesmo comportamento é observado para os 3 tipos de reforçadores, e é exemplificado pela análise do reforçador leve mostrada na Figura 38.

Figura 38 – Influência da inércia de seção transversal do reforçador leve nos indivíduos de Pareto.



Fonte: Autor (2018).

Como o comportamento das variáveis geralmente tendeu a um valor apenas, a Tabela 9 sintetiza quais foram estas tendências em cada uma das variáveis.

Tabela 9 – Valores ótimos locais das variáveis de decisão.

Variável	Valores comuns nos indivíduos de Pareto
1,8 [m] < Slp < 5,5 [m]	3,7 [m] e 5 [m]
0,5 [m] < Sll < 1 [m]	0,66 [m]
2,5 [m] < St < 5 [m]	2,6 [m]
15 [mm] < tc < 25 [mm]	15 [mm] e 22 [mm]
500 [mm] < Hap < 1400 [mm]	600 [mm] 1180 [mm]
300 [mm] < Wfp < 1000 [mm]	420 [mm]
10 [mm] < tap < 40 [mm]	14 [mm]
10 [mm] < tfp < 50 [mm]	10 [mm] e 50 [mm]
85 [mm] < Hal < 500 [mm]	120 [mm] e 350 [mm]
50 [mm] < Wfl < 400 [mm]	50 [mm]
5 [mm] < tal < 25 [mm]	6 [mm]
5 [mm] < tfl < 35 [mm]	[-]
500 [mm] < Hat < 1400 [mm]	1400 [mm]
300 [mm] < Wft < 1000 [mm]	350 [mm]
10 [mm] < tat < 40 [mm]	16 [mm] e 25 [mm]
10 [mm] < tft < 50 [mm]	30 [mm]

Fonte: Autor (2018).

5.3 Otimização mono objetivo

Até o presente momento apresentou-se diferentes estudos de otimização realizados a partir do mesmo modelo de otimização multiobjetivo, o qual busca, a um só tempo, minimizar a massa do painel e minimizar tensão presente na estrutura.

No entanto, a melhor maneira de se identificar os “verdadeiros”⁶ limites da Fronteira de Pareto consiste em se analisar cada objetivo individualmente. Assim, nesta seção serão apresentados os resultados referentes aos processos de otimização mono objetivo realizados visando identificar os extremos da Fronteira de Pareto.

⁶ A palavra verdadeiros deve ser usada com cuidado, pois nem mesmo um processo de otimização mono objetivo é capaz de assegurar categoricamente que o procedimento realizado determinou o ótimo global de um problema de otimização. No entanto, na maioria dos casos, um algoritmo robusto de otimização mono objetivo tem uma maior probabilidade de identificar um ótimo global do que um procedimento multiobjetivo.

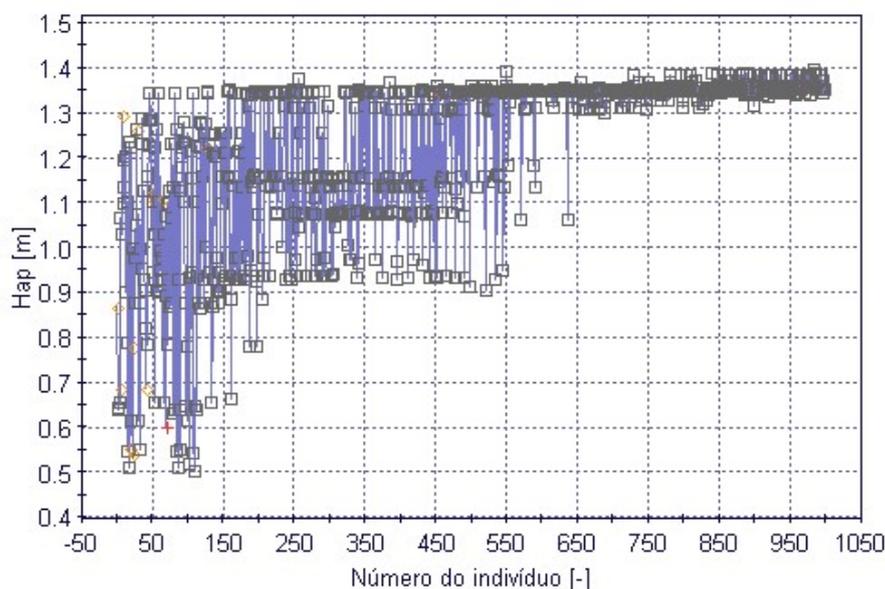
Apenas para manter o padrão estabelecido nos estudos de caso, os processos de otimização mono objetivo utilizaram o mesmo algoritmo NSGAI com um total de análises limitado a 1000 indivíduos, dos quais 5% compuseram o DOE, o qual por sua vez, defini a população inicial a ser utilizada no processo.

Em otimizações mono objetivo não ocorre o balanço entre as funções objetivo. Portanto, na otimização associada à minimização da tensão, são esperados painéis volumosos, onde as variáveis de decisão sempre tendem ao limite superior do intervalo. Pois quanto mais robusto o painel, menor o efeito da pressão na estrutura, gerando menores tensões. De maneira análoga, no caso da minimização da massa do painel estrutural, espera-se que as variáveis tendam a se aproximar do limite inferior.

Para exemplificar esse comportamento, nas Figuras 39 e 40 é mostrado o comportamento da variável altura da alma do reforçador pesado (H_{ap}) ao longo do processo de otimização visando a minimização da tensão (Figura 39) e visando a minimização da massa (Figura 40).

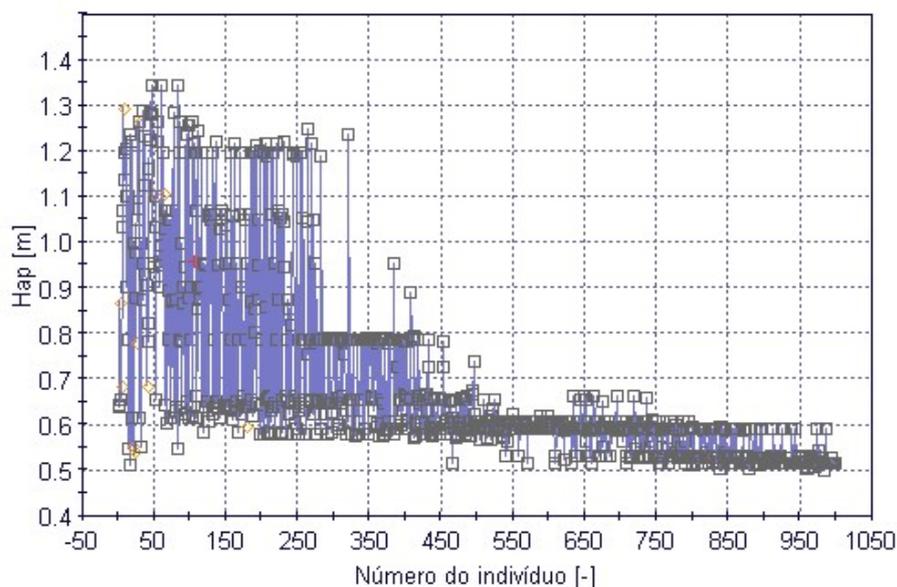
O intervalo delimitado pela região viável estabelecida para a altura da alma do reforçador longitudinal pesado varia entre 0,5 m e 1,4 m. Claramente pode ser visto que na Figura 39 a variável tende ao limite superior, enquanto que na Figura 40 esta mesma variável converge para o limite inferior, tal qual previsto conceitualmente.

Figura 39 – Comportamento da variável H_{ap} durante a otimização da tensão.



Fonte: Autor (2018).

Figura 40 – Comportamento da variável *Hap* durante a otimização da massa.



Fonte: Autor (2018).

O mesmo comportamento poderia ser observado analisando-se as demais variáveis de decisão. No entanto, a favor da concisão, tal análise é suprimida do trabalho.

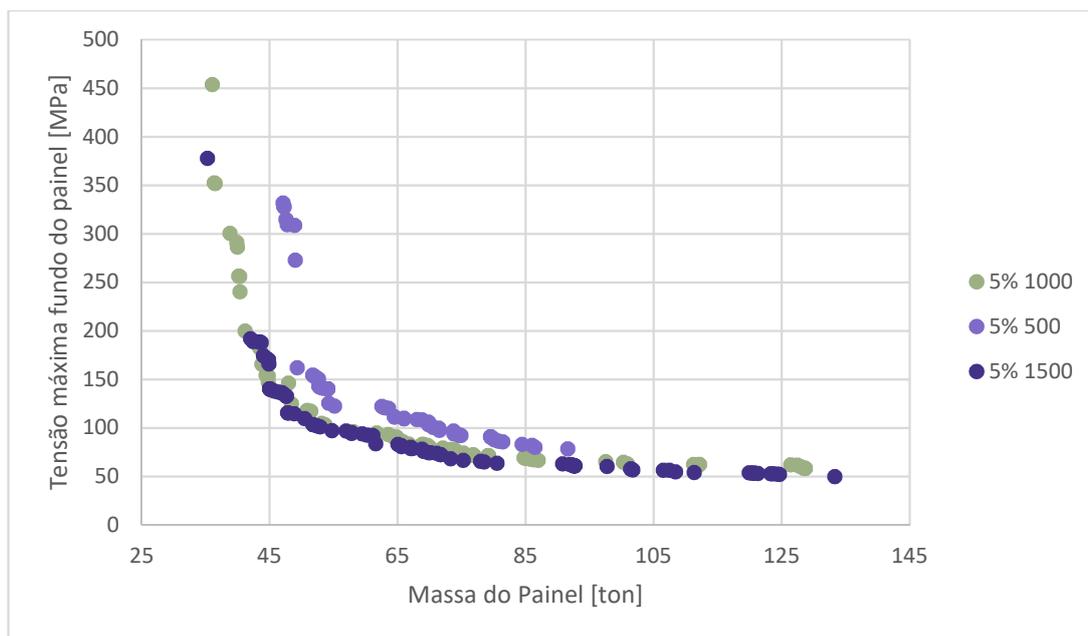
Nas otimizações mono objetivo serão encontrados dois resultados ótimos apenas. Um para a tensão e outro para a massa, os quais correspondem aos limites das fronteiras de Pareto mostradas anteriormente.

Em adição à demonstração dos extremos da fronteira, este tópico abrangerá uma comparação entre fronteiras com diferentes números de indivíduos, 500, 1000 e 1500. Com DOEs respectivos de 5%, pois foi a fronteira que se apresentou mais promissora. A Figura 41 demonstra as 3 diferentes curvas.

Esta comparação será levantada para verificar a convergência da otimização. Pode ser visto que existe um espaçamento maior nas curvas que compreendem o total de 500 e 1000. O que quer dizer que 1000 indivíduos é uma boa aproximação para a Fronteira. Quando foram utilizadas 1500 análises, a curva ficou externa àquela de 1000, porém não suficiente para justificar o custo computacional.

Vale salientar que o total de 1000 análises apresentou maior variação nos eixos do que a análise com 1500.

Figura 41 – Comparação entre fronteiras de Pareto com diferentes totais.



Fonte: Autor (2018).

Os resultados obtidos nos dois processos de otimização monobjetivo realizados são apresentados na Tabela 10.

Para realizar a comparação entre os resultados obtidos nos processos de otimização mono objetivo com aqueles obtidos no processo de otimização multiobjetivo descrito na seção anterior, realizou-se a comparação gráfica. Comparação entre as soluções ótimas monobjetivo e as soluções presentes na Fronteira de Pareto definida no procedimento de otimização multiobjectivo. Foi limitado a 1000 análises com DOE composto por 5% desse total e cujos indivíduos foram gerados aleatoriamente.

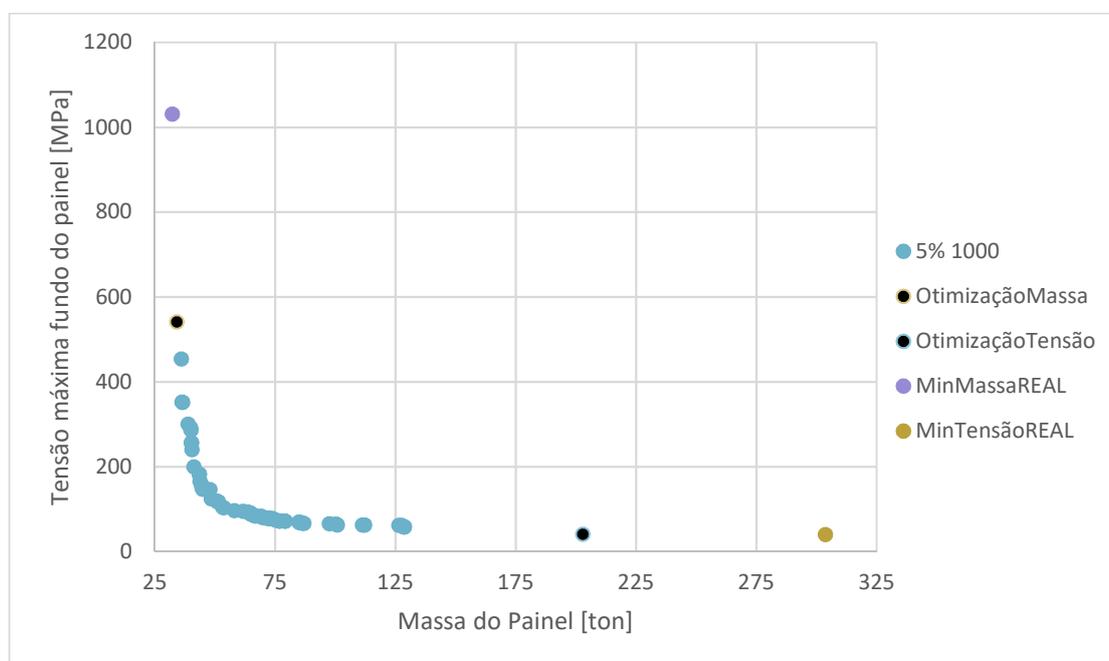
Os limites encontrados para as fronteiras são mostrados na Figura 42. Observa-se que a solução monobjetivo que minimiza a tensão se localiza bem afastada das demais soluções presentes na Fronteira de Pareto multiobjetivo. O mesmo não ocorreu com a solução mono objetivo que minimiza a massa, a qual se encontra bem próxima de algumas soluções presentes na Fronteira de Pareto multiobjectivo.

Adicionalmente, realizou-se mais duas outras análises referentes a diferentes topologias do painel estrutural. Observando-se que as variáveis de decisão se dividem entre espaçamentos e dimensões dos elementos estruturais que compõem a topologia do painel, buscou-se as geometrias de maior e menor massa possíveis.

Primeiramente foi considerado o valor de todas dimensões das variáveis de decisão estivessem definidas no limite superior da região viável, enquanto os espaçamentos foram definidos para o limite inferior da região viável. Neste caso, obtém-se o painel mais rígido possível, portanto, o painel de menor tensão presente na estrutura, o qual foi denominado “*MinTensãoREAL*”.

A seguir, realizou-se o inverso, definido as dimensões para o menor valor da região viável, enquanto os espaçamentos foram definidos para os maiores valores permitidos na região viável. Neste caso, obtém-se o painel com a menor massa possível, o qual foi denominado de “*MinMassaREAL*”.

Figura 42 – Limites das fronteiras de Pareto.



Fonte: Autor (2018).

É importante observar que tanto no caso do painel “*MinMassaREAL*”, quanto no caso do painel “*MinTensãoREAL*”, as topologias respeitam a restrição referente a relação entre o momento de inércia da seção do reforçador longitudinal leve e o momento de inércia da seção do reforçador longitudinal pesado. Que são saídas diretas do programa e foram avaliadas.

Por fim, os dados referentes a geometria e desempenho das soluções mostradas na Figura 42, são sintetizados na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação de resultados.

	Máximo real	Mínimo real	Máximo Otim. Mono	Mínimo Otim. Mono	Máximo Otim. Multi	Mínimo Otim. Multi
Tensão [MPa]	1031	40,48	541,6	40,76	454,0	58,30
Massa [t]	303,6	32,24	202,8	34,12	129,0	36,00

Fonte: Autor (2018).

5.4 Validação da característica multimodal

Uma importante análise a ser realizada em qualquer problema de otimização diz respeito a multimodalidade da solução.

Um problema possui a característica multimodal quando existem mais de uma combinação de variáveis que resultem em objetivos efetivamente idênticos. Essa análise é importante pois durante os processos de otimização foram observadas diferentes configurações de painéis que apresentavam tensões e massas muito próximas.

Muller (2016) já provou que o caso de um painel estrutural analisado analiticamente é um problema multimodal. Esta confirmação foi obtida após o autor utilizar um refino nas otimizações iniciais. Neste procedimento foi restringido ainda mais o intervalo das variáveis, fazendo com que mais soluções apresentassem massa e tensão parecidas. Este mesmo procedimento de restrição será aplicado ao estudo numérico, e os resultados são apresentados nesta seção.

Observa-se que, caso diferentes geometrias de painéis realmente apresentem as mesmas magnitudes nos objetivos, é preciso determinar como será feita a escolha entre uma ou outra geometria.

Por exemplo, supondo-se que existam dois painéis de massa e tensão iguais, ambos respeitando o limite com que se quer trabalhar, é impossível realizar uma escolha objetiva entre um e outro, pois de fato não há um melhor. A seleção deveria então recorrer a argumentos subjetivos ou então a critérios ainda não considerados na construção do modelo de síntese.

Para realizar o processo de refino proposto por Muller (2016), será utilizado a simulação considerada ideal, com um total de 500 indivíduos e 5% de DOE. A figura 43 apresenta o conjunto de indivíduos viáveis analisados durante este processo de otimização.

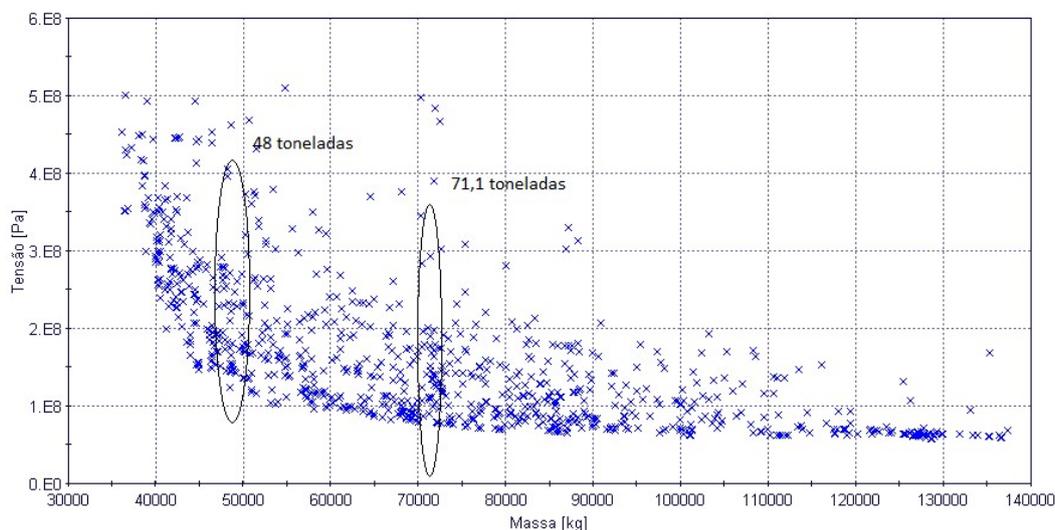
É interessante notar que, mesmo esta otimização não refinada, com intervalos amplamente espaçados, já apresentou painéis equivalentes, sinalizando a presença de um potencial caráter multimodal na solução.

No entanto, para prosseguir a análise, é preciso encontrar regiões neste gráfico onde os indivíduos apresentem objetivos muito próximos. Assim pode-se utilizar o valor mínimo e máximo de cada variável de decisão para gerar um novo intervalo, analisando sempre o conjunto de indivíduos próximos.

Com isto, a nova otimização refinada irá gerar ainda mais indivíduos com desempenho similar, e é em cima desses indivíduos que será feita a análise se painéis com mesma tensão e massa podem apresentar configurações relativamente diferentes.

Observando a Figura 43 é interessante realizar o estudo em regiões diferentes da Fronteira de Pareto. Usando critérios arbitrários, selecionou-se regiões buscando caracterizar o começo, meio e fim desta fronteira. Assim, com base nos resultados obtidos, pode-se dizer que qualquer configuração na fronteira apresenta a característica multimodal.

Figura 43 – Regiões da Fronteira escolhidas para refino.



Fonte: Autor (2018).

Para o primeiro refino, foi utilizado uma faixa de massa, variando entre 48 e 49 toneladas. Foram utilizados 10 arranjos de base para refinamento. Obviamente foram retirados indivíduos com tensões distintas. A Tabela 11 mostra a respectiva

massa e tensão destes indivíduos. No apêndice E são apresentadas todas as variáveis de decisão utilizadas neste novo intervalo.

Tabela 11 – Arranjos de base para refino de 48 toneladas.

Arranjo	Massa [ton]	Tensão [MPa]
1	48,14	183,15
2	48,29	233,69
3	48,34	146,85
4	48,39	124,72
5	48,48	143,96
6	48,57	144,43
7	48,63	180,86
8	48,69	155,25
9	48,71	152,81
10	48,82	147,42

Fonte: Autor (2018).

Tabela 12 – Intervalos de valores para as variáveis no refino de 48 toneladas.

Limite inferior	Variável	Limite superior
3,68 [m]	<i>Slp</i>	3,86 [m]
0,58 [m]	<i>Sll</i>	0,70 [m]
2,53 [m]	<i>St</i>	3,28 [m]
15 [mm]	<i>tc</i>	15 [mm]
591 [mm]	<i>Hap</i>	628 [mm]
389 [mm]	<i>Wfp</i>	468 [mm]
13 [mm]	<i>tap</i>	19 [mm]
10 [mm]	<i>tfp</i>	14 [mm]
108 [mm]	<i>Hal</i>	124 [mm]
51 [mm]	<i>Wfl</i>	65 [mm]
5 [mm]	<i>tal</i>	5 [mm]
6 [mm]	<i>tfl</i>	20 [mm]
1098 [mm]	<i>Hat</i>	1391 [mm]
336 [mm]	<i>Wft</i>	399 [mm]
14 [mm]	<i>tat</i>	16 [mm]
11 [mm]	<i>tft</i>	20 [mm]

Fonte: Autor (2018).

A otimização de refino foi realizada avaliando um total de 500 indivíduos e 5% de DOE. O intuito agora é demonstrar que estas otimizações geram configurações

diferentes para a mesma massa e não definir uma fronteira. Exatamente por isso que foi utilizado um total de indivíduos menor, buscando eficiência no processo computacional.

Na análise de Muller (2016), a escolha das amostras para refino considerou a análise de como ficariam os intervalos, buscando sempre minimizar o espaçamento inferior e superior. No estudo numérico foram selecionadas amostras aleatórias que apresentaram 48 toneladas, resultando em intervalos levemente maiores.

O refino gerou amostras com tamanho variado, entre 40 e 52 toneladas. Mesmo com este grande range de variação, foi possível encontrar 4 amostras com resultados de tensão similares e massas iguais até a segunda casa decimal. Estas amostras são detalhadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Configurações equivalentes após refino de 48 toneladas.

Arranjo	1	2	3	4
Slp [m]	3,7124	3,7483	3,8592	3,8486
St [m]	2,5513	2,5389	2,5344	2,5302
SII [m]	0,6524	0,6240	0,6446	0,6252
Hap [m]	0,6159	0,6055	0,6069	0,5976
tap [m]	0,0155	0,0159	0,0159	0,0147
Wfp [m]	0,4133	0,4598	0,4604	0,4084
tfp [m]	0,0135	0,0106	0,0106	0,0106
IP [m⁻⁴]	6,49E-04	6,01E-04	6,04E-04	5,30E-04
Hat [m]	1,1195	1,1535	1,2942	1,1933
tat [m]	0,0148	0,0143	0,0149	0,0149
Wft [m]	0,3480	0,3952	0,3960	0,3576
tft [m]	0,0155	0,0139	0,0176	0,0165
IT [m⁻⁴]	3,04E-03	3,24E-03	4,89E-03	3,73E-03
Hal [m]	0,1091	0,1199	0,1199	0,1105
tal [m]	0,0057	0,0056	0,0056	0,0055
Wfl [m]	0,0642	0,0610	0,0609	0,0526
tfl [m]	0,0149	0,0142	0,0137	0,0137
IL [m⁻⁴]	2,08E-06	2,53E-06	2,49E-06	1,90E-06
tc [m]	0,0155	0,0155	0,0155	0,0154
Massa [t]	48,67	48,67	48,67	48,67
Tensão [MPa]	147,62	137,90	134,12	130,82

Fonte: Autor (2018).

Ao compararmos o arranjo refinado 3 com o 4 pode-se observar massas idênticas e uma tensão bem próxima. No entanto, ao se verificar a inercia dos

reforçadores, constata-se que todos os reforçadores do arranjo 3 possuem inércia maior do que aqueles encontrados no arranjo 4. Em compensação, o espaçamento entre longitudinais leves do arranjo 3 é menor, fazendo com que caiba um reforçador a mais nesta configuração.

Esta discussão mostra que, enquanto o arranjo 3 limita no tamanho da seção transversal é compensado com um reforço a mais. Esta caracterização explica bem o significado de multimodal. Por exemplo, o comprimento total de solda no arranjo 3 é maior do que no 4. Desta forma, ao se analisar esses dois painéis de forma objetiva, visando economizar não só no material utilizado, mas no processo de construção, a solução ótima passa a ser o arranjo 4.

O mesmo procedimento de refino foi realizado para mais uma região diferente da Fronteira de Pareto, representadas por painéis de 71,1 toneladas. Tabelas e configurações são mostradas no apêndice E.

Com relação ao refino de 71,1 toneladas, comparando o arranjo 1 com o arranjo 2, o primeiro apresenta inércia do reforçador transversal inferior. No entanto, essa diminuição é compensada com a diminuição do espaçamento entre leves. Assim são apresentadas novamente 2 configurações diferentes gerando indivíduos com objetivos equivalentes, caracterizando (em definitivo) o caráter multimodal do problema.

5.5 Análise 3d de indivíduos ótimos em diferentes localidades de Pareto

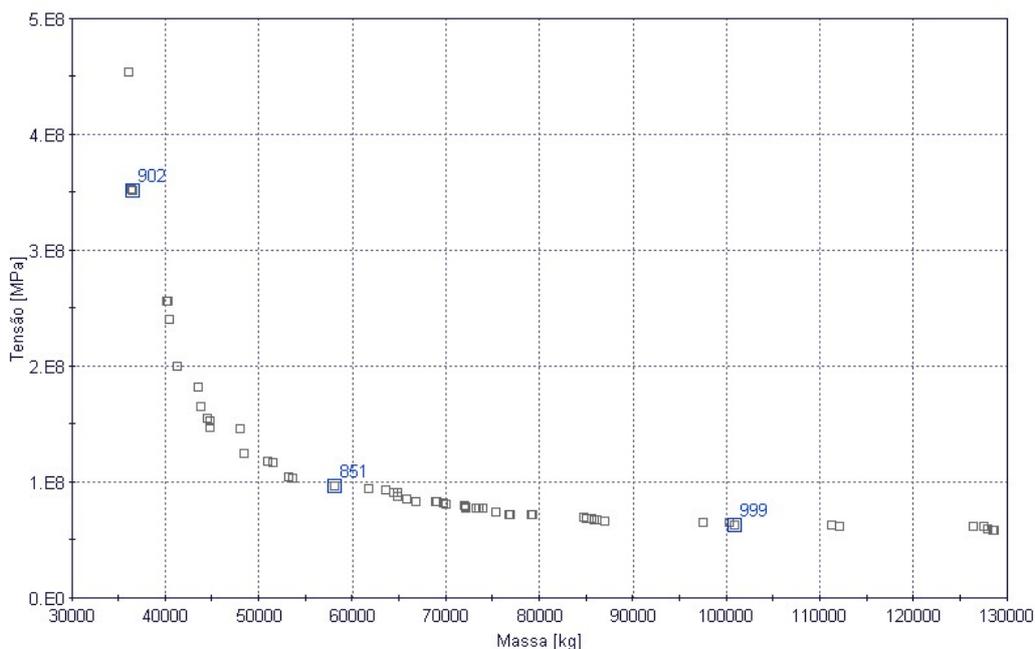
Algumas configurações otimizadas no estudo de 1000 indivíduos com 5% de DOE foram modeladas em 3d para melhor visualização. Essa representação é relevante para dar uma noção visual das diferentes configurações que os painéis apresentam ao longo da Fronteira de Pareto.

Para esta visualização foram escolhidas 3 soluções da fronteira, em 3 regiões diferentes, incluindo solução nas regiões dos extremos da fronteira e uma solução de massa mediana.

É importante destacar que uma vez comprovada a característica multimodal do problema, a análise apresentada nesta seção pode ser comprometida em virtude da existência de múltiplas soluções ótimas equivalentes para uma mesma região da Fronteira de Pareto.

Na Figura 44 são destacadas as soluções selecionadas para a modelagem tridimensional, cujas características são descritas no apêndice F, incluindo os valores das variáveis de decisão.

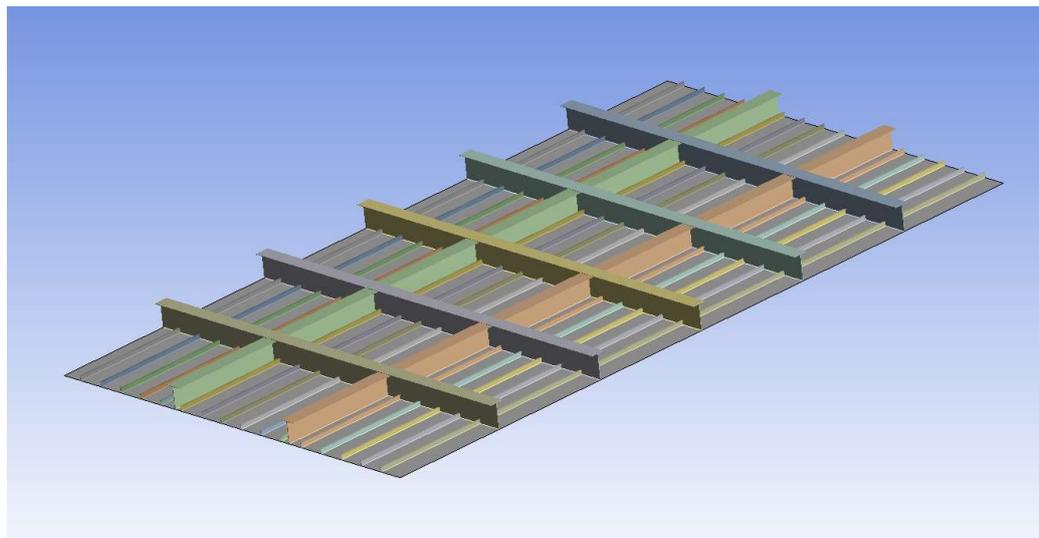
Figura 44 – Indivíduos pertencentes a fronteira para modelagem 3d.



Fonte: Autor (2018).

O arranjo que apresentou a menor massa (902) pode ser visto na Figura 45, onde observa-se que os reforços transversais e longitudinais pesados diferem levemente. Nota-se também a presença de apenas 2 longitudinais pesados (o mínimo permitido na região viável), e, por fim, a presença de 5 reforçadores transversais.

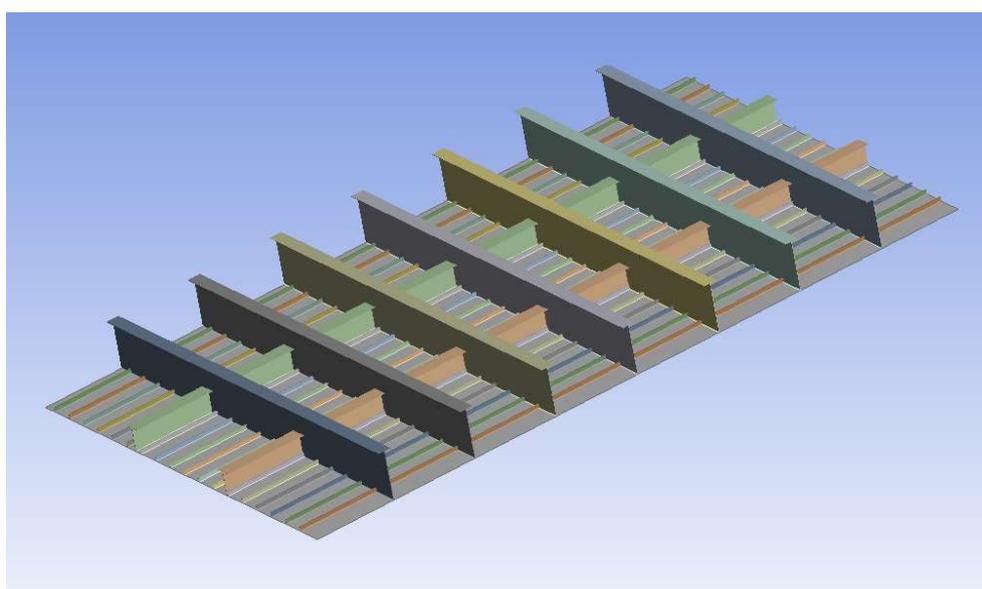
Figura 45 – Arranjo que representa os painéis levianos.



Fonte: Autor (2018).

A seguir analisa-se a solução de número 851, a qual destaca-se por apresentar reforçadores transversais robustos e menos espaçados, totalizando 7 reforçadores deste tipo (Figura 46). Não é possível observar diferença significativa nas seções dos reforçadores longitudinais pesados e leves em relação as seções vistas na solução 902. Entretanto, observa-se que a solução 851 possui mais reforçadores leves do que a solução 902.

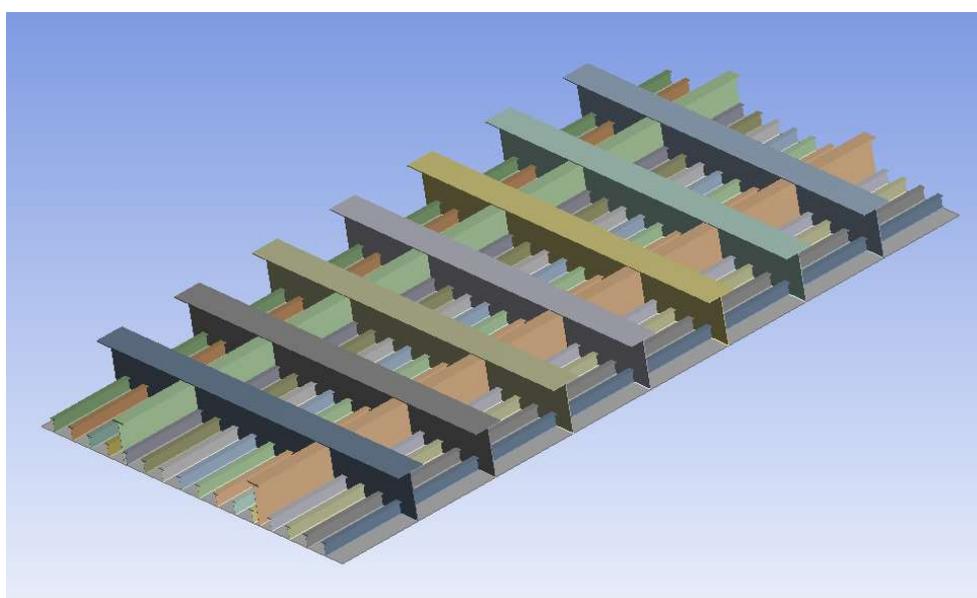
Figura 46 – Arranjo que representa os painéis de massa mediana.



Fonte: Autor (2018).

Por fim, analisa-se a solução referente a região da Fronteira de Pareto de maior massa (999), a qual é representada na Figura 47. Claramente observa-se uma tendência de dimensões dos reforçadores alcançarem os limites superiores da região viável, resultando em reforçadores transversais e longitudinais pesados com seções avantajadas. Nota-se que nesta solução, a modelagem permite ver com clareza a seção T referente aos longitudinais leves, indicando a maior rigidez de sua secção, quando comparada as duas soluções analisadas anteriormente.

Figura 47 – Arranjo que representa os painéis robustos.



Fonte: Autor (2018).

Portanto é possível fazer uma comparação entre a evolução da massa e das características do arranjo topológico da solução. Entre os dois primeiros arranjos, pode-se observar a diminuição do espaçamento entre reforçadores leves e entre reforçadores transversais. No entanto, entre o segundo e terceiro, houve apenas um aumento nas seções transversais sem que houvesse alteração significativa dos espaçamentos. Observa-se ainda, que todas as soluções analisadas possuem dois reforçadores longitudinais pesados, conforme já destacado na seção de influência das variáveis.

5.5.1 Comparação entre diferentes materiais

A partir dos resultados apresentados até o presente momento, pode-se analisar uma questão de extrema importância, que corresponde a determinar a influência do material no arranjo otimizado de um painel estrutural.

Através da Fronteira de Pareto mostrada na Figura 42 é possível verificar qual o arranjo ótimo para a construção de um painel considerando a fabricação utilizando diferentes materiais.

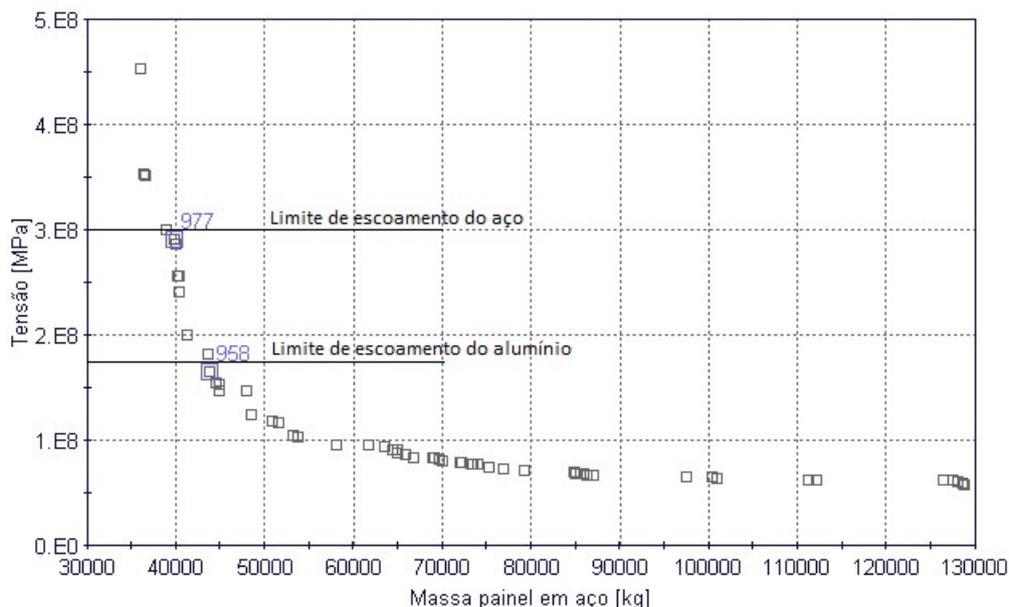
Inicialmente, o modelo paramétrico desenvolvido para a aplicação do método dos elementos finitos, utilizou as propriedades do aço A36, com limite de escoamento de 250 MPa e massa específica de 7,85 g/cm³.

O resultado referente a distribuição da tensão na estrutura não é afetado pela definição do material. No entanto, o cálculo da massa do painel é fortemente influenciado pela massa específica do material. Porém, sabe-se que a massa do painel corresponde a uma função linear da massa específica do material, e assim, os resultados podem ser facilmente corrigidos aplicando-se apenas um fator de conversão entre a massa específica do aço A36 e a massa específica do novo material a ser considerado.

Neste estudo, são comparados o arranjo otimizado de um painel estrutural considerando-se dois dos materiais mais utilizados em construção naval/náutica, o alumínio naval e o aço naval. Projetos utilizando aço naval, nos dias de hoje, apresentam o limite de escoamento em torno de 300 MPa.

Em relação ao alumínio, são utilizadas classes especiais para o setor naval com limite de escoamento em torno de 180 MPa e têmpera H34.

Figura 48 – Indivíduos selecionados para comparação aço e alumínio.



Fonte: Autor (2018).

A definição da geometria de um painel estrutural otimizado em função da escolha do material utilizado no processo de fabricação, inicia-se traçando as retas horizontais que estabelecem os limites de escoamento do aço e do alumínio no gráfico da Figura 48. O ponto no qual essas retas interceptam a Fronteira de Pareto definem o arranjo otimizado do painel para cada um dos materiais considerados.

Na análise mostrada na Figura 48, a reta horizontal que estabelece o limite de escoamento do aço define como solução para o projeto estrutural do painel a solução 977. Enquanto que a reta horizontal que estabelece o limite de escoamento do alumínio define a solução 958 como sendo aquela otimizada quando o painel é fabricado em alumínio. Os dados que descrevem as características de ambas as soluções são mostrados no apêndice G.

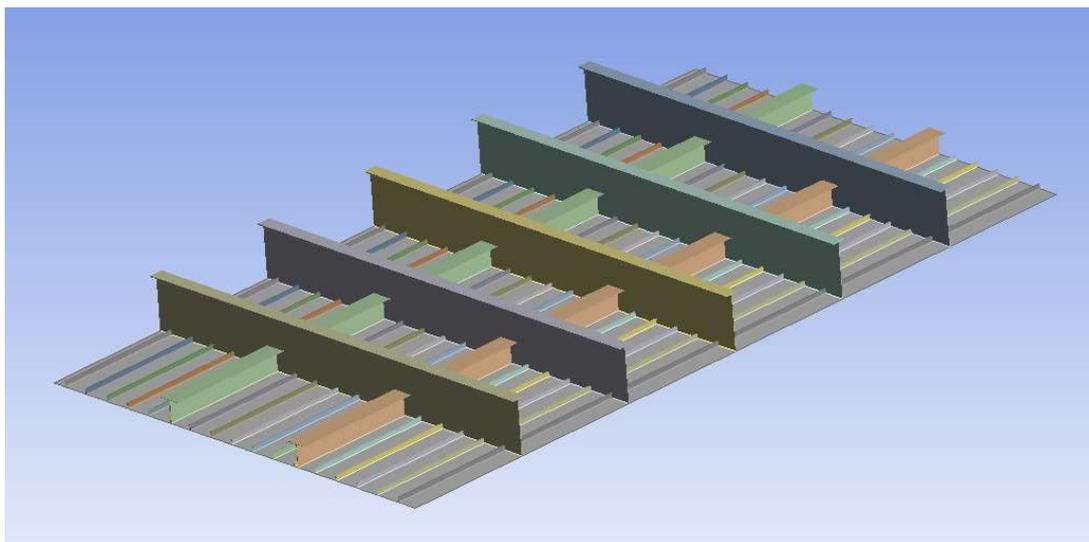
A solução otimizada para a fabricação em alumínio apresenta tensão de 165 MPa. Já a massa do painel deve ser determinada através da razão entre a massa específica do alumínio (2700 kg/m^3) e a massa específica do aço A36, resultando em um painel com cerca de 15 toneladas. Por outro lado, o painel otimizado para ser fabricado em aço possui 40 toneladas de massa e tensão de 292 MPa.

Utilizando uma comparação visual entre o modelo tridimensional correspondente ao painel otimizado para ser construído em alumínio (Figura 49) e aquele otimizado para ser construído em aço (Figura 50) observa-se que as

dimensões dos reforçadores transversais são maiores no caso do painel construído em alumínio.

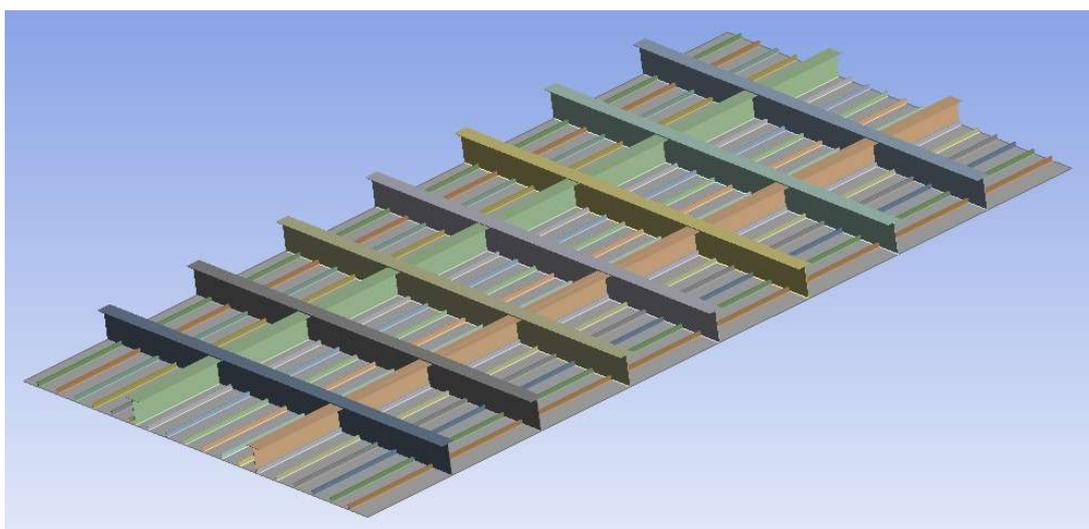
Por outro lado, no painel otimizado para ser construído em aço, observam-se espaçamentos menores, principalmente aquele referente aos reforços transversais.

Figura 49 – Painel com tensão equivalente limitada a tensão de escoamento do alumínio.



Fonte: Autor (2018).

Figura 50 – Painel com tensão equivalente limitada a tensão de escoamento do aço.



Fonte: Autor (2018).

5.6 Minimização do comprimento de solda

No caso de painéis estruturais, um fator fundamental no processo de tomada de decisão refere-se ao custo de fabricação de tais estruturas. Neste contexto o comprimento de solda necessário para a fabricação do painel pode se tornar um importante critério para a tomada de decisão.

Conforme foi demonstrado no capítulo anterior, o problema de minimização de massa e tensão é multimodal, resultando em soluções com geometrias distintas. Porém que apresentam os mesmos valores de massa e tensão. No entanto, diferentes configurações não requererem o mesmo comprimento de solda, motivando a análise cujos resultados são apresentados nesta secção.

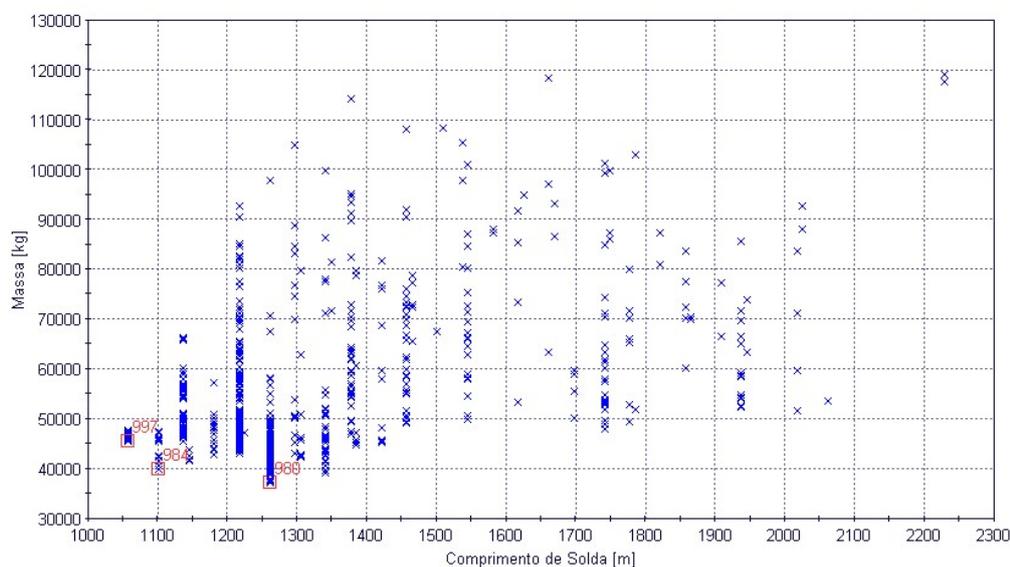
Assim, modifica-se o problema de otimização incluindo o comprimento de solda como uma função objetivo a ser minimizada, o qual é estimado considerando-se apenas o comprimento linear de todos os reforçadores existentes no painel estrutural.

Por fim, considerando que a análise de problemas com mais de 2 objetivos é difícil visualização e interpretação. Seguindo a estratégia descrita na fundamentação teórica, a função objetivo de minimizar a tensão foi convertida em uma restrição equivalente. No caso, considera-se que a máxima tensão presente no painel deverá ser inferior a 300 MPa.

Visando manter a padronização das análises, utilizou-se novamente o algoritmo genético NSGAI, com um total de 1000 análises e um DOE de 5% deste valor.

As soluções viáveis obtidas ao longo do processo de otimização descrito nesta secção são mostradas na Figura 51.

Figura 51 – Indivíduos de Pareto em uma otimização de minimizar o comprimento solda.



Fonte: Autor (2018).

Quando analisado o comprimento de solda, os únicos parâmetros do painel que afetam esse objetivo referem-se aos espaçamentos entre reforçadores. Pois, cada perfil, independente das dimensões da seção transversal, possui 4 cordões de solda, sendo dois na chapa e dois entre a alma e o flange.

Como as variáveis principais para essa otimização correspondem apenas aos espaçamentos entre reforçadores, as variáveis associadas às dimensões dos elementos estruturais passam a influenciarem apenas no objetivo referente a minimização da massa.

Uma vez que o comprimento dos painéis é modificado apenas quando se modifica o número de reforçadores, as soluções ótimas acontecem em intervalos discretos de espaçamentos, conforme pode ser visto na Figura 51.

Analisando-se os 3 indivíduos destacados na Figura 51, observa-se que na verdade existe uma única solução ótima para o problema.

Intuitivamente observa-se que a minimização do comprimento de solda corresponde a solução que maximiza os espaçamentos entre reforçadores. Assim, em se tratando de um problema multimodal, a maximização dos espaçamentos, pode ser compensada pelo aumento das dimensões referentes a secção dos reforçadores, obtendo um indivíduo que ao mesmo tempo minimiza a massa e o comprimento de

solda do painel. As características dessa solução ótima em comprimento de solda (indivíduo 997) são mostradas na Tabela 14.

Tabela 14 – Arranjo ótimo com relação ao comprimento de solda.

Arranjo ótimo	
Slp [m]	3,6892
St [m]	4,6155
SII [m]	0,9858
Hap [m]	0,6391
tap [m]	0,0200
Wfp [m]	0,4247
tfp [m]	0,0107
IP [m⁻⁴]	7,88E-04
Hat [m]	0,7966
tat [m]	0,0115
Wft [m]	0,3924
tft [m]	0,0239
IT [m⁻⁴]	1,26E-03
Hal [m]	0,2360
tal [m]	0,0056
Wfl [m]	0,0516
tfl [m]	0,0093
IL [m⁻⁴]	1,15E-05
tc [m]	0,0195
Massa [t]	45,56
Tensão [MPa]	288,03

Fonte: Autor (2018).

6 CONCLUSÃO

Apresentou-se neste trabalho o desenvolvimento de um procedimento que utiliza técnicas de otimização para determinar o conjunto de parâmetros ótimos que minimiza a massa e a tensão equivalente em um painel estrutural, cuja análise é realizada aplicando-se o método dos elementos finitos.

Inicialmente apresentou-se um breve contexto sobre o tema, destacando-se a importância que a eventual otimização de um painel estrutural possui, em especial para o setor da construção naval, definindo-se uma problemática a ser enfrentada.

A seguir foi introduzido o desenvolvimento de um modelo paramétrico que permite a geração automatizada e eficiente de diferentes geometrias de um típico painel de estruturas navais. Tanto como a aplicação do método dos elementos finitos para a determinação do campo de tensões atuantes na estrutura.

Uma vez construído o modelo paramétrico de representação de um painel estrutural composto por uma chapa fina reforçada por reforçadores longitudinais pesados, reforçadores longitudinais leves e reforçadores transversais, desenvolveu-se um procedimento que viabilizou a aplicação de técnicas de otimização (em especial o algoritmo NSGAI) ao modelo desenvolvido.

Por fim definiu-se quais seriam os parâmetros fixos do modelo (comprimento e largura do painel), as variáveis de decisão (Tabela 3), bem como os objetivos a serem minimizados (massa, tensão e comprimento de solda). Também as restrições a serem obedecidas (inércia do reforçador leve ao menos dez vezes menor que a inércia do reforçador pesado).

Motivado pelo trabalho de Muller (2016), realizou-se diversos estudos buscando uma combinação eficiente entre o tamanho da população inicial e o número de gerações. Verificou-se que uma otimização limitada a 1000 análises das quais 5% compõem o DOE representa um bom compromisso entre a qualidade da resposta e o custo computacional para realizar o processo.

Em seguida realizou-se o estudo do comportamento das variáveis de decisão ao longo da Fronteira de Pareto. Verificou-se facilmente que os objetivos são conflitantes e, portanto, quanto mais robusto o painel (mais massa), menor é a tensão atuante e vice-versa. Cada variável possui um comportamento diferente, no entanto, em diferentes casos houve acúmulo de soluções em valores discretos das variáveis.

Por exemplo, todos os painéis ótimos apresentaram apenas dois reforçadores longitudinais pesados.

A seguir, analisou-se que assim como havia sido verificado por Muller (2016), constatou-se que o problema analisado apresenta uma característica multimodal, ou seja, possui soluções com geometrias diferentes e que apresentam valores consideravelmente próximos para as funções objetivo.

Por fim verificou-se a importância de utilizar o comprimento de solda como terceiro critério para a seleção da geometria otimizada de um painel estrutural. No entanto, as características do modelo desenvolvido levaram a um não conflito entre os objetivos, resultando no fato de que existia uma única solução que minimizava o comprimento do cordão de solda e a massa da estrutura de um painel.

O estudo seguinte analisou a influência do material na topologia ótima do painel estrutural. Para isso determinou-se a geometria otimizada para um painel construído em aço, a qual foi comparada com a geometria otimizada para um painel construído em alumínio. Constatou-se que a geometria ótima de um painel pode sofrer mudanças significativas em função do material utilizado na construção.

Com relação a diferença de tensão apresentada pelos dois métodos, há de se levantar uma comparação entre painéis existentes para cada um. Quando é traçado a linha de 300 MPa nas duas curvas de Pareto observa-se que o painel ótimo analítico é um painel de massa mediana, enquanto a curva numérica é intersectada na região de Pareto onde estão os painéis mais leves. Então, os painéis equivalentes a esta tensão não são nem proporcionais entre os dois estudos. E devido a normas e seguradoras exigirem modelagens com normas de segurança baseado no analítico, os painéis existentes hoje são mais parecidos com o do caso analítico.

Para trabalhos futuros, indica-se principalmente estudar a fundo quais as fontes das diferenças de tensão observadas entre o método analítico e o método numérico. Recomenda-se também, investigar novos objetivos, como diferentes totais e porcentagens de DOE, além de aprofundar o modelo referente à consideração da solda, em especial a consideração de um o cordão de solda de forma volumétrica e não unidimensional.

REFERÊNCIAS

ANSYS Inc., **ANSYS 16.0 Theory Reference**, Cap. 14 – Element Library (1999).

AUGUSTO, Oscar Brito. **Análise Estrutural de Navios**. 2004. 146 f. Apostila / Graduação - Curso de Engenharia Naval, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

BATHE, Klaus-jurgen. **Finite Element Procedures**. Cambridge: Prentice Hall, Pearson Education, Inc., 2014.

BROWN, Robert; DALEY, Claude. **Computer Simulation of Transverse Ship-Ice Collisions**. St. John's: National Research Council Of Canada, 1999. 75 p.

BULLETIN, Maritime. **Vale Beijing Update**. Disponível em: <<http://www.odin.tc/news/read.asp?articleID=280>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

BURGOS, Diego Felipe Sarzosa. **Técnica de Otimização Multiobjetivo Aplicada ao Projeto Preliminar de Navios Petroleiros**. 2008. 242 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Naval, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CHAVES, V. T. ; TANCREDI, T. P. ; ANDRADE, B. L. R. . **Optimal structural design of small ships with response surface**. In: 15th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean, 2013, La Coruña. Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources, 2013. v. 1. p. 297-307.

CINTRA, R. **Maersk lança o maior containero do mundo e deixa a MOL para trás**, 2017. Disponível em: <https://www.portalmaritimo.com/2017/04/25/maersk-lanca-o-maior-containero-do-mundo-e-deixa-mol-para-tras/>. Acesso em: 04 maio. 2017.

DEB, Kalyan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions On Evolutionary Computation**. Kowloon, Hong Kong, p. 182-197. maio 2002.

HUGHES, Owen F.; PAIK, Jeom Kee. **Ship Structural Analysis and Design**. Jersey City: The Society Of Naval Architects And Marine Engineers, 2010.

KOPETSKI, Jeniffer Fernanda. **AVALIAÇÃO DA DEFLEXÃO DA ESTRUTURA TERCIÁRIA NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA EMBARCAÇÃO DE ALTA VELOCIDADE**. 2017. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

LAMB, Thomas. **Ship Design and Construction**. Jersey City: Society Of Naval Architects And Marine Engineers, 2003.

LEWIS, Edward V. **Principles of Naval Architecture**. Jersey City: The Society Of Naval Architects And Marine Engineers, 1988. 310 p.

LOVETT, Tim. **Wave Yawing and Broaching Action**. Maio 2005. Disponível em: <http://worldwideflood.com/ark/anti_broaching/wave_yaw.htm> Acesso em 15 jun 2017.

LUCAS, Diogo. **Algoritmos Genéticos: Uma Introdução**. 2002. 48 f. Apostila / Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MAHEN, Mahendram. Applications of Finite Element Analysis in Structural Engineering. **Proceedings International Conference On Computer Aided Engineering**. Chennai, p. 38-46. 2007.

MULLER, Vitor Hugo Benevenuto. **Otimização Paramétrica Multiobjetivo do Painel Estrutural de uma Embarcação Mercante**. 2016. 89 f. Tese (TCC) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

OROZCO, Juan Carlos Galindo. **Contribuição ao Estudo de Painéis Reforçados: Comparação entre o Método da Chapa Ortotrópica e o Método dos Elementos Finitos**. 2009. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PARSONS, Michael G.. **Applications of Optimization in Early Stage Ship Design**. 5. ed. Cartagena: Ship Science and Technology, 2009. 24 p.

RADE, Domingos Alves. **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADOS A ENGENHARIA MECÂNICA**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

RAO, Singiresu S.. **Engineering Optimization: Theory and Practice**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2009.

RIGO; CAPRACE. **Optimization of Ship Structures**. University of Liege, 2011.

SCHOOFS, A. J. G.. **Experimental Design and Structural Optimization**. Eindhoven: Sname, 1987. 141 p.

SILVA, E. C. N., Eric Charles. **Otimização Aplicada ao projeto de sistemas mecânicos**. Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Universidade de São Paulo, 2007.

TAGGART, Robert et al. (Ed.). **Ship design and construction**. 2. ed. New York: Sname, 1980.

TANCREDI, Thiago Pontin. **Otimização Multidisciplinar Distribuída Aplicada a Projetos de Engenharia**. 2008. 190 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

TUPPER, Eric Charles. **Introduction to naval architecture**. 4. ed. Oxford: Elsevier, 2004.

ZIENKIEWICZ, O. C. **The finite element method. V.1. Basic Formulation and Linear Problems.** McGraw-Hill International, 1994. p.648.

APÊNDICE A – Estrutura primária

A estrutura primária é denominada de viga navio, e para geometrias usuais de embarcações, pode ser considerado como uma viga caixão.

As cargas relevantes nessa análise são advindas da distribuição de peso e flutuação ao longo do comprimento do navio. O processo de integração destas cargas define as forças cortantes e momentos fletores atuantes ao longo do comprimento.

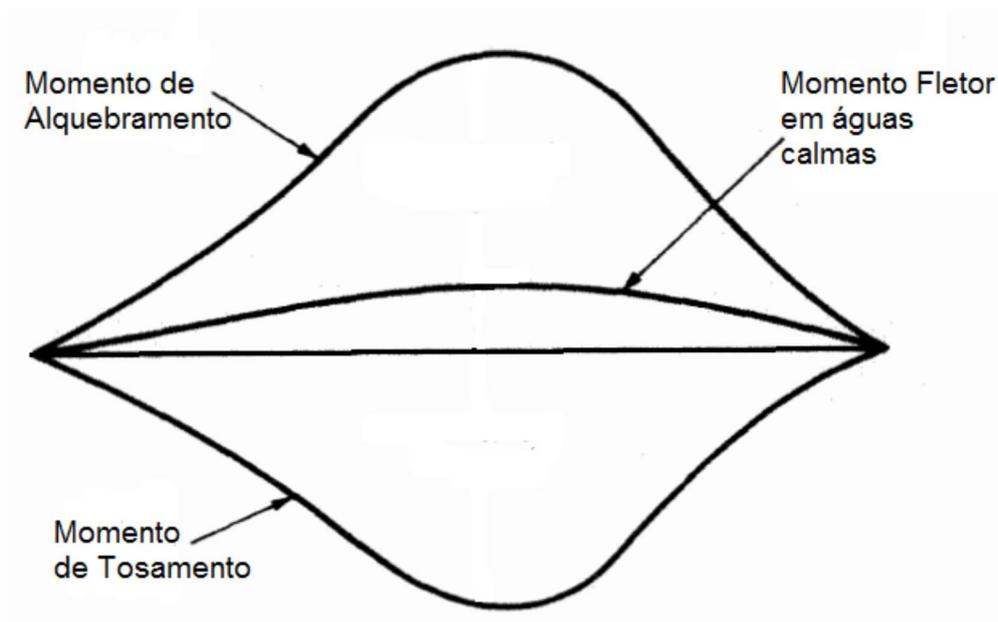
Por fim, a resposta estrutural da viga à esses esforços determinam as tensões e deflexões primárias. Orozco (2009) cita algumas hipóteses que fazem com que o problema de análise primária possa ser simplificado:

- A viga é prismática, não possui seções abertas ou descontinuidades em nenhuma localidade;
- As seções transversais não deformam em seu próprio plano, ou seja, continuam ortogonais ao eixo neutro;
- Possui modo de elasticidade constante ao longo de todo o comprimento;
- Possui material isotrópico, apresentando o mesmo módulo de elasticidade para tração e compressão;
- Efeito Poisson desconsiderado;
- As respostas da viga há ação da força cortante são desacopladas das respostas a flexão.

É importante observar que a distribuição das forças decorrentes da flutuação do casco depende da forma da onda que está sendo analisada, modificando a distribuição de momentos ao longo do navio. (LOVETT, 2005).

Uma representação geral de diferentes diagramas de momento fletor é mostrada na figura A 1, onde pode ser observado parcelas situações de mar calmo, alquebramento e tosamento.

Figura A 1 – Momento em diferentes situações.



Fonte: Adaptado de Tupper (1996, p. 130).

É interessante observar a situação de mar calmo sempre gera uma solicitação intermediária entre a solicitação provocada pelo instante de tosamento e o instante de alquebramento. Esse fenômeno decorre do fato de que mesmo em mar calmo, a distribuição de massa a bordo de um navio, naturalmente provoca uma tendência de alquebrar ou tosar (figura A 2). Assim, a passagem da onda ora provoca o alívio, ora provoca a amplificação dessa tendência natural do casco.

Figura A 2 – Ondas de alquebramento e tosamento.

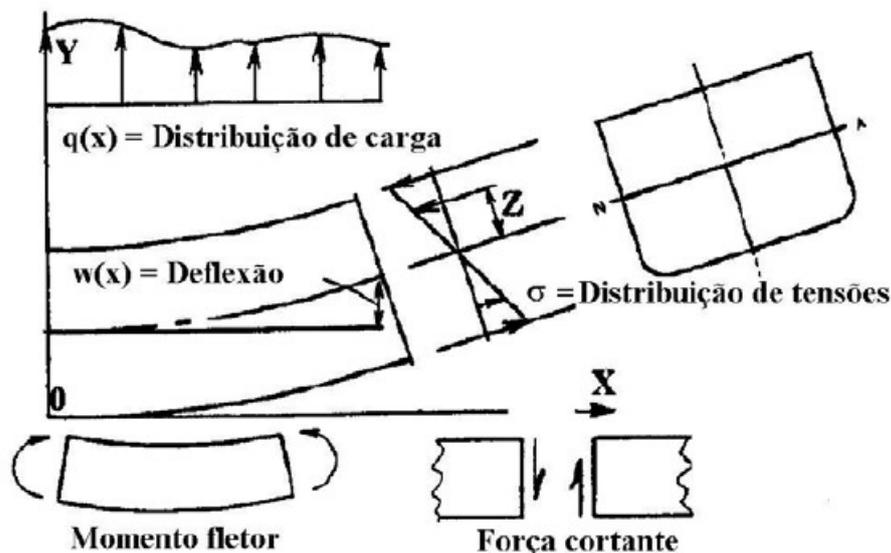


Fonte: Adaptado de Augusto (2007, p. 3).

Além da magnitude do momento, para calcular a tensão primária referente a seção de estudo, é preciso calcular a altura da linha neutra da seção do navio, assim como seu momento de inércia. Em geral, em uma primeira abordagem, essa análise é feita apenas para a seção de maior momento fletor, a qual é chamada de seção mestra estrutural.

Na figura A 3 é mostrado um fluxograma que sintetiza o processo para cálculo das tensões primárias.

Figura A 3 – Respostas primárias da viga navio.



Fonte: OROZCO (2009, p. 29).

O exemplo acima mostra uma viga que está tosando, ou seja, na seção mestra a razão entre magnitudes de peso e flutuação é maior do que nas extremidades. Vale salientar que a magnitude da tensão, assim como sua direção (tração ou compressão), variam conforme a altura do ponto analisado, podendo ser calculada pela equação 1.

$$\sigma = \frac{M(x) \cdot (Z_p - Z_{LN})}{I_{LN}} \quad (\text{Equação A 1})$$

Onde:

$M(x)$ é o momento em determinado ponto longitudinal da viga;

Z_p equivale a altura do ponto analisado;

Z_{LN} remete à altura da linha neutra da seção transversal da embarcação;

I_{LN} refere-se a inércia de área da seção em relação a linha neutra.

Destaca-se que a contribuição dos esforços primários não será avaliada neste trabalho. Entretanto, como o estudo é realizado do macro para o micro, é fundamental para o entendimento dos tópicos consequentes.

APÊNDICE B – Algoritmos genéticos

O processo de evolução baseia-se na aplicação de operadores genéticos de seleção, mutação e cruzamento. De acordo com Burgo (2008), é necessário definir alguns termos comumente empregados em AGs:

- Cromossomo: intervalo de valores das variáveis de decisão;
- Gene: unidade básica do cromossomo, controla certa característica do problema, ou seja, define o valor de uma variável;
- População: conjunto de cromossomos;
- Gerações: número de iterações;
- Operadores genéticos: operações a serem realizadas em cima de um cromossomo;
- Função aptidão: medida de desempenho do cromossomo;

Lucas (2002) utiliza-se de um fluxograma (figura B 1) que exemplifica de maneira ordenada o funcionamento da seleção natural, e por consequência, um código de síntese baseado na teoria evolutiva.

Figura B 1 – Sequência de algoritmos evolutivos.



Fonte: Lucas (2002, p. 6).

A população inicial remete aos indivíduos que irão dar início a todo o processo. Usualmente é feita a utilização de funções aleatórias para gerar os indivíduos, buscando diversidade. Há ainda funções heurísticas que buscam uma das características desejadas para estar presente na população inicial. O que de certa forma acelera o processo de convergência da otimização.

Na avaliação os indivíduos são recebidos um certo grau de adaptação. Nesta fase do sequenciamento deve ser verificado o quão apto um indivíduo é para sobreviver e se reproduzir. A função de avaliação é definida a partir das diferentes funções objetivo presentes no problema.

Na etapa de seleção são utilizados de fato os conceitos da teoria evolutiva. Nela os indivíduos com maior grau de adaptação são selecionados, pois são os com maior probabilidade de se reproduzirem. É a etapa responsável por manter as boas

características da espécie, preservando as melhores soluções ao longo do processo de otimização.

No cruzamento são gerados os filhos, através da reprodução entre os indivíduos mais aptos. São escolhidos dois indivíduos daqueles mais aptos randomicamente, cuja combinação gera um novo indivíduo. É nesta etapa que entra os pontos fortes dos AGs, uma vez que o modo de cruzamento pode ser realizado de inúmeras maneiras.

A mutação atua sobre os indivíduos gerados no processo de reprodução, realizando uma alteração aleatória em sua característica. Novamente, se for um operador bem explorado, garante diversidade na busca por soluções ótimas, podendo convergir a resposta com um custo computacional menos elevado. No entanto, se elevadas taxas de mutação forem utilizadas, a variação aleatória das características pode degenerar a população levando o processo a não convergência.

Os novos indivíduos gerados (filhos) substituem os anteriores (pais) durante a atualização, como são criados num mesmo número de antecessores. Assim a população mantém um tamanho fixo. Alguns algoritmos possuem uma característica chamada de elitismo, pela qual, no caso do indivíduo pai ser mais adaptado que o filho, este não é substituído.

Finalização é quando o processo de otimização chega ao fim, ou seja, não há mais evolução e a população gerada deve ser suficiente para identificar os mais adequados à resposta. O critério de parada pode ser o número de gerações pré-definidas, ou também um certo grau de convergência, representado pela porcentagem de soluções ótimas presente na população.

Existe um universo de algoritmos genéticos que podem ser utilizados em um processo de otimização. A principal variação destes reside na forma como é feita a seleção, reprodução e mutação e também na presença, ou não, de elitismo.

O algoritmo evolutivo que será usado neste trabalho será o NSGA-II, um dos mais populares entre AGs, o qual foi proposto originalmente por Deb (2002).

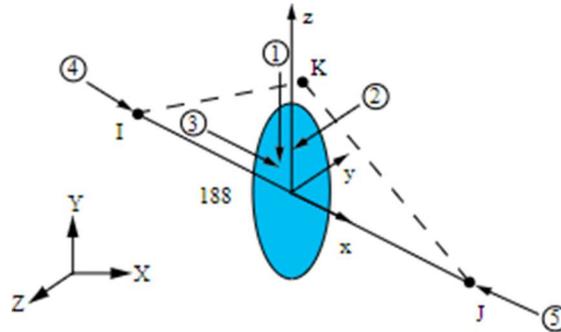
Nesse algoritmo, a seleção de indivíduos é realizada segundo o princípio da não dominância. O princípio da não dominância consiste em se dividir a população em níveis de dominância, e os indivíduos dominantes recebem automaticamente um nível de aptidão maior. Desta forma, a busca pela fronteira de Pareto é mais eficiente. (DEB, 2002).

Através deste conceito de dominância, o NSGA-II é classificado como elitista, pois sua formulação não permite que se substitua toda vez a população anterior, exigindo que se mantenham os melhores indivíduos entre os “filhos” e “pais”.

O NSGA-II também utiliza de um recurso conhecido como *Crowding Distance*. Isto faz com que em famílias posteriores, os indivíduos tenham um certo espaçamento, evitando aglomeração de solução sobre o mesmo ponto, aumentando a dispersão da fronteira.

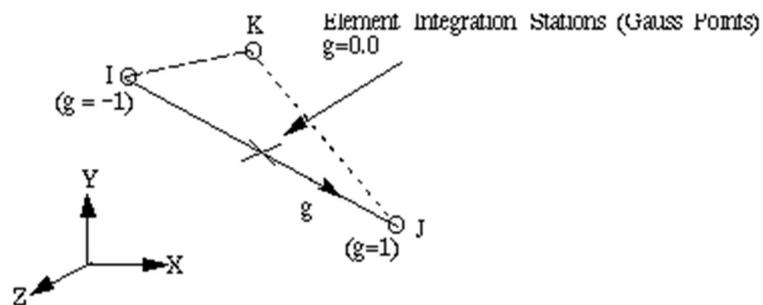
APÊNDICE C – Ilustração de diferentes elementos finitos

Figura C 1 – Representação 3D do elemento BEAM188.



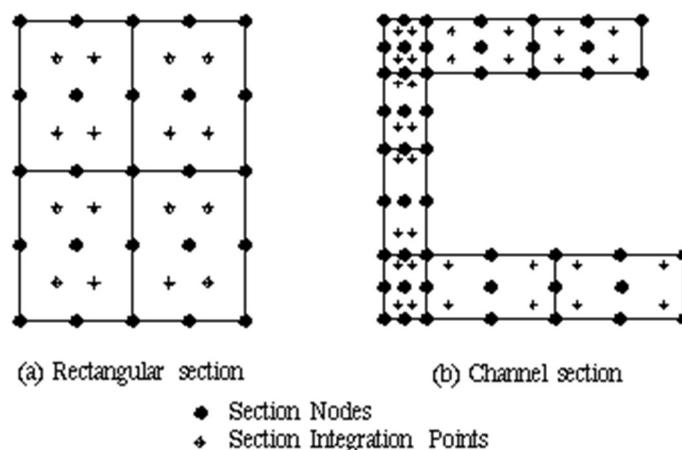
Fonte: (ANSYS Inc., 1999).

Figura C 2 – Ponto de integração de Gauss entre dois nós.



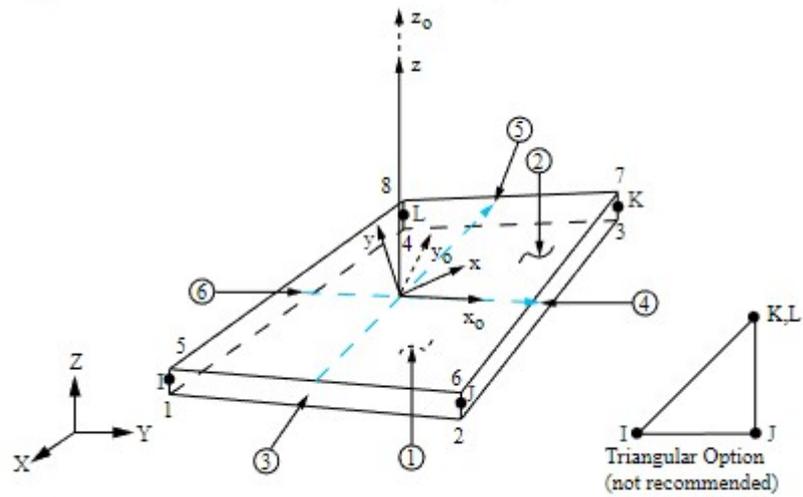
Fonte: (ANSYS Inc., 1999).

Figura C 3 – Distribuição de nós em duas seções transversais diferentes.



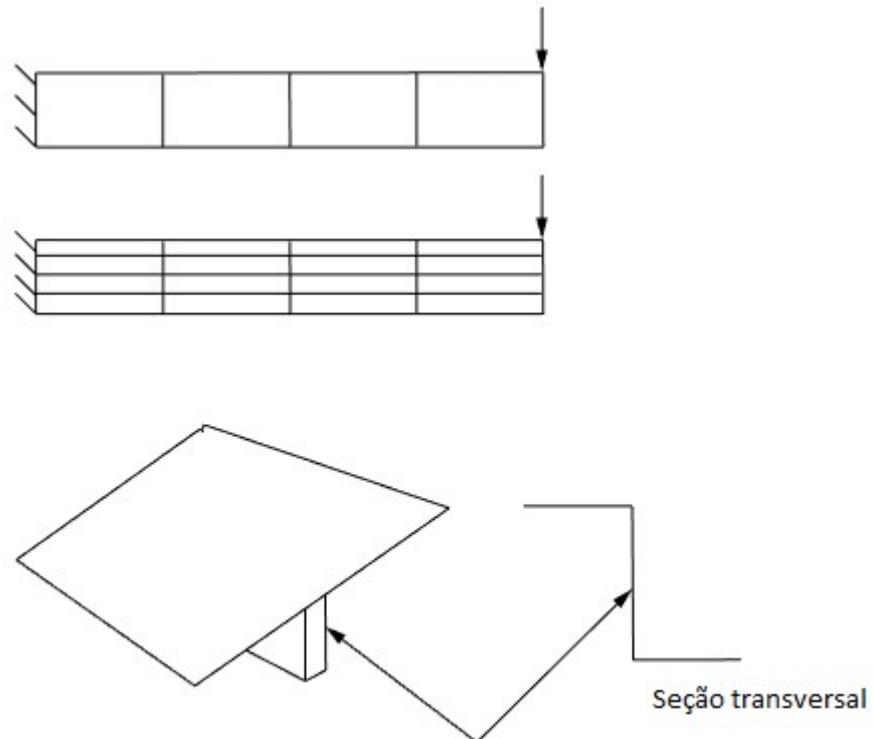
Fonte: (ANSYS Inc., 1999).

Figura C 4 – Representação do elemento SHELL181.



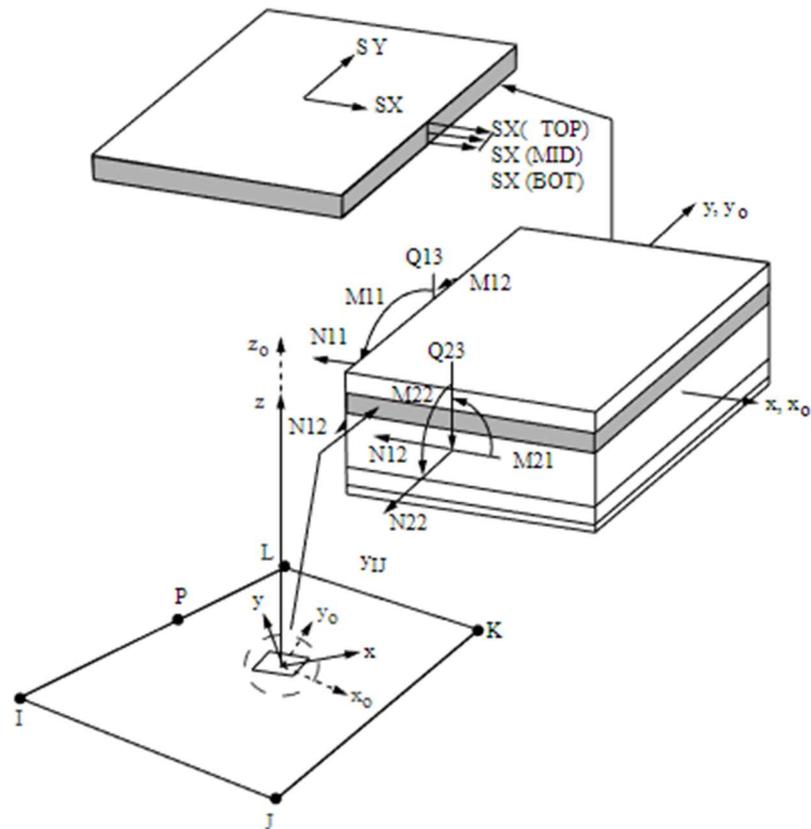
Fonte: (ANSYS Inc., 1999).

Figura C 5 – Possíveis situações de utilização do elemento SHELL181.



Fonte: (ANSYS Inc., 1999).

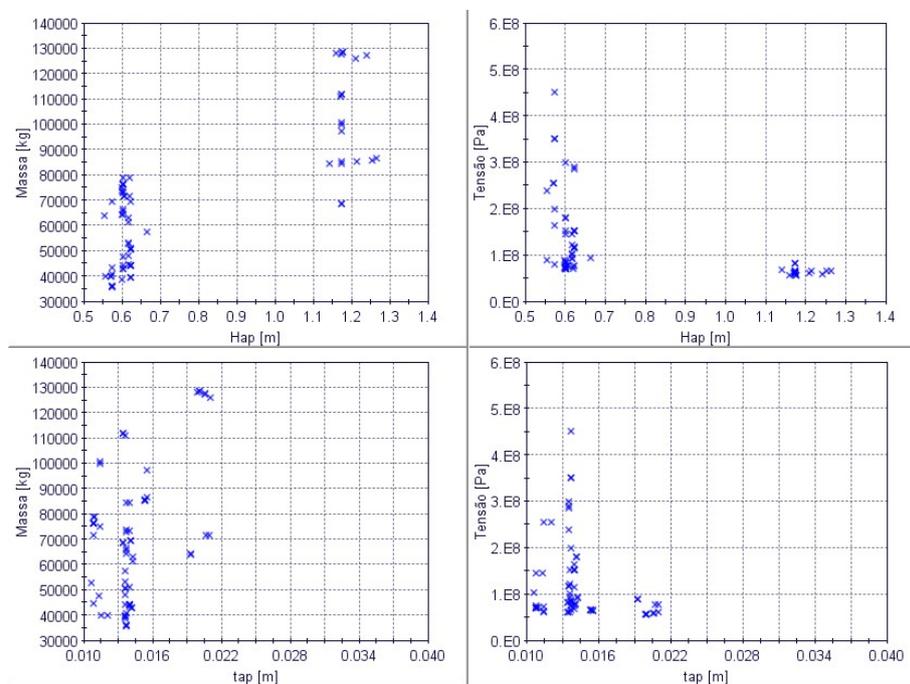
Figura C 6 – Saída de tensão no elemento *SHELL181*.



Fonte: (ANSYS Inc., 1999).

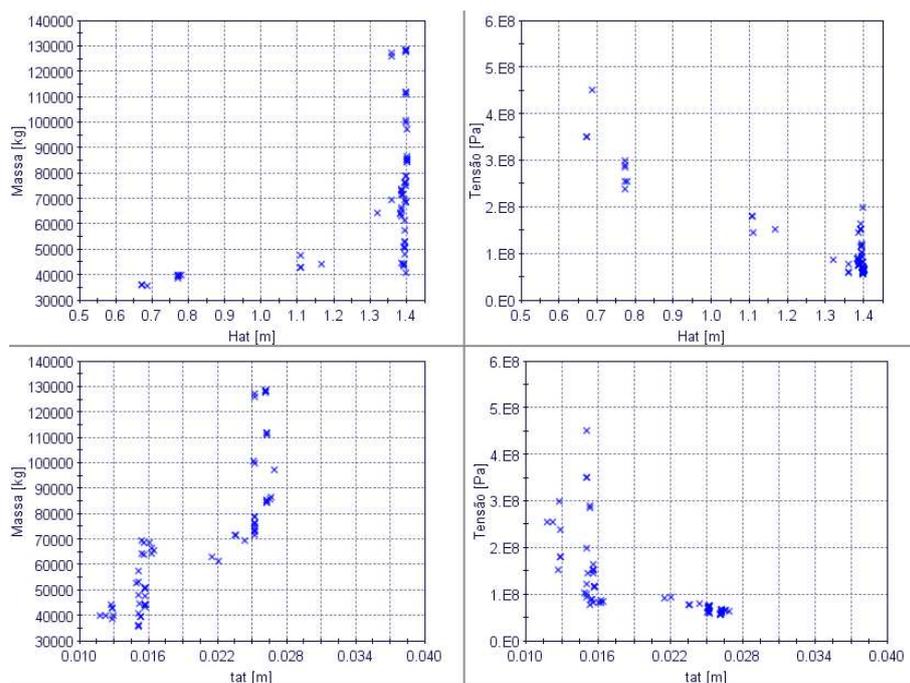
APÊNDICE D – Influência das variáveis na Fronteira de Pareto

Figura D 1 – Influência das dimensões da alma do reforçador pesado nos indivíduos de Pareto.



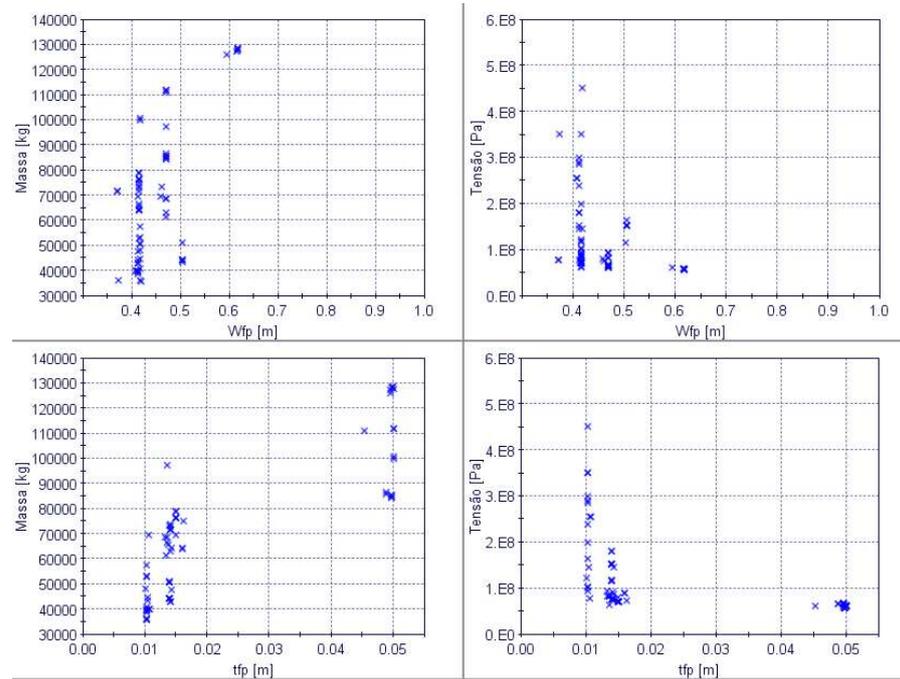
Fonte: Autor (2018).

Figura D 2 – Influência das dimensões da alma do reforçador transversal nos indivíduos de Pareto.



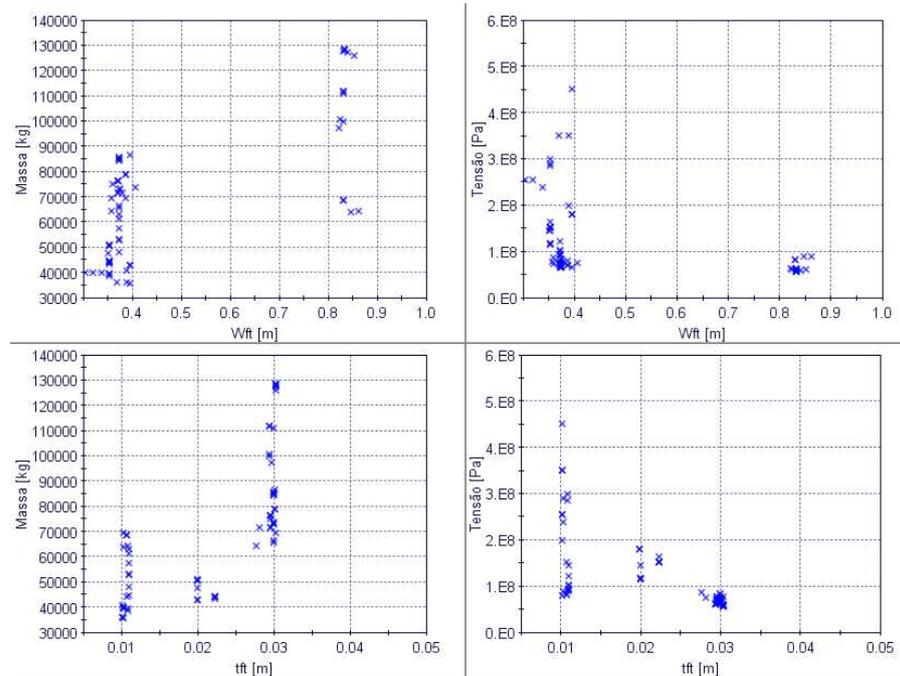
Fonte: Autor (2018).

Figura D 3 – Influência das dimensões do flange do reforçador pesado nos indivíduos de Pareto.



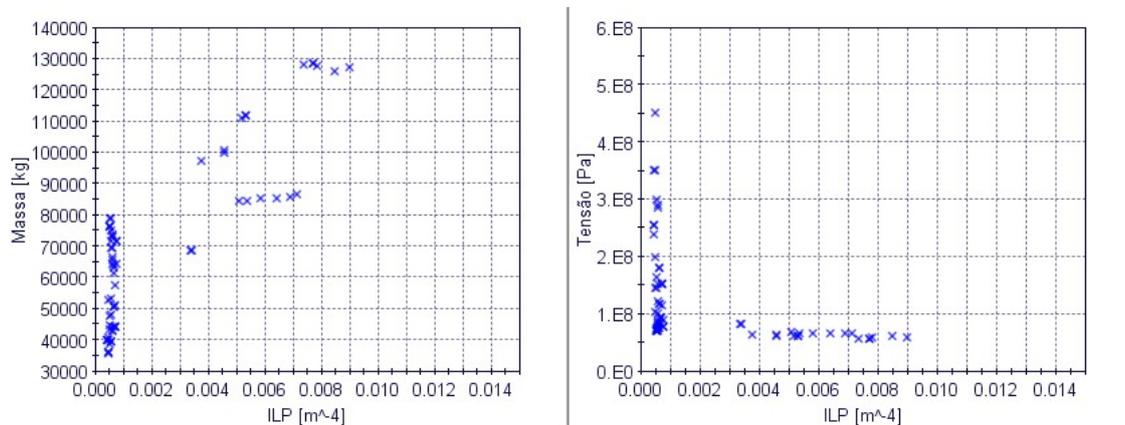
Fonte: Autor (2018).

Figura D 4 – Influência das dimensões do flange do reforçador transversal nos indivíduos de Pareto.



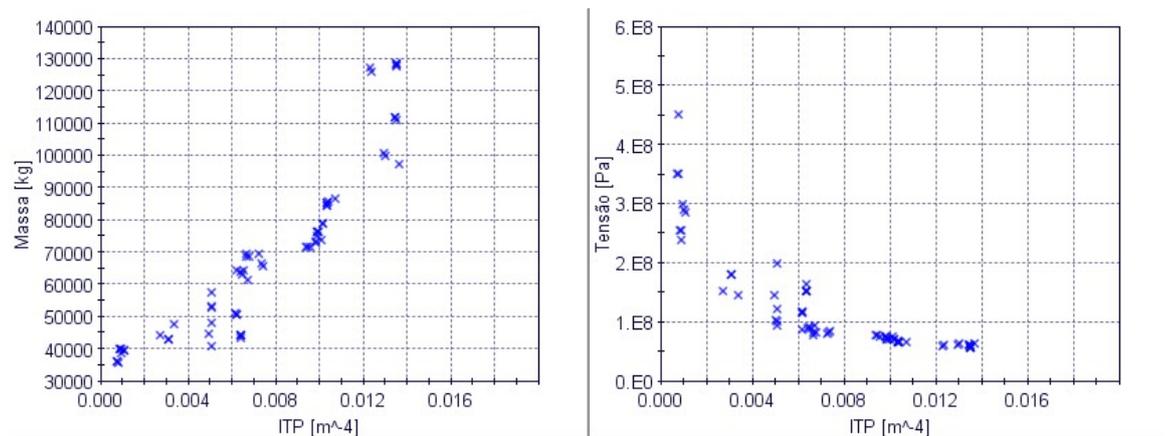
Fonte: Autor (2018).

Figura D 5 – Influência da inércia de seção transversal do reforçador pesado nos indivíduos de Pareto.



Fonte: Autor (2018).

Figura D6 – Influência da inércia de seção transversal do reforçador transversal nos indivíduos de Pareto.



Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE E – Dados dos refinós utilizados

Tabela E 1 – Variáveis dos arranjos base para refino de 48 toneladas (1 de 3).

Arranjo	Slp [m]	St [m]	SII [m]	Hap [m]	tap [m]	Wfp [m]	tfp [m]
1	3,8634	3,2769	0,6986	0,6040	0,0141	0,4105	0,0140
2	3,7154	2,6186	0,6248	0,5987	0,0140	0,4104	0,0139
3	3,8333	2,6186	0,6250	0,5987	0,0141	0,4104	0,0139
4	3,6795	2,5394	0,5840	0,6139	0,0135	0,4152	0,0100
5	3,8339	2,6186	0,6361	0,5989	0,0141	0,4140	0,0111
6	3,8333	2,6186	0,6361	0,5987	0,0141	0,4104	0,0139
7	3,8447	3,2769	0,6322	0,6282	0,0190	0,4105	0,0139
8	3,8458	2,6994	0,6161	0,6040	0,0141	0,4101	0,0139
9	3,8457	2,6994	0,6172	0,6040	0,0141	0,3886	0,0139
10	3,8333	2,5295	0,6950	0,5911	0,0191	0,4683	0,0139

Fonte: Autor (2018).

Tabela E 2 – Variáveis dos arranjos base para refino de 48 toneladas (2 de 3).

Arranjo	IP [m ⁻⁴]	Hat [m]	tat [m]	Wft [m]	tft [m]	IT [m ⁻⁴]	Hal [m]
1	5,85E-04	1,1031	0,0156	0,3952	0,0186	3,36E-03	0,1232
2	5,70E-04	1,1015	0,0156	0,3371	0,0199	3,25E-03	0,1086
3	5,71E-04	1,1015	0,0156	0,3496	0,0199	3,29E-03	0,1086
4	5,31E-04	1,3912	0,0150	0,3710	0,0108	5,03E-03	0,1142
5	5,28E-04	1,0977	0,0156	0,3931	0,0197	3,39E-03	0,1099
6	5,71E-04	1,1015	0,0156	0,3509	0,0197	3,29E-03	0,1242
7	7,91E-04	1,1031	0,0158	0,3929	0,0199	3,47E-03	0,1086
8	5,84E-04	1,1031	0,0156	0,3515	0,0199	3,31E-03	0,1086
9	5,73E-04	1,1031	0,0156	0,3359	0,0199	3,26E-03	0,1086
10	7,05E-04	1,1056	0,0143	0,3987	0,0194	3,25E-03	0,1086

Fonte: Autor (2018).

Tabela E 3 – Variáveis dos arranjos base para refino de 48 toneladas (3 de 3).

Arranjo	tal [m]	Wfl [m]	tfl [m]	IL [m ⁻⁴]	tc [m]	Massa [t]	Tensão [MPa]
1	0,0056	0,0515	0,0205	3,04E-06	0,0155	48,14	183,15
2	0,0056	0,0647	0,0078	1,53E-06	0,0154	48,29	233,69
3	0,0056	0,0515	0,0077	1,40E-06	0,0154	48,34	146,85
4	0,0055	0,0526	0,0068	1,52E-06	0,0154	48,39	124,72
5	0,0056	0,0515	0,0078	1,46E-06	0,0154	48,48	143,96
6	0,0056	0,0515	0,0078	2,00E-06	0,0154	48,57	144,43
7	0,0057	0,0515	0,0087	1,51E-06	0,0157	48,63	180,86
8	0,0056	0,0544	0,0079	1,45E-06	0,0155	48,69	155,25
9	0,0056	0,0545	0,0079	1,45E-06	0,0157	48,71	152,81
10	0,0056	0,0526	0,0077	1,41E-06	0,0154	48,82	147,42

Fonte: Autor (2018).

Tabela E 4 – Variáveis dos arranjos base para refino de 71,1 toneladas.

Arranjo	1	2	3
Slp [m]	3,8513	4,0002	3,8433
St [m]	3,3006	3,3006	2,6298
SII [m]	0,7690	0,7690	0,6214
Hap [m]	0,6276	0,6276	0,6105
tap [m]	0,0190	0,0190	0,0191
Wfp [m]	0,4114	0,4114	0,4803
tfp [m]	0,0131	0,0131	0,0146
IP [m⁻⁴]	7,73E-04	7,73E-04	7,90E-04
Hat [m]	1,3036	1,3026	1,2859
tat [m]	0,0224	0,0225	0,0154
Wft [m]	0,3951	0,3949	0,3841
tft [m]	0,0199	0,0199	0,0298
IT [m⁻⁴]	6,85E-03	6,84E-03	5,86E-03
Hal [m]	0,2629	0,2629	0,2068
tal [m]	0,0146	0,0146	0,0109
Wfl [m]	0,0530	0,0530	0,0515
tfl [m]	0,0240	0,0241	0,0288
IL [m⁻⁴]	4,18E-05	4,19E-05	2,06E-05
tc [m]	0,0204	0,0204	0,0211
Massa [ton]	71,17	71,19	71,10
Tensão [MPa]	112,11	110,30	91,40

Fonte: Autor (2018).

Tabela E 5 – Intervalos de valores para as variáveis no refino de 71,1 toneladas.

Limite inferior	Variável	Limite superior
3,84 [m]	<i>Slp</i>	4,00 [m]
0,62 [m]	<i>Sll</i>	0,76 [m]
2,63 [m]	<i>St</i>	3,30 [m]
20 [mm]	<i>tc</i>	21 [mm]
610 [mm]	<i>Hap</i>	627 [mm]
411 [mm]	<i>Wfp</i>	480 [mm]
19 [mm]	<i>tap</i>	19 [mm]
13 [mm]	<i>tfp</i>	15 [mm]
207 [mm]	<i>Hal</i>	263 [mm]
51 [mm]	<i>Wfl</i>	53 [mm]
11 [mm]	<i>tal</i>	15 [mm]
24 [mm]	<i>tfl</i>	29 [mm]
1286 [mm]	<i>Hat</i>	1304 [mm]
384 [mm]	<i>Wft</i>	395 [mm]
15 [mm]	<i>tat</i>	23 [mm]
20 [mm]	<i>tft</i>	30 [mm]

Fonte: Autor (2018).

Tabela E 6 – Configurações equivalentes após refino de 71,1 toneladas.

Arranjo	1	2	3
Slp [m]	3,9631	3,9641	3,9641
St [m]	2,6395	2,6501	2,6559
SII [m]	0,6984	0,7490	0,7490
Hap [m]	0,6236	0,6239	0,6236
tap [m]	0,0190	0,0190	0,0190
Wfp [m]	0,4661	0,4628	0,4663
tfp [m]	0,0132	0,0133	0,0133
IP [m⁴]	7,97E-04	7,95E-04	7,96E-04
Hat [m]	1,2892	1,2886	1,2886
tat [m]	0,0168	0,0221	0,0221
Wft [m]	0,3849	0,3853	0,3853
tft [m]	0,0285	0,0284	0,0284
IT [m⁴]	6,17E-03	7,38E-03	7,38E-03
Hal [m]	0,2085	0,2083	0,2083
tal [m]	0,0116	0,0110	0,0110
Wfl [m]	0,0516	0,0517	0,0517
tfl [m]	0,0271	0,0267	0,0267
IL [m⁴]	2,12E-05	2,02E-05	2,02E-01
tc [m]	0,0210	0,0208	0,0208
Massa [t]	70,74	70,74	70,74
Tensão [MPa]	89,36	88,39	89,35

Fonte: Autor (2018).

**APÊNDICE F – Configuração dos painéis utilizados na demonstração
3d de diferentes regiões da fronteira**

Tabela F 1 – Dimensões de arranjos utilizados para visualização 3d.

Arranjo	902	851	999
Slp [m]	3,7330	3,6846	4,9294
St [m]	3,3583	2,5394	2,5167
SII [m]	0,6556	0,5840	0,6586
Hap [m]	0,5715	0,6619	1,1717
tap [m]	0,0136	0,0136	0,0113
Wfp [m]	0,4152	0,4152	0,4145
tfp [m]	0,0102	0,0101	0,0499
IP [m⁻⁴]	4,44E-04	6,51E-04	4,54E-03
Hat [m]	0,6703	1,3912	1,3959
tat [m]	0,0150	0,0150	0,0250
Wft [m]	0,3869	0,3710	0,8225
tft [m]	0,0100	0,0108	0,0293
IT [m⁻⁴]	7,01E-04	5,03E-03	1,29E-02
Hal [m]	0,1167	0,1142	0,3539
tal [m]	0,0052	0,0055	0,0057
Wfl [m]	0,0528	0,0526	0,1784
tfl [m]	0,0065	0,0068	0,0279
IL [m⁻⁴]	1,53E-06	1,52E-06	7,32E-05
tc [m]	0,0151	0,0221	0,0214
Massa [t]	36,47	58,03	100,86
Tensão [MPa]	352,02	96,21	62,96

Fonte: Autor (2018).

**APÊNDICE G – Configuração dos painéis utilizados na comparação
entre painéis de aço e alumínio**

Tabela G 1 – Configurações dos painéis equivalentes a aço e alumínio.

Arranjo	958	977
Slp [m]	3,8663	3,8595
St [m]	3,3349	2,5362
SII [m]	0,6336	0,5841
Hap [m]	0,5719	0,6189
tap [m]	0,0139	0,0135
Wfp [m]	0,5026	0,4108
tfp [m]	0,0102	0,0101
IP [m⁻⁴]	4,82E-04	5,41E-04
Hat [m]	1,3892	0,7693
tat [m]	0,0156	0,0153
Wft [m]	0,3509	0,3509
tft [m]	0,0221	0,0102
IT [m⁻⁴]	6,33E-03	9,95E-04
Hal [m]	0,1253	0,1097
tal [m]	0,0059	0,0055
Wfl [m]	0,0515	0,0508
tfl [m]	0,0065	0,0066
IL [m⁻⁴]	1,97E-06	1,33E-06
tc [m]	0,0151	0,0150
Massa [t]	43,79	39,85
Tensão [MPa]	165,72	291,20

Fonte: Autor (2018).