



OTIMIZAÇÃO DE PROJETO ESTRUTURAL DE LANCHA PATRULHA DE ALUMÍNIO

Caio Marchetti Tavares

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Marcelo Igor Lourenço de Souza

Jean David Job Emmanuel

Marie Caprace

Rio de Janeiro

MAIO de 2024

OTIMIZAÇÃO DE PROJETO ESTRUTURAL DE LANCHA PATRULHA DE
ALUMÍNIO

Caio Marchetti Tavares

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Orientadores: Marcelo Igor Lourenço de Souza

Jean David Job Emmanuel Marie Caprace

Aprovada por: Prof. Marcelo Igor Lourenço de Souza

Prof. Jean David Job Emmanuel Marie Caprace

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro

Prof. Carl Horst Albrecht

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2024

Tavares, Caio Marchetti OTIMIZAÇÃO DE PROJETO ESTRUTURAL DE LANCHAS PATRULHA DE ALUMÍNIO / Caio Marchetti Tavares. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XV, 191 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcelo Igor Lourenço de Souza

Jean David Job Emmanuel Marie Caprace Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de

Engenharia Oceânica, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 149-150.

1. Otimização estrutural. 2. Lancha patrulha. 3. Algoritmos de otimização. I. Souza, Marcelo Igor Lourenço de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelo seu apoio, orientação e formação técnica e moral, por estar comigo nos momentos mais difíceis da minha vida. Por ser minha referência.

Agradeço a minha esposa, amor da minha vida, pela compreensão amor e cuidado, principalmente nos momentos que precisei me dedicar aos estudos. Agradeço também por me lembrar de ligar o laptop novamente quando fiz a prova para o mestrado e a luz faltou no momento de enviar a prova.

Agradeço aos meus irmãos pelo apoio e por sempre torcerem pelas minhas conquistas. Yuri sempre tentou me mostrar o melhor caminho sendo o mais velho, acredito ter aproveitado bem.

Agradeço imensamente aos meus orientadores Marcelo Igor Lourenço de Souza e Jean David Job Emmanuel Marie Caprace que confiaram no meu trabalho, e estiveram no meu lado me dando suporte, apoio e orientação, assim me auxiliando nas decisões.

Agradeço ao meu ex-chefe Comandante Márcio Santos que me autorizou a realizar esse curso.

Agradeço ao meu amigo Guerra, pela troca de conhecimento e companheirismo.

“Onde há um desejo, há um caminho”

Albert Einstein

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

OTIMIZAÇÃO DE PROJETO ESTRUTURAL DE LANCHA PATRULHA DE ALUMÍNIO

Caio Marchetti Tavares

Maio/2024

Orientadores: Marcelo Igor Lourenço de Souza

Jean David Job Emmanuel Marie Caprace

Programa: Engenharia Oceânica

O projeto estrutural de embarcações é uma tarefa trabalhosa que se utiliza de regras de sociedade classificadoras e da experiência de projetistas para se concretizar. Hoje em dia, com a alta demanda de projetos mais baratos e que poluam menos, se torna evidente a necessidade de se desenvolver uma metodologia que consiga analisar de forma mais rápida e eficiente a viabilidade de um projeto estrutural com esses objetivos. O presente trabalho tem o objetivo de otimizar o projeto estrutural de uma lancha patrulha de 8.14m de comprimento visando minimizar o peso e volume de solda, usando como base a regra da sociedade classificadora DNV programada em forma de planilha e também usando um software de otimização chamado ModeFrontier. Primeiramente foi testado cinco algoritmos de otimização, com o algoritmo Evolucionário obtendo melhor resultado com a minimização de -18% no peso e -30% no volume de solda. Depois se optou pelo uso de DOEs para dar ao algoritmo um ponto de partida melhor para se obter o resultado final. Este resultado final foi obtido pelo algoritmo MOGA-2 com uma minimização de -19 % no peso e -51% no volume de solda. O trabalho consegue servir de ferramenta para otimizar novos projetos de lancha patrulha pequenas, assim ajudando na redução de custos de produção e peso final do projeto.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

OPTIMIZING THE STRUCTURAL DESIGN OF AN ALUMINIUM PATROL BOAT

Caio Marchetti Tavares

May/2024

Advisors: Marcelo Igor Lourenço de Souza

Jean David Job Emmanuel Marie Caprace

Department: Ocean Engineering

The structural design of ships is a laborious task that relies on the rules of classification societies and the experience of designers. Nowadays, with the high demand for cheaper designs that pollute less, there is a clear need to develop a methodology that can analyze the feasibility of a structural design with these objectives more quickly and efficiently. The present work aims to optimize the structural design of an 8.14m long patrol boat in order to minimize the weight and welding volume, using as a basis the rule of the DNV classification society programmed in spreadsheet form and also using optimization software called ModeFrontier. Firstly, five optimization algorithms were tested, with Evolutionary algorithm obtaining the best result with a minimization of -18% in weight and -30% in weld volume. Then it was decided to use DOEs to give the algorithm a better starting point to obtain the final result. This final result was obtained by the MOGA-2 algorithm with a minimization of -19% in weight and -51% in weld volume. The work can serve as a tool to optimize new small patrol boat projects, thus helping to reduce production costs and final weight of the project.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivo.....	2
2	CONCEITOS GERAIS	5
2.1	Relação entre Projeto e Otimização	5
2.2	Fundamentos da otimização	9
2.3	Projeto estrutural de embarcações.....	25
2.4	Tipos comuns de falhas estruturais em embarcações.....	34
3	METODOLOGIA	47
3.1	Hipóteses do modelo proposto	49
3.2	Fluxograma da lógica do método	51
3.3	Visão geral da ferramenta desenvolvida para o cálculo estrutural.....	52
3.4	Funções objetivo	53
3.5	Variáveis de projeto	62
3.6	Restrições de projeto	64
3.7	Uso da ferramenta de otimização.....	91
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS GERADOS NA OTIMIZAÇÃO	97
4.1	Testes dos algoritmos.....	97
4.2	Construção e análises dos DOEs.....	112
4.3	Usando os DOEs para se obter o resultado final da otimização	121
4.4	Análise das variáveis e restrições da solução final ótima	128
4.5	Comparativo da seção mestra da lancha original e otimizada	140
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	145
5.1	Trabalhos futuros	148
	REFERÊNCIAS	149
	ANEXO 1 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE PESO DA LANCHA	151
	ANEXO 2 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE VOLUME DE SOLDA DA LANCHA	155
	ANEXO 3 - EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS RELACIONADOS A VARIAÇÃO DE PESO, CALADO, LW, CB E Z DA LANCHA	158
	ANEXO 4 - EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS RELACIONADOS A PRINCÍPIOS DE PROJETO E CARREGAMENTOS DE PROJETO	164

ANEXO 5 - EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS RELACIONADOS AO PROJETO ESTRUTURAL DO CASCO DE ALUMÍNIO	180
ANEXO 6 - RESULTADOS DOS DOES	188

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de lancha patrulha usada pela Marinha do Brasil (fonte: autor).....	1
Figura 2 - Típica espiral de projeto apresentada em muitos livros (EYRES).....	6
Figura 3 - Estágio do projeto na indústria de construção (CAPRACE, 2010)	6
Figura 4 - Exemplo de fronteira de Pareto (CAPRACE, 2011).....	23
Figura 5 - Exemplo de chapeamento reforçado	26
Figura 6 - Chapeamento reforçado em "T" (RAHMAN, 1996)	27
Figura 7 - Chapeamento Reforçado com barra chata (RAHMAN, 1996).....	27
Figura 8 - Chapeamento corrugado (RAHMAN, 1996)	27
Figura 9 - Sistema de cavernamento transversal (ZUBALY, 1996).....	28
Figura 10 - Sistema de Cavernamento longitudinal (ZUBALY, 1996).....	29
Figura 11 - Exemplo de Alquebramento (AUGUSTO, 2007).....	29
Figura 12 - Exemplo de Tosamento (AUGUSTO, 2007).....	30
Figura 13 - Momento fletor e esforço cortante na viga navio (OROZCO, 2009)	31
Figura 14 - Diagrama de tensão-deformação de exemplo (HIBBELER, 2009).....	35
Figura 15 - Exemplos de diferentes tipos de Le (ENGINEER, 2021).....	36
Figura 16 - Flambagem de coluna larga (HUGHES, 1988).....	37
Figura 17 - Perfil flambado de uma placa longa (HUGHES, 1988).....	38
Figura 18 - Plotagem de "m" por "a/b" (HUGHES, 1988).....	40
Figura 19 - Tipos de sistemas de reforços em placas (HUGHES, 1988).....	42
Figura 20 - Movimentos do Hogging e Sagging (HUGHES, 1988).....	44
Figura 21 - Exemplo do crack arrestor (RAJU, 2018).....	45
Figura 22 - Visão lateral e frontal do arranjo geral da lancha patrulha a ser otimizada (fonte: autor).....	47
Figura 23 - Visão dos elementos estruturais da seção mestra da embarcação original (fonte: autor).....	47
Figura 24 - Modelo 3D que será usado na otimização (fonte: autor)	48
Figura 25 - Fluxograma lógico do método (fonte: autor)	51
Figura 26 - Visão geral da planilha de cálculo da otimização (fonte: autor).....	52
Figura 27 - Modelo 3D da lancha a ser otimizada (fonte: autor).....	54
Figura 28 - Gráfico de área e comprimento de cavernas (comprimento em azul, área em vermelho) (fonte: autor).....	56
Figura 29 - Modelo 3D com linhas de solda da lancha a ser otimizada (fonte: autor)	58
Figura 30 - Área de preenchimento – Junta de topo (BAPTISTA, 2018)	59
Figura 31 - Área de Preenchimento - Junta T (BAPTISTA, 2018)	60
Figura 32 - Seção mostrando variáveis de projeto (fonte: autor).....	63
Figura 33 - Área alagada das meias seções transversais (fonte: autor).....	65
Figura 34 - Gráfico de Deslocamento X_{Cb}/T (fonte: autor).....	67
Figura 35 - Gráfico Deslocamento $X_{Lw}/LCB/AP$ (fonte: autor)	67
Figura 36 – Gráfico usado para se obter k_l (VERITAS, 2015)	74
Figura 37 – Figura para auxilio no cálculo de β_x e β_{cg} (VERITAS, 2015).....	74
Figura 38 – gráfico que correlaciona k_s com C_b (VERITAS, 2015).....	75
Figura 39 – Visão geral da ferramenta ModeFrontier (ESTECO, 2023).....	96
Figura 40 - Gráfico de convergência do algoritmo MOGA2 sem o uso de DOE (fonte: autor)	100

Figura 41 - Gráfico de Volume de Solda X Peso do MOGA-2 sem DOE (Pareto em verde claro, lancha original em vermelho) (fonte: autor)	100
Figura 42 - Gráfico de convergência do algoritmo EVO sem o uso de DOE (fonte: autor)	102
Figura 43 - Gráfico de Volume de Solda X Peso da EVO sem DOE (Pareto em verde claro, lancha original em vermelho) (fonte: autor)	103
Figura 44 - Gráfico de convergência do algoritmo NSGA2 sem o uso de DOE (fonte: autor)	105
Figura 45 - Gráfico de Volume de Solda X Peso do NSGA2 sem DOE (Pareto em verde claro, lancha original em vermelho) (fonte: autor)	105
Figura 46 - Gráfico de convergência do algoritmo ARMOGA sem DOE (fonte: autor) ..	107
Figura 47 - Gráfico de Volume de Solda X Peso do ARMOGA sem DOE (Pareto em verde claro, lancha original em vermelho) (fonte: autor)	108
Figura 48 - Gráfico de convergência do algoritmo MANY-OBJECTIVE sem o uso de DOE (fonte: autor)	110
Figura 49 Gráfico de Volume de Solda X Peso do MANY-OBJECTIVE sem DOE (Pareto em verde claro, lancha original em vermelho) (fonte: autor)	110
Figura 50 - Fronteira de Pareto dos DOEs (lancha original em vermelho) (fonte: autor) ..	115
Figura 51 - Gráfico de correlação das variáveis l, n1 e e_t_bottom (fonte: autor)	117
Figura 52 - Gráfico de correlação das variáveis l, n1 e e_t_bottom (fonte: autor)	118
Figura 53 - Gráfico de correlação das variáveis l, ncl e e_t_side (fonte: autor)	119
Figura 54 - Gráfico de correlação das variáveis l, ncl e e_t_side (fonte: autor)	120
Figura 55 - Gráfico de convergência das funções objetivo do algoritmo evolucionário com uso de DOE (fonte: autor)	123
Figura 56 - Fronteira de Pareto para o Algoritmo Evolucionário (lancha original em triângulo vermelho, pontos do pareto destacados em verde claro) (fonte: autor)	123
Figura 57 - Gráfico de convergência do algoritmo MOGA2 com o uso de DOE (fonte: autor)	125
Figura 58 - Gráfico do único ponto Pareto para o algoritmo MOGA2 (lancha original em vermelho, ponto pareto em verde claro) (fonte: autor)	126
Figura 59 - gráfico com a convergência das variáveis ncl, n1 e l (fonte: autor)	128
Figura 60 - Distribuição percentual das variáveis ncl, n1 e l (fonte: autor)	129
Figura 61 - gráfico com a convergência da espessura dos flanges (fonte: autor)	130
Figura 62 - Distribuição percentual dos das espessuras dos flanges (fonte: autor)	130
Figura 63 - Gráfico de convergência da espessura de elementos estruturais do fundo (fonte: autor)	131
Figura 64 - Distribuição percentual dos das espessuras de elementos estruturais do fundo (fonte: autor)	131
Figura 65 - Gráfico de convergência da espessura de elementos estruturais do convés e das anteparas (fonte: autor)	132
Figura 66 - Distribuição percentual dos das espessuras de elementos estruturais do convés e das anteparas (fonte: autor)	132
Figura 67 - Gráfico de convergência da espessura de elementos estruturais do costado (fonte: autor)	133
Figura 68 - Distribuição percentual das espessuras de elementos estruturais do costado (fonte: autor)	134

Figura 69 - medidas dos elementos estruturais na seção mestra original e otimizada (fonte: autor).....	141
Figura 70 - Área do espelho de popa (fonte: autor).....	151
Figura 71 - Modelo 3D com linhas de solda no fundo (fonte: autor)	156
Figura 72 - figura usada para cálculo do momento de inércia (fonte: autor).....	160
Figura 73 – Figura do modelo usado para medir β_{cg} no calado original de projeto (T=0.42m) (fonte: autor)	168
Figura 74 - Gráfico correlacionando β_{cg} com o Calado (fonte: autor).....	168
Figura 75 - gráfico correlacionando C_b e K_s (fonte: autor).....	171
Figura 76 - Figura representando as alturas escolhidas para medir as pressões na lancha de exemplo (fonte: autor).....	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Base de dados das cavernas retirado do modelo 3D (fonte: autor).....	56
Tabela 2 - propriedades mecânicas da chapa de alumínio (VERITAS, 2015)	69
Tabela 3 - propriedades mecânicas do perfil de alumínio (VERITAS, 2015).....	70
Tabela 4 - Tabela de redução do coeficiente de onda (VERITAS, 2015)	71
Tabela 5 - Tabela para obtenção do fator "fg" (VERITAS, 2015)	72
Tabela 6 - Pressão do mar mínima (VERITAS, 2015).....	75
Tabela 7 – Tabela usada para obtenção do fator “f1” de chapas de alumínio V-5086 H116 (VERITAS, 2015)	82
Tabela 8 – Tabela usada para obtenção do fator “f1”para perfis extrudados de alumínio NV-6061 (VERITAS, 2015).....	82
Tabela 9 – Tabela usada para obtenção do fator “f1”para perfis extrudados de alumínio NV-6061 (VERITAS, 2015).....	82
Tabela 10 – Tabela usada para obtenção de t0 e k de acordo com o tipo de estrutura (VERITAS, 2015)	84
Tabela 11 – tensão de flexão admissível (VERITAS, 2015).....	85
Tabela 12 – Tabela usada para obtenção de t0 e k de acordo com o tipo de estrutura (VERITAS, 2015)	86
Tabela 13 – tabela para obtenção do fator de momento fletor (VERITAS, 2015).....	87
Tabela 14 – Informações mais importantes inseridas para cada variável (fonte: autor).....	92
Tabela 15 – Relação da espessura de entrada para a espessura real (fonte: autor).....	93
Tabela 16 - Resultado para a lancha original (fonte: autor).....	98
Tabela 17 - Resultado único de Pareto para o algoritmo MOGA2 livre (fonte: autor)	99
Tabela 18 - Resultados de Pareto para o algoritmo EVO (fonte: autor).....	102
Tabela 19 - Resultados de Pareto para o algoritmo NSGA2 (fonte: autor)	104
Tabela 20 - Resultados de Pareto para o algoritmo ARMOGA (fonte: autor)	107
Tabela 21 - Resultados de Pareto para o algoritmo MANY OBJECTIVE (fonte: autor)..	109
Tabela 22 - Resultados dos algoritmos selecionados (fonte: autor)	111
Tabela 23 – Valores de referência das variáveis a serem usadas na criação dos DOEs (fonte: autor).....	112
Tabela 24 - limites das variáveis a serem usadas para criação dos DOEs (fonte: autor)..	113
Tabela 25 - Resultados Pareto dos DOEs (fonte: autor).....	115
Tabela 26 - Resultados dos melhores DOE (fonte: autor).....	116
Tabela 27 - limites máximos e mínimos das variáveis de entrada (fonte: autor)	121
Tabela 28 – Primeiro, segundo e terceiro resultado Pareto para o EVO (fonte: autor)	122
Tabela 29 - Quarto, quinto e sexto resultado Pareto para o EVO (fonte: autor).....	122
Tabela 30 - Resultado único de Pareto para o algoritmo MOGA2 (amarelo = limites inferior ou superior) (fonte: autor).....	125
Tabela 31 - Resultado final dos algoritmos MOGA2 e Evolucionário (fonte: autor)	127
Tabela 32 – Restrições do projeto otimizado (fonte: autor)	137
Tabela 33 - lancha de exemplo para cálculo do peso total (fonte: autor)	153
Tabela 34 - Calculo do Peso Total da lancha (fonte: autor)	154
Tabela 35 - Cálculo do Volume de Solda Total da lancha (fonte: autor)	157
Tabela 36 – Meia área submersa por posição X no calado 0.34m (fonte: autor)	158
Tabela 37 – tabela de boreste usada para cálculo do módulo de seção (fonte: autor).....	162
Tabela 38 - tabela de bombordo usada para cálculo do módulo de seção (fonte: autor)...	162

Tabela 39 - Dados de exemplo de embarcação otimizada (fonte: autor).....	164
Tabela 40 - Tabela do resultado das variáveis dependentes e funções objetivo de embarcação otimizada (fonte: autor).....	165

LISTA DE SIGLAS

AP	Posição Longitudinal da Perpendicular de Ré
ARMOGA	Algoritmo Genético Multiobjetivo de Faixa Adaptativa
BFGS	Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno
CAD	Computer-Aided Design and Drafting
Cb	Coeficiente de Bloco
CG	Centro de Gravidade
CPU	Unidade Central de processamento
Cw	Coeficiente de Onda
DNV	Det Norske Veritas
DOE	Design of Experiments
EVO	Evolution Strategy
FEM	Modelo de Elementos Finitos
IMO	International Maritime Organization
LCB	Posição Longitudinal do Centro de Carena
Lw	Comprimento de Linha D'água
MANY	Many-Objective
MOGA-2	Algoritmo Genético de Multiobjetivo
NSGA-2	Algoritmo Genético de Ordenação Não Dominada
OFAT	One Factor at a Time
RAM	Random Access Memory
SN	Tensão por Ciclos
SOLAS	Safety of Life at Sea
SQP	Sequential Quadratic Programming
T	Calado
Z	Módulo de seção

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O Brasil é um país continental com uma costa com mais de 7 mil km de comprimento, que apresenta uma área costeira de aproximadamente 388mil km². O mar brasileiro tem ganhado destaque no início do século XXI por proporcionar riquezas e serviços através de seu vasto recurso natural. A descoberta das grandes reservas de petróleo bruto na região do pré-sal fez com que a atenção do Governo brasileiro se voltasse mais para a região costeira do Brasil, além de ter impulsionado a retomada da indústria naval e navegação. Proteger as bordas do território brasileiro é a prioridade da Marinha do Brasil, tendo em vista as altas riquezas mencionadas.

Dentro desse contexto, lanchas de patrulha são parte da esquadra da Marinha do Brasil e são usadas de forma a monitorar o mar territorial. Essas embarcações são relativamente pequenas e com grandes velocidades o que as torna uma ferramenta ideal para abordagens rápidas, embora eles possuam baixa autonomia, limitando seu emprego a curtas distâncias. Dessa forma o Brasil, necessita lanchas patrulhas com funcionamento ideal de forma proteger o território nacional de forma soberana. Para apoiar isso, é necessário fazer uma investigação das características de projeto desse tipo de embarcação, no sentido de procurar melhorias.



Figura 1 - Exemplo de lancha patrulha usada pela Marinha do Brasil (fonte: autor)

Os projetos navais atuais são focados em lidar com muitos dados de projetos passados e assim chegam ao projeto inicial através dessas informações juntamente com a expertise dos projetistas, sem muito se refletir por que usar aqueles resultados (

CAPRACE, 2011). Para resolver essa questão, seria conveniente desenvolver um estudo que tentasse melhorar um projeto existente através da otimização para se avaliar se o projeto assim gerado é o melhor possível para determinados objetivos.

É sabido que existe uma crescente demanda mundial por projetos navais com uma menor emissão de poluentes e com baixo custo (CAPRACE, 2011), é necessário a busca de projetos que visem atingir esses objetivos sem comprometer a eficiência e a funcionalidade do meio projetado, uma forma de se obter isso seria através da otimização estrutural, onde poderia se minimizar algumas características de um projeto de embarcação para se obter um objetivo final. Depois de se pesquisar sobre classificação de navios, observou-se que a regra “DNV Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft July 2015” (VERITAS, 2015) seria a mais adequada para o projeto, por ela conter regras específicas para dimensionamento estrutural de embarcações patrulha. Após escolher a regra de sociedade classificadora, seria interessante o entendimento dos mecanismos de funcionamento de otimizações estruturais através da revisão de clássicos como de (HAFTKA, 1992). Também seria fundamental um estudo prático de como esse modelo baseado na regra da DNV responderia aos diversos algoritmos existentes para resolução do problema de otimização.

1.2 Objetivo

Como exposto anteriormente, a necessidade de otimização de projetos navais exerce atualmente uma grande influência na indústria naval, assim foi motivado a elaboração do trabalho proposto aplicando a embarcações de patrulha, essências para defesa costeira.

Ao se iniciar um projeto, muitas possibilidades podem ser estudadas, para se obter soluções ao objetivo ao que ele se propõe. Este trabalho em particular aborda a otimização do dimensionamento estrutural de uma embarcação patrulha existente. A tarefa à primeira vista pode parecer simples, porém ela é bastante complexa. As formulações de cálculos das sociedades classificadores são altamente complexas, e seu entendimento trabalhoso. Portanto objetivou-se formular uma ferramenta que pudesse servir de auxílio para cálculos estruturais iniciais do projeto base, a fim de obter rapidamente a resposta para o arranjo estrutural proposto.

Dessa forma foi idealizada uma planilha de cálculo usando as regras “DNV Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft July 2015” (

VERITAS, 2015) onde nela variáveis estruturais da lancha poderiam ser fornecidos por um usuário e de forma rápida, a planilha respondesse se aquele conjunto de variáveis davam uma solução viável ou não, também essa planilha forneceria informações de variáveis globais como o peso e volume de solda, de forma que se saberia que o projeto idealizado tinha características melhores ou piores que o original.

Foi escolhido utilizar a regra da sociedade classificadora DNV ao invés de um modelo de elementos finitos (FEM) por essa otimização ter como alvo a otimização de uma pequena embarcação e não se ter tempo e recursos para análise de FEM.

Assim, de forma instantânea, poderia se avaliar o quão diferente o projeto proposto seria do projeto original. Porém, avaliar de forma manual cada projeto possível seria uma tarefa humanamente impossível. Assim o uso de um software de otimização chamado ModeFrontier (ESTECO, 2023) seria necessário de forma a aplicar a otimização na planilha anteriormente idealizada.

O presente trabalho tem como objetivo usar um projeto estrutural de embarcação patrulha existente (tendo informações básicas dela como o arranjo geral e topologia da seção mestra) para aplicar uma metodologia de otimização estrutural baseada na regra da DNV (VERITAS, 2015), para assim determinar o melhor algoritmo de otimização para o problema em questão, assim como obter a melhor configuração visando minimização do peso da estrutura, por ser a variável que classicamente é otimizada nesse tipo de otimização (CAPRACE, 2011), assim como o volume de solda, pois representaria de certa forma os custos da mão de obra mais significativa na indústria naval (BAPTISTA, 2018).

A seguir no desenvolvimento da dissertação, os seguintes tópicos serão abordados:

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a ligação entre projeto e otimização, otimização, projeto estrutural de embarcações e falhas comuns delas.

O capítulo 3 apresenta o desenvolvimento da metodologia proposta para solução do problema proposto usando uma planilha de cálculo baseada na regra da DNV, assim como conceitos fundamentais da engenharia naval e um software de otimização chamado ModeFrontier.

O capítulo 4 apresenta os resultados gerados pela aplicação da metodologia proposta onde são identificados os algoritmos melhores para o problema, assim como a comparação do resultado final otimizado com o projeto original.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas e propõem sugestões de trabalhos futuros.

2 CONCEITOS GERAIS

Nesta revisão bibliográfica foi pesquisado assuntos mais relevantes para a dissertação proposta. Foi feito um apanhado geral dos trabalhos mais relevantes.

2.1 Relação entre Projeto e Otimização

Quando se fala em otimização, é importante ter uma clara definição do estágio de projeto que é considerada no projeto do navio. Dependendo de qual estágio do projeto esteja, a otimização será completamente diferente.

O projeto do navio é apresentado normalmente em livros através de termos como “loop de projeto” ou “espiral de projeto”. Pode-se identificar facilmente várias tarefas técnicas no projeto, entre as quais (CAPRACE, 2011):

- Dimensões principais
- Forma do casco e resistência
- Arranjo geral
- Propulsão
- Estrutura (material, escantilhamento, módulo de seção do casco, peso, centro de gravidade)
- Estabilidade e Manobrabilidade
- Custo
- Segurança (regras de classificação, IMO, SOLAS, etc.)
- Etc

Todas essas tarefas são fundamentais para se atingir um projeto do navio confiável, e nenhum desses passos pode ser desconsiderado. Abaixo é mostrado uma espiral típica de um projeto de navio:

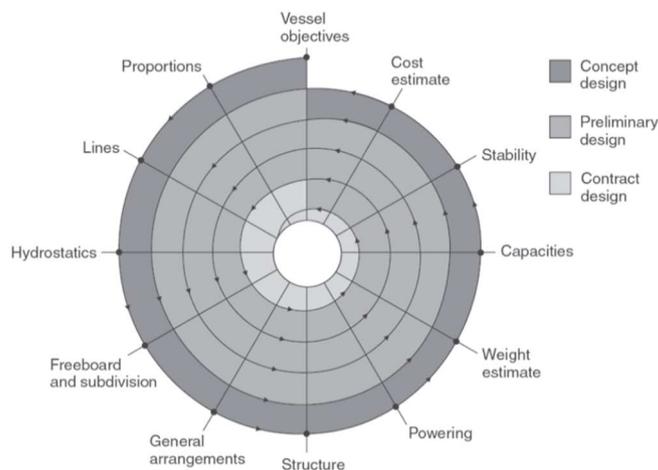
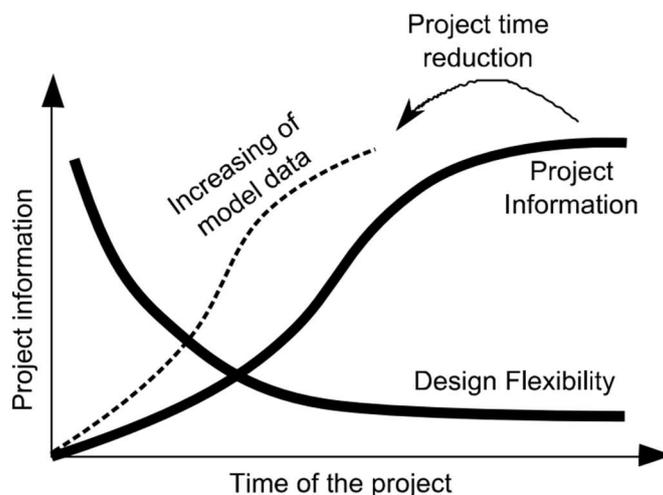


Figura 2 - Típica espiral de projeto apresentada em muitos livros (EYRES)

É conhecido que quanto mais se avança no projeto, mais informações sobre ele são obtidas, porém mais dificultoso se torna fazer mudanças no projeto.



Conceptual Design	Basic Design	Detailed Design
Strategical Decision	Tactical Decision	Operational Decision
2-3 weeks	2-3 months	5-10 months

Figura 3 - Estágio do projeto na indústria de construção (CAPRACE, 2010)

A otimização do projeto do navio já é uma tarefa natural que arquitetos navais tentam realizar durante os vários “loops” na espiral do projeto. Cada “loop” pode ser

considerado como uma iteração do processo de otimização, mas quando especialistas são chamados, essas otimizações se tornam apenas locais. Quando se fala em otimização local, se refere a otimização de apenas um assunto do projeto (hidrodinâmica, propulsão, estrutura, segurança, etc). Como por exemplo, é comum considerar a forma do casco e o arranjo geral como fixos quando se otimiza a estrutura do navio.

Porém é bem óbvio que não é adequado nem eficiente realizar otimizações locais abordando um assunto do projeto a cada vez, o ideal seria realizar as otimizações de forma simultânea, pois matemáticos tem demonstrado que a realização de otimizações locais não leva a otimização global. (CAPRACE, 2011).

Por outro lado, está claro hoje em dia que é impossível realizar a otimização global, pela limitação da tecnologia disponível na indústria naval. Então a solução comumente adotada é adotar uma série de otimizações locais. No trabalho será adotada uma otimização numa área específica, que é a otimização estrutural.

O projeto tradicional do navio tem sido baseado na abordagem sequencial e iterativa. O primeiro estudo de otimização estrutural foi feito por (HARLANDER, 1960). Então, com a ajuda dos computadores, pesquisadores tentaram aperfeiçoar, tanto as técnicas de projeto, como os algoritmos de otimização. A otimização, aparece em trabalhos como do (EVANS e KHOUSHY) e (NOWACKI, BRUSIS e SWIFT, 1970). Alguns anos depois, um importante passo na otimização de estruturas marítimas foi dado por (HUGHES, 1988).

A uns 40 anos atrás as ferramentas de otimização focavam em apenas um único limitado aspecto da otimização (ex: forma, propulsão, tensão última etc), hoje em dia, as essas ferramentas tendem adotar ferramentas mais acopladas.

A evolução das técnicas de projeto e otimização foram bem descritas por diversos autores como (RIGO, 2003), que decidiam usar um modelo de otimização de multicritério que incorporava peso e custo de produção. Todos esses autores, entretanto, são unânimes no pensamento que apenas um objetivo apenas, não é o suficiente para modelar de forma acurada a estrutura. (CAPRACE, 2011)

O período do Projeto preliminar é o mais relevante e o mais efetivo para modificar o escantilhamento e testar diferentes alternativas. Quanto mais rapidamente uma informação é obtida, melhores decisões podem ser tomadas no processo do projeto.

Aqui é importante identificar os 3 passos no processo do projeto, que são focados em diferentes partes da estrutura do navio e, portanto, possuem diferentes necessidades e tipos de otimizações necessárias:

- Estágio do Projeto Conceitual
- Estágio do Projeto Básico
- Estágio do Detalhamento do Projeto

2.1.1 Estágio do projeto conceitual

O estágio do projeto básico tem algumas características como afirma (CAPRACE, 2011):

- Ter poucos dados disponíveis
- Esse estágio pode durar poucas semanas ou até meses dependendo do projeto.
- É feito pelo grupo de arquitetura naval que normalmente não conta com ferramentas numéricas avançadas (como ferramentas de otimização)
- O foco estrutural nesse caso está mais limitado a seleção do material da estrutura, assim como a estimativa do peso e posição do centro de gravidade
- Principal foco na eficiência propulsiva e peso global (peso aqui é uma relevante medida de custo global, porém essa ideia é errada se for pensado em custo de produção, uma vez que se pode construir por exemplo uma estrutura mais leve com muitos flanges e assim muito mais mão de obra de soldagem do que seria necessário para construção de uma estrutura mais pesada, porém usando perfis de barra chata que exigem menos mão de obra de soldagem).

Portanto o estágio conceitual não será o objeto da otimização proposta tendo em vista que já se possui forma, dimensões principais e materiais escolhidos para o projeto.

2.1.2 Estágio do projeto básico

O estágio do projeto básico tem algumas características como diz (CAPRACE, 2011):

- Realizado no estágio tenro e é finalizado no contrato (se houver).
- Realizado em alguns meses (2-3 meses).
- Existem mais informação disponíveis, mas falta muitas.

- Primeiros cálculos estruturais dependendo de regras de sociedades classificadoras.

- Construção da primeira análise estrutural 3D.

- Grande potencial para a economia dos custos, mas ainda existem muitas incertezas.

- Aqui é obtido o primeiro modelo CAD para se obter a avaliação da estabilidade.

- A fadiga, vibração e ruído não são considerados com muito detalhamento.

- Aqui é a última chance da otimização estrutural, considerando aspectos de produção.

O projeto básico será o objeto da otimização proposta tendo em vista que já se possui forma, dimensões principais e materiais escolhidos para o projeto e aqui se deve fazer os primeiros cálculos estruturais dependendo de regras de sociedade classificadoras.

2.1.3 Estágio do projeto detalhado

O estágio do projeto detalhado tem algumas características como afirmado por (CAPRACE, 2011):

- Começa quando o contrato é assinado.

- Realizado ao longo de muitos meses (de 5 a 10 meses) e com necessidade de uma grande equipe de projeto.

- As informações necessárias ao projeto estão normalmente disponíveis

- Esse estágio é baseado muito mais na avaliação do que foi projetado do que propriamente no projeto em si.

- Nessa etapa é extremamente difícil executar um processo de otimização.

Portanto esse estágio não será usado como base para o processo de otimização proposto na metodologia mais à frente.

2.2 Fundamentos da otimização

Otimização visa a busca da configuração ideal de um sistema, enquanto algumas restrições são satisfeitas. Esse conceito pode ser encontrado na vida prática. (VANDERPLAATS, 1999)

O ser humano ao longo da história, rodeado pela natureza e suas dificuldades, sempre procurou executar suas tarefas da forma mais eficiente com pouco gasto de

energia. Para esse fim criou diversas ferramentas ao longo da história, como a roda e a máquina de içar pesos, estas ajudaram a otimização das suas atividades. (HAFTKA, 1992)

O projeto estrutural é uma atividade laboriosa que é iniciada com a definição da forma, depois parte para a topologia estrutural, para depois a definição dos elementos dessa topologia, com seus posicionamentos e espessuras. Dentro desse projeto estrutural é importante a definição de qual característica da topologia estrutural será otimizada. A indústria aeroespacial foi a primeira a priorizar o peso ao invés do custo nos seus projetos estruturais. Porém outras como a civil e mecânica, o custo costuma ser a prioridade. Hoje em dia cresce cada vez mais a escassez de matérias primas, assim a otimização do peso e custo com maior eficiência se torna importante em muitas áreas da engenharia. Essa demanda faz engenheiros cada vez mais buscarem técnicas de otimização visando redução de peso e custo. No trabalho proposto o custo foi substituído pelo volume de solda, por ser de mais simples descrição e ser uma variável que representa um dos custos de mão de obra mais relevante na construção naval (BAPTISTA, 2018).

Dentro do contexto de otimização, a otimização matemática torna-se importante na resolução desses problemas da engenharia.

2.2.1 Função otimização e otimização paramétrica

Antes do advento dos computadores de alta velocidade, muitas soluções de problemas de análise estrutural eram baseadas em formulações que aplicavam equações diferenciais. Essas equações eram resolvidas analiticamente, utilizando séries infinitas, com uso ocasional de métodos numéricos apenas no final do processo. Os desconhecidos eram funções, representando deslocamentos, tensões, etc., definidos em um espaço contínuo.

No final dos anos 50 e início dos anos 60, os computadores tiveram uma profunda influência nos procedimentos de solução de análise estrutural. Técnicas adequadas para implementação computacional, em particular o "método dos elementos finitos", tornaram-se dominantes. O método dos elementos finitos discretiza a estrutura no estágio inicial da análise, de modo que as variáveis desconhecidas são os valores discretos dos deslocamentos e tensões nos nós do modelo de elemento finito, em vez de funções. As equações diferenciais, resolvidas pelos antigos analistas como sistemas de equações diferenciais, são substituídas por variáveis que descrevem a discretização do sistema.

Transformação semelhante começou a acontecer no início dos anos 60 no campo da otimização estrutural. Quando se está otimizando uma estrutura discretizada por elementos finitos, é natural discretizar as propriedades estruturais que serão otimizadas. Se por exemplo considerar a modelagem de uma viga. Uma solução por elementos finitos começa dividindo a viga em segmentos de propriedade constante ou elementos finitos. Uma otimização dessa mesma viga seria naturalmente usar os momentos de inercia dos segmentos, espessura do flange e espessura da alma como parâmetros de projeto. Então, ao invés de procurar uma função ótima, nós iríamos procurar os ótimos valores de um número de parâmetros. No caso do trabalho proposto, não se usou o método dos elementos finitos, porém se objetivou minimizar Peso e Volume de Solda alterando 31 parâmetros que assim alcançariam seus valores ótimos, sem ter necessariamente uma função contínua que descrevesse a relação deles com o Peso e Volume de Solda. A disciplina matemática que lida com otimização é chamada de programação matemática.

Como em muitas ferramentas de otimização, para se otimizar a estrutura do navio são necessários os seguintes elementos (HAFTKA, 1992):

- Funções objetivo
- Variáveis de projeto
- Restrições de projeto

O entendimento desses elementos foi fundamental para a criação da metodologia como explicado mais a frente, uma vez que se escolheu como funções objetivo o Peso e Volume de solda, as variáveis de projeto foram representadas por medidas de elementos estruturais da seção mestra e as restrições foram pautadas pela regra da DNV.

Também se faz necessário o uso de um algoritmo de otimização dos quais podem ter as seguintes abordagens (CAPRACE, 2011):

- Matemática (simplex, steepest descent, SQP etc)
- Heurística (estratégias evolucionárias, algoritmos genéticos, algoritmos de redes neurais, etc)

2.2.2 Funções Objetivo

A função objetivo é usada para medir o desempenho de um sistema. Essa função depende das variáveis de projeto de forma implícita ou explícita e pode ser avaliada usando expressões numéricas ou fórmulas matemáticas.

Em um problema de otimização na área estrutural, peso, deslocamentos, tensões, frequências de vibração, carregamentos para flambagem, e custo ou alguma combinação destes podem ser usadas como funções objetivo.

A otimização que possui mais de um objetivo, ela é chamada de otimização de multicritério e pode ser representada da seguinte forma:

$$F(x) \text{ ou } F(x) = \{f_1(x), f_2(x) \dots f_n(x)\} \quad (1)$$

Lidar com funções multiobjetivo pode ser complicado, uma vez que a minimização de uma variável pode levar ao aumento de outra. Existem duas formas intuitivas de reduzir o número de funções objetivo para uma. A primeira é juntando todas as funções em apenas uma e dando um peso a cada componente da função como por exemplo, querendo otimizar Peso(P), Custo(C) e Tensão Máxima(S):

$$F(P, C, S) = P \cdot \alpha_1 + C \cdot \alpha_2 + S \cdot \alpha_3 \quad (2)$$

Onde α_1 , α_2 e α_3 são os pesos das funções objetivo.

A segunda maneira mais intuitiva de reduzir o número das funções objetivos, é selecionar a função mais importante como a única função objetivo e impor limites para as outras funções.

No trabalho desenvolvido se optou pelo uso de 2 funções objetivos (Peso e Volume de Solda) que tinham igual importância na solução final. Assim não foi escolhido reduzir as funções objetivos para apenas uma, ao invés disso foi usado a otimização de Pareto, que apresenta normalmente um conjunto de soluções ótimas ao invés de apenas uma, e que será explicado em mais detalhes na seção 2.2.9.

Num problema de otimização estrutural pode-se procurar minimizar uma função ou maximizá-la, esses problemas na verdade são semelhantes, pois pode-se inverter o sinal da função. Em problemas de otimização é comum minimizar a função, como a que foi feito no trabalho proposto.

2.2.3 Variáveis de projeto

As variáveis de projeto são uma lista de variáveis que caracterizam o projeto que será otimizado, elas podem ser contínuas ou discretas. Essas variáveis são representadas por uma matriz coluna:

$$X = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ x_n \end{Bmatrix} \quad (3)$$

As variáveis de projeto podem ser a espessura de uma chapa, módulo de seção de uma viga, posicionamento de um longitudinal, o tipo de reforçador (bulbo, T, L) como também outros parâmetros que controlarão a estrutura global como o módulo de elasticidade, a densidade do material entre outros.

Os problemas de otimização estrutural podem ser caracterizados com poucas variáveis (10-50) quando por exemplo, somente as dimensões principais e alguns parâmetros são selecionados, como é o caso do trabalho aqui desenvolvido. Porém podem também ser caracterizados com número maior de variáveis (100-1000), normalmente esse tipo de seleção com mais variáveis ocorre quando as dimensões principais de cada elemento são consideradas como variáveis independentes de projeto.

A seleção da quantidade de variáveis vai depender intrinsecamente do objetivo da otimização e do estágio do projeto da mesma. Foram escolhidas para esse trabalho 31 variáveis baseadas nos elementos estruturais de seção mestra do projeto original.

2.2.4 Restrições de projeto

As restrições de projeto se referem principalmente a limites físicos ou matemáticos definidos, e tem o objetivo de chegar a uma solução viável no final da otimização. A escolha das restrições e sua correta modelagem é uma tarefa difícil no processo de otimização. Para ter uma solução viável, do ponto de vista técnico industrial, todas as restrições de projeto devem ser respeitadas, essas restrições podem ser de qualquer natureza, dentre elas (CAPRACE, 2011):

- Restrições tecnológicas (ou restrições laterais) são as que estabelecem limites inferiores e superiores as variáveis de projeto. Neste trabalho essas restrições foram usadas para restringir a uma tabela de uso comercial, a escolha de espessuras de chapas e reforçadores. Esta restrição foi usada também quando elementos estruturais foram restritos devido a uma espessura mínima de regra ou módulo de seção mínimo de regra.

- Restrições geométricas impõem relação entre as variáveis de projeto com o objetivo de garantir uma estrutura que seja funcional, viável e também confiável. Geralmente são baseadas na experiência de experts no assunto, e tem como objetivo evitar falhas locais na estrutura ou garantir uma boa qualidade ou facilidade de acesso a soldas. Essa restrição foi usada nesse trabalho ao se estabelecer limites inferiores e superiores no valor de comprimentos de flanges e almas de elementos estruturais.

- Restrições estruturais são restrições que ajudam a evitar o escoamento, flambagem, trincas etc e ajudam a limitar a deflexão, tensão etc. Essas restrições são baseadas nos fenômenos da mecânica dos sólidos e são modelados com equações racionais. As restrições estruturais foram usadas nesse trabalho quando o mesmo avalia: tensões máximas de flambagem, tensão de cisalhamento e tensão normal.

- Restrições globais impõem limitações como ao centro de gravidade para garantir a estabilidade, o custo de fabricação para assegurar a produtividade ou a módulo de seção para assegurar o comprimento de regras de sociedades classificadoras. No trabalho o centro de gravidade teve como tolerável a variação máxima de 1m em relação a sua posição no projeto original, também o módulo de seção foi verificado segundo a regra.

- Restrições de igualdade são usadas para evitar descontinuidades nas variáveis de projeto e também estabelecer padronização. Nesse trabalho seu uso se deu quando por exemplo, mudou a espessura do flange para zero, toda vez que o comprimento do flange fosse zero também.

São exemplos de restrições, as que impõem limites superiores ou inferiores nas suas quantidades e são chamadas restrições de desigualdade:

$$g_j(x) \leq 0 \quad (4)$$

As restrições de igualdade são aquelas que impõem um valor específico a uma variável, como exemplo o deslocamento de um nó só podendo ser zero:

$$s(x) = 0 \quad (5)$$

As restrições laterais limitam por cima e por baixo os valores de uma variável.

2.2.5 Algoritmo de abordagem matemática

O algoritmo de aproximação matemática usa puramente abordagens determinísticas, assim esse algoritmo parte de um ponto inicial de projeto (viável ou não) e visa buscar a melhor direção de evolução do projeto. Pode-se citar de exemplo os métodos “simplex”, “steepest descente”, “BFGS”, “SQP”, “dupla aproximação” etc. Mesmo com centenas de variáveis de projeto e milhares de restrições, a convergência de domínio viável é alcançada com 10 iterações (significa 10 reanálises do problema real). Tem-se assim as principais características (CAPRACE, 2011):

- Converge para uma solução ótima num subespaço do espaço de busca (ótimo local), que pode ou não ser a solução ótima do espaço inteiro de busca (ótimo global) do problema.

- Eles requerem esforços custosos para encontrar a primeira derivada das restrições. Existem métodos que não requerem o cálculo da primeira derivada, porém o custo por isso são mais iterações.

- A solução depende do projeto inicial pois esse é um processo convergente.

- Esse tipo de algoritmo é adequado para variáveis de projeto contínuas. As variáveis discretas induzem a algumas dificuldades.

- Ele necessita uma estimativa limpa e confiável das funções e suas derivadas.

- Possui uma rápida convergência (com 5 a 10 iterações) que compensa os esforços custosos do cálculo dos gradientes.

Por não se ter fórmulas analíticas para descrição das funções objetivo e ser impossível obter suas derivadas, o trabalho proposto não usou essa abordagem, apenas se restringiu a estudá-la.

2.2.6 Algoritmo de abordagem Heurística ou Estocástica

Esses tipos de algoritmos fornecem mais chance de se atingir uma solução ótima depois de suficientes tentativas. Dentre as principais características desses tipos de algoritmo pode-se citar (CAPRACE, 2011):

- Eles são um pouco mais fáceis do que os matemáticos de ser implementados, mesmo precisando de certa calibração para se alcançar a convergência mais rápido para problemas específicos.

- Eles são mais genéricos e o mesmo algoritmo tem aplicações em várias áreas.

- São bem eficientes se o número de soluções for limitado (que significa pouco número de variáveis).

- Esses algoritmos não dependem do ponto inicial de projeto.

- São mais suscetíveis a achar uma aproximação aceitável ao ótimo global através de um processamento de cálculo razoável.

- Esses algoritmos são eficientes com a otimização multiobjetivo para encontrar um bom valor para a otimização de Pareto que será explicado mais à frente.

- São muito mais eficientes com variáveis discretas que contínuas.

- São mais robustos com relação as falhas de acurácia das análises.

Dentre os métodos usados nesse algoritmo pode-se citar o “simulated annealing” (que é baseado na termodinâmica que usa a analogia da minimização de energia de sistemas físicos baseados na lei de Boltzmann), o algoritmo genético (baseado na lei de seleção natural), “particle swarm” etc.

A seguir será explicado o método do algoritmo genético que é um dos métodos de aproximação heurístico, nesse trabalho foram testados cinco algoritmos genéticos diferentes disponíveis no programa ModeFrontier.

2.2.7 Algoritmo genético

Os algoritmos genéticos recentemente receberam considerável atenção devido ao seu potencial como novas técnicas de otimização. Usando algoritmos genéticos, é mais fácil alcançar o melhor resultado global do que com algumas técnicas de otimização tradicionais. Outra grande vantagem é que eles podem ser aplicados a problemas de otimização com variáveis de projeto discretas.

Os algoritmos genéticos utilizam técnicas provenientes da biologia e se baseiam no princípio da teoria de Darwin da sobrevivência do mais adaptado. Quando uma população de criaturas biológicas é permitida a evoluir ao longo de gerações, características individuais úteis para a sobrevivência tendem a ser transmitidas para as gerações futuras, porque indivíduos com essas características têm mais chances de sobreviver. Essas características individuais nas populações biológicas são registradas

nos cromossomos. Os mecanismos das operações genéticas são baseados em operações que resultam em trocas estruturadas, mas aleatórias, de informações genéticas (como características úteis) entre os cromossomos dos pais que os reproduziram, e consistem em reprodução, cruzamento, mutação ocasional e inversão das linhas de cromossomos.

Os algoritmos genéticos, desenvolvidos por (HOLLAND, 1992), simulam os mecanismos da genética natural por meio de sistemas artificiais baseados em operações que são análogas aos naturais (sendo até mesmo chamadas pelos mesmos nomes) e são amplamente utilizados como algoritmos para busca de múltiplas variáveis. Como será descrito nos parágrafos seguintes, essas operações exigem uma programação simples, trocas aleatórias de localização de números em um cromossomo (*string*) e, portanto, no início, parecem uma busca aleatória de um extremo em um espaço parametrizado baseado apenas em funções. No entanto, os algoritmos genéticos já foram experimentalmente comprovados e são robustos. Aqui será discutida a representação genética de um problema de minimização, com foco nos mecanismos de três operações genéticas comumente usadas: reprodução, cruzamento e mutação.

A aplicação dos operadores do algoritmo genético de um problema de busca, primeiro necessita a representação das possíveis combinações das variáveis em termo das cadeias de “bits” homólogas a dos cromossomos. Para avaliar quão boa é uma combinação de genes, faz-se uso da função objetivo do problema de busca. Como exemplo, pode-se citar o problema abaixo:

$$\text{minimizar } f(x), \quad x = \{x_1, x_2, x_3, x_4\} \quad (6)$$

A representação do cromossomo binário do espaço variável pode ser da forma:

$$\underbrace{0\ 1\ 1\ 0}_{x_1} \underbrace{1\ 0\ 1}_{x_2} \underbrace{1\ 1}_{x_3} \underbrace{1\ 0\ 1\ 1}_{x_4} \quad (7)$$

Onde os cromossomos (*strings*) equivalentes as variáveis individuais são conectadas na forma cabeça-para-calda (*head-to-tail*), e, nesse exemplo, os valores para base 10 são os seguintes: $x_1 = 6$, $x_2 = 5$, $x_3 = 3$, $x_4 = 11$, e suas faixas de valores correspondem a $\{15 \geq x_1, x_4 \geq 0\}$, $\{7 \geq x_2 \geq 0\}$ e $\{3 \geq x_3 \geq 0\}$. Por causa da representação por cadeias de “bits”, o algoritmo genético é adequado para problemas que as variáveis são discretas ou inteiras. Para problemas onde a variável de projeto são

continuas com a faixa de valores $x_i^U \leq x_i \leq x_i^L$, será necessária uma grande quantidade de *bits* para representar as variáveis com precisão. O número de *bits* necessários depende da acurácia requerida para a solução final. Por exemplo, se a variável é definida com a faixa de $\{0.01 \leq x_i \leq 1.81\}$ e a acurácia necessária para o valor final é $x^{incr} = 0.001$, então o número de dígitos binários para uma apropriada representação pode ser calculado por:

$$2^m \geq ((x_i^U - x_i^L)/x^{incr} + 1) \quad (8)$$

Onde “m” é o número de dígitos. Nesse exemplo, o número mínimo de dígitos que satisfazem o requisito seria $m = 11$, que na verdade produz incrementos de 0.0087 no valor da variável, ao invés do valor de 0.001.

O algoritmo genético trabalha com uma população de cromossomos. Este aspecto do algoritmo genético é responsável por capturar soluções próximas as globais, através de manter muitos pontos de solução que tem potencial de estar próximo do mínimo (local ou global) na pesquisa (*pool*) durante o processo de busca, ao invés de escolher um ponto no início do processo que pode ficar travado em um mínimo local. Trabalhar em uma população de projetos sugerem a possibilidade de implementação em computadores paralelos. Entretanto, o conceito de paralelismo é mais básico ainda para algoritmos genéticos nos quais a seleção evolucionária pode melhorar em paralelo muitas características diferentes no projeto. Também vale citar, que o resultado da busca genética é uma população de bons projetos, ao invés de um único projeto. Esse aspecto pode ser bem útil para o projetista.

Inicialmente o tamanho da população é escolhido e os valores das variáveis em cada cromossomo são decididas randomicamente escolhendo entre 0 e 1 nos bits. O próximo importante passo é a reprodução, em que cromossomos (*strings*) individuais com um valor bom da função objetivo são copiados para formar uma nova população, que seria uma versão artificial da sobrevivência do mais forte. O viés na direção dos cromossomos (*strings*) com melhor performance pode ser alcançado através do aumento da probabilidade da seleção deles em relação ao resto da população. Uma forma de alcançar isso é criando roletas enviesadas onde cromossomos individuais ocupam áreas proporcionais aos seus valores da função em relação ao valor da função cumulativa da

população inteira. Portanto, a população resultante da operação de reprodução seria ter múltiplas cópias de indivíduos altamente ajustados.

Uma vez que a nova população é gerada, os membros são emparelhados randomicamente para cruzamento. O acasalamento do par também é feito randomicamente. Um número inteiro aleatório k entre 1 e $L-1$, onde L é o tamanho do cromossomo (*string*), é selecionado e duas novas linhas são geradas pela troca de 0 e 1 que vem depois da posição do “ k ” no primeiro pai com a correspondente localização do segundo pai. Como exemplo, os dois cromossomos (*strings*) de tamanho $L = 9$:

Pai 1: 0 1 1 0 1 || 0 1 1 1

Pai 2: 0 1 0 0 1 || 0 0 0 1

Eles são cruzados com um ponto de cruzamento $k = 5$, os filhos terão a seguinte composição:

Filho 1: 0 1 1 0 1 0 0 0 1

Filho 2: 0 1 0 0 1 0 1 1 1

Muitos pontos de cruzamento nos quais informações entre os dois pais são trocadas entre mais seguimentos de cromossomos (*strings*) também são possíveis, mas por causa da mistura de cromossomos o cruzamento se torna um processo mais aleatório e a performance do algoritmo pode decair (HAFTKA, 1992).

Mutações servem como uma importante ferramenta para prevenir a prematura perda de informação genética através da ocasional introdução de randômica alteração do cromossomo. Como mencionado anteriormente, no final da reprodução é possível ter populações com múltiplas cópias do mesmo cromossomo. No pior dos casos, é possível ter o agrupamento inteiro feito do mesmo cromossomo (*string*). Nesses casos, o algoritmo deve ter possibilidade de procurar uma solução melhor. Mutações previnem essa uniformidade, e é implementada através da seleção randômica de uma localização do cromossomo e sua alteração do valor 0 para 1, ou vice-versa. Baseado na pouca ocorrência em sistemas biológicos e em experimentos numéricos, o papel da operação da mutação genética na performance do algoritmo genético se torna um efeito secundário. (GOLBERG, 1989) sugere uma taxa de mutação de uma em um milhão de operações com bits.

2.2.8 Da otimização única à multiobjetivo

Depois de cada *loop* de projeto da espiral de projeto, um novo projeto é gerado (a princípio um projeto mais eficiente), que pode ser avaliado por exemplo, a respeito de propulsão, estabilidade, peso, custos, etc. Um engenheiro experiente normalmente já avalia na própria mente vários desses critérios cada vez que algo vai se alterando no projeto. Isso de fato é algo complicado para engenheiros não experientes, por isso desde os anos 60, matemáticos e engenheiros têm tentado criar modelos numéricos computacionais de forma a ajudar arquitetos navais.

A primeira tentativa de otimização estrutural de navios foi o peso. Engenheiros obtiveram resultados, porém não foram aplicados a indústria. Um objeto tão complexo de se projetar como um navio, não pode ser otimizado segundo um único objetivo, assim o mais adequado seria transformar a otimização em multicritério para abranger tamanha complexidade, nele, muitas das vezes os critérios são entre si antagônicos, exemplos são: navio confiável estruturalmente x minimização de peso e custo, resistência hidrodinâmica x maior capacidade de carga. Assim a otimização de multicritério não produz uma única variante de solução, mas gera um conjunto de soluções de compromisso (infinitas no geral).

Deve ser dada a devida atenção ao fato que o ciclo de vida de custo do projeto do navio em geral inclui manutenção, custos de serviços previstos, e custos de descomissionamento e descarte da estrutura.

Vale a pena mencionar que o custo como base de comparação é muito maleável, e constantemente se altera devido a fatores sociais e econômicos assim como a relação mútua entre custos de componentes e serviços. Isso de certa forma leva muitas das vezes a redução da importância do critério com base no custo e leva a critérios que não tem o custo como base como peso (usado no trabalho) ou volume da estrutura, usados como que representantes do custo do material.

Porém, outros critérios podem ser também adotados de forma mais objetiva do custo, como por exemplo as que tentam representar de forma aproximada o trabalho necessário para a construção ou o trabalho ou dificuldade de manutenção, através de volume de soldas, número de conexões para um dado projeto estrutural etc. Assim, o trabalho proposto preferiu usar a variável volume de solda ao invés do custo, por poder ser descrita sem influência de fatores econômicos ou sociais, dependendo somente da geometria do projeto.

O critério de otimização de apenas um critério é normalmente formulado da seguinte maneira (SEKULSKI, 2009):

$$\min_x F(\vec{x}) = F_1(\vec{x}) \text{ com } \vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \quad (9)$$

Sujeito restrições de igualdade e desigualdade:

$$h_i(\vec{x}) = 0, \quad i = 1, \dots, I \quad g_j(\vec{x}) \geq 0, \quad j = 1, \dots, J \quad (10)$$

Nesse caso, existe apenas um único critério de otimização ou função objetivo $F_1(\vec{x})$ que depende de um número “N” de variáveis independentes desconhecidas no vetor \vec{x} .

O problema no caso está sujeito a “I” restrições de igualdades e “J” restrições de desigualdade representadas pelas funções $h_i(\vec{x})$ e $g_j(\vec{x})$ respectivamente. Normalmente se busca a minimização da função $F_1(\vec{x})$, porque mesmo o problema de maximização da função pode ser calculado minimizando a inversa da função.

A otimização de multiobjetivo é aquela que dois ou mais critérios incluídos são medidos em diferentes unidades e, portanto, não existe uma maneira aceitável de transformá-los num valor único a se otimizar. No projeto de navios por exemplo, pode-se tomar o exemplo de tentar otimizar o peso e o custo ao mesmo tempo, tentando minimizar ambos.

A otimização de multicritério envolve problemas com número $K > 1$ (sendo K igual ao número de funções objetivo) e pode ser formulado conforme descrito por (CAPRACE, 2011):

$$\min_x \vec{F}(\vec{x}) = [F_1(\vec{x}), F_2(\vec{x}), \dots, F_k(\vec{x})] \quad (11)$$

Com:

$$\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \quad (12)$$

Sujeitos as seguintes restrições de igualdade e desigualdade:

$$h_i(\vec{x}) = 0, \quad i = 1, \dots, I \quad g_j(\vec{x}) \geq 0, \quad j = 1, \dots, J \quad (13)$$

Onde existem “K” múltiplas funções de otimização desde $F_1(\vec{x})$ até $F_k(\vec{x})$ que dependem cada uma de “N” variáveis desconhecidas no vetor \vec{x} . Normalmente o problema não tem uma única solução devido a conflitos entre critérios “K”.

2.2.9 Otimização de Pareto

Quando se trabalha com múltiplos critérios que tem conflitos entre si, a otimização de Pareto é uma medida amplamente aceita para se avaliar problemas que tem multiobjetivos. Esse problema foi exposto pela primeira vez pelo economista Italiano-Frances V. Pareto em 1906. Hoje em dia é conhecida como Otimização de Pareto e tem a seguinte definição: *Uma solução é considerada otimização de Pareto se satisfaz as restrições de forma que nenhum critério pode ser melhorado sem prejudicar pelo menos um dos outros critérios.* É importante notar que a afirmação anterior enfatiza o conflito ou interação competitiva entre critérios. Normalmente as definições vão resultar em um conjunto de soluções ótimas ao invés de solução única.

O projeto estrutural do navio pode ser chamado de ótimo de Pareto quando está sob a condição que nenhuma variação da estrutura poderia ser melhor com respeito a um critério, enquanto ao mesmo tempo ser boa suficiente com respeito a todos os outros critérios a serem otimizados. Isso quer dizer, que nenhuma variante da solução pode ser melhorada sem que simultaneamente piore pelo menos um critério. Uma variação de projeto da estrutura do navio é chamada de não ótima de Pareto, se existe pelo menos alguma outra variação do projeto, que melhore pelo menos um critério enquanto ao mesmo tempo não piore critérios. Essas variantes de projeto são chamadas de dominantes ou inferiores.

A figura abaixo mostra um exemplo da fronteira de Pareto:

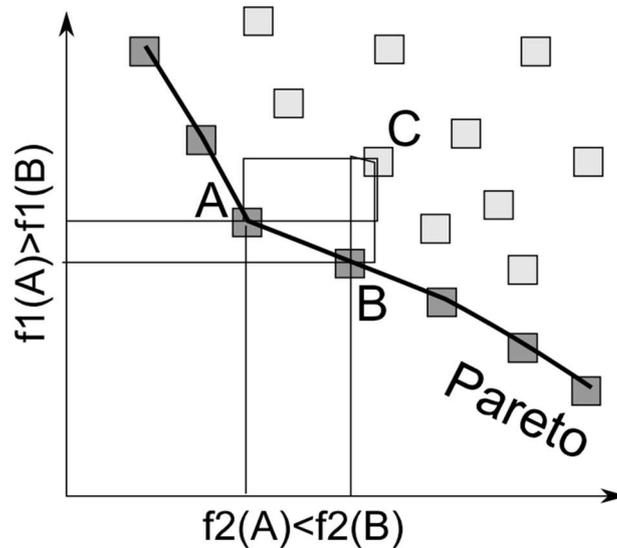


Figura 4 - Exemplo de fronteira de Pareto (CAPRACE, 2011)

Na Figura 4, os quadrados representam as escolhas viáveis, sendo que valores mais baixos são mais preferíveis que valores mais altos. O ponto C não é uma fronteira de Pareto tendo em vista que ele é dominado, tanto pelo ponto B quanto pelo ponto A, ou seja, os pontos A e B tem valores menores de função $f1$ e $f2$ que o ponto C. Já no caso dos pontos A em relação ao B, eles não possuem uma relação de dominância entre si, tendo em vista que o ponto B tem $f2(B)$ maior que $f2(A)$, e o ponto A tem $f1(A)$ maior que $f1(B)$, por isso, eles estão na fronteira de Pareto, pois andando nela não há uma relação de dominância entre as soluções propostas. É claro que isso é fácil de se observar, pois, o problema proposto é de 2 funções de otimização, no caso de haver mais funções para serem avaliadas, essa visualização fica muito mais complicada.

É conhecido que um projeto de engenharia requer um resultado específico para ser implementado, e não um conjunto de soluções fornecido pela otimização de Pareto. A forma mais intuitiva de alcançar uma solução de compromisso através dos critérios concorrentes é entre outros: soma ponderada, o min-max e o mais perto da solução utópica. Essas soluções podem ser obtidas através do critério global:

$$P[F_K(\vec{x})] = \left\{ \sum_{k=1}^K \left[w_k \left| \frac{F_k(\vec{x}) - F_k^0}{F_k^0} \right|^\rho \right] \right\}^{1/\rho} \quad (14)$$

Com:

$$\sum_{k=1}^K w_k = 1 \quad (15)$$

Aqui, tem-se que F_k^0 é o valor do critério F_k obtido quando o critério único é usado para a otimização, ou seja, ele seria o melhor que pode se obter com esse critério sendo considerado sozinho. A função de preferência escalar $P[F_K(\vec{x})]$ substitui $\vec{F}(\vec{x})$ da equação (9) por uma solução numérica.

A solução da soma ponderada resulta da equação (11) quando $\rho = 1$, ao passo que o mais próximo da solução utópica ocorre quando $\rho = 2$ e a solução de min-max ocorre quando $\rho = \infty$. A implementação numérica para a solução min-max usa o equivalente a equação (11) com $\rho = \infty$:

$$P[F_K(\vec{x})] = P[F_k(\vec{x})] = \max \left[w_k \left| \frac{F_k(\vec{x}) - F_k^0}{F_k^0} \right| \right] \quad (16)$$

Além dos exemplos citados, uma solução pode ser obtida para um número de valores de ρ , assim a equipe de projetistas pode decidir qual valor seria a mais adequada para o projeto.

É importante frisar que a fronteira de Pareto deve ser estudada pela equipe de design para que se possa avaliar as possibilidades e escolher a que mais se adequa ao projeto, assim as decisões podem ser baseadas na otimização assim como em múltiplas considerações adicionais, fatores e restrições não incluídas no modelo. Claro que isso só é viável quando existe apenas 2 critérios a se otimizar, quando ultrapassa esse valor se torna impraticável, de difícil visualização e de muito processo computacional.

Para se mapear a fronteira de Pareto, os seguintes 3 métodos podem ser usados:

a) Repetidas soluções de somas ponderadas. Se o espaço da viabilidade da função objetivo for convexo, soluções de soma ponderadas podem ser obtidas através da sistemática variação dos fatores de peso.

b) Repetidas soluções min-max ponderadas. Se a função objetiva viável não tem uma inclinação que exceda w_1/w_2 , soluções min-max ponderadas podem ser obtidas através da sistemática variação do peso.

c) Métodos de otimização multicritério. Implementações multicritério de algoritmos evolucionários (estratégias evolucionarias, algoritmos genéticos etc),

Recozimento simulado, otimização da partícula Swarm etc podem conduzir a fronteira de Pareto.

Os métodos (a) e (b), baseados na escalarização do vetor da função objetivo, tem várias aplicações também nos métodos baseados em estratégias evolucionarias para otimização multiobjetivo, pois permitem o uso de algoritmos de otimização de objetivo único bem pesquisados.

Porém, esses métodos clássicos usados para solucionar problemas de multiobjetivo apresentam as seguintes desvantagens:

- Buscar apenas um único ponto na frente de soluções não dominantes e conseqüentemente resulta a necessidade de fazer várias execuções de cálculo para uma única tarefa de otimização.

- O fato de que o conhecimento especializado é necessário no início para especificar os coeficientes de peso usados para critérios de otimização de componentes.

Os algoritmos de otimização multiobjetivo evolucionária desenvolvidos recentemente tem-se provado de grande eficiência, pois apresentam as seguintes vantagens:

- Procura efetiva no espaço de solução.
- Capacidade de ilustrar a fronteira de soluções não dominante numa única rodada de simulação.
- Procedimento robusto.

Entretanto algoritmos genéticos também tem um alto custo computacional pois necessita de grandes avaliações de aptidão para se chegar numa solução satisfatória.

Para a construção da fronteira de Pareto do projeto proposto, foi escolhido o método de otimização multicritério usando os algoritmos evolucionários disponíveis na ferramenta ModeFrontier. Nessa construção não foi dado importância (peso) diferente as funções objetivo.

2.3 Projeto estrutural de embarcações

A estrutura de uma embarcação pode ser comparada a uma viga com seção vazada, viga por ter a dimensão do comprimento maior que as demais, e ela deve ser forte o suficiente para suportar as cargas que são impostas a ela, tais como a flexão e torsão. Essas cargas são geradas por carregamentos como o peso próprio dela e a configuração da linha de água a qual ela está sujeita. Segundo (KUMAR, 2010) a força dominante

agindo nas estruturas do navio são as forças longitudinais axiais que são devidos aos momentos fletores causados pela distribuição do peso da embarcação e das cargas que ela carrega juntamente com a distribuição de flutuação ao longo do casco. Para servir ao seu propósito a embarcação deve ser construída de material suficiente resistente além de ter seu casco impermeável de proa a popa na região que terá contato com a água. O projetista estrutural tenta tornar a estrutura robusta suficiente de forma que ela seja a mais leve possível.

Podemos chamar de viga navio a estrutura primaria da embarcação, e ela deverá ser forte o suficiente para resistir aos esforços de momentos fletores longitudinais da embarcação, essa aproximação para viga navio foi usada na ferramenta desenvolvida para o cálculo estrutural da lancha patrulha.

2.3.1 Chapeamento reforçado

Em navios, a configuração típica são os painéis reforçados. Os reforçadores desses painéis podem ser perfis laminados (nos formatos T, L ou bulbo etc), esses perfis são soldados diretamente no chapeamento, ou podem ser pré-fabricados, soldados a partir de chapas, e posteriormente soldados no chapeamento. O chapeamento apresenta normalmente a orientação dos reforçadores na direção ortogonal entre eles, com o objetivo de maior eficiência estrutural para diminuição do peso.

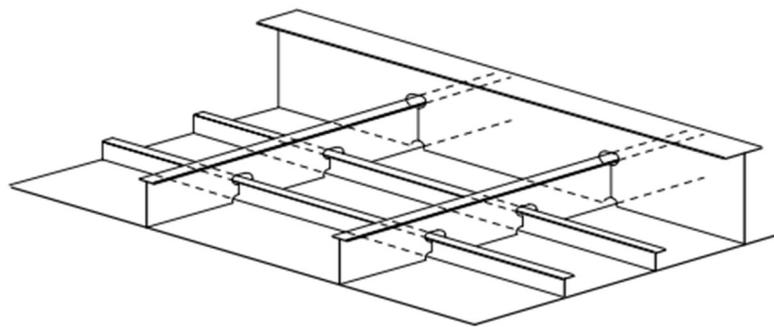


Figura 5 - Exemplo de chapeamento reforçado

Aqui é importante citar que os três tipos de chapeamentos reforçados mais comumente usados são segundo RAHMAN, 1996:

- Reforçado em T (usado no trabalho proposto)
- Reforçado com barra chata (usado no trabalho proposto)

- Corrugado (não utilizado no trabalho proposto)

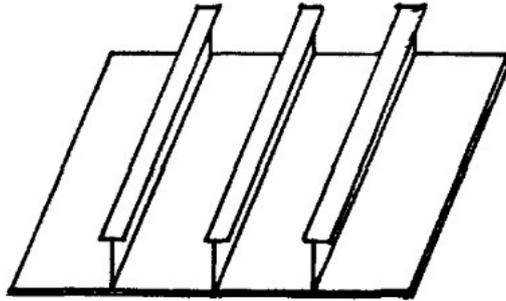


Figura 6 - Chapeamento reforçado em "T" (RAHMAN, 1996)

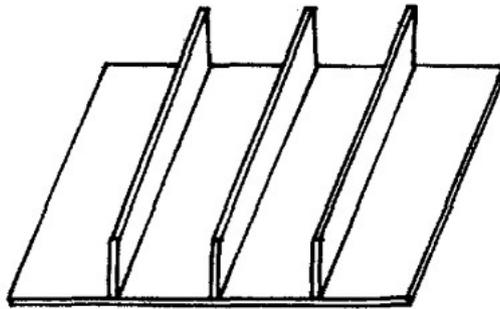


Figura 7 - Chapeamento Reforçado com barra chata (RAHMAN, 1996)

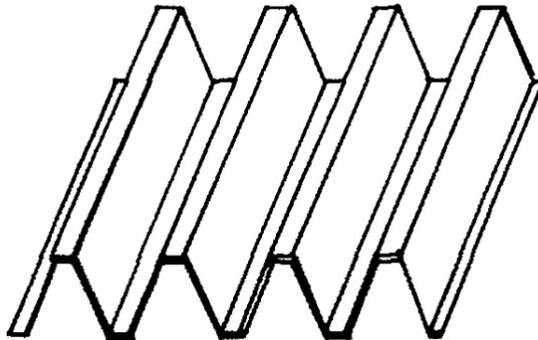


Figura 8 - Chapeamento corrugado (RAHMAN, 1996)

O projetista deve escolher uma orientação de cada reforço para cada região da embarcação, podendo ser longitudinal ou transversal.

2.3.2 Tipos de cavernamento

O projeto estrutural do navio conta com reforçadores tanto na direção vertical como na horizontal. Esses reforçadores são definidos em função da distância entre eles, tamanho e quantidade usada. A evolução do projeto do navio resultou em 2 sistemas de cavernamento: o longitudinal e o transversal.

Segundo (KUMAR, 2010) os reforçadores na chapa provêm não só uma resistência a compressão, mas também dividem a chapa em painéis menores, assim contribuindo para aumentar a tensão crítica necessária para a flambagem e para a carga última em todos os painéis.

No sistema de cavernamento transversal, muitos reforçadores leves são dispostos na direção transversal com espaçamento menor, e são suportados por reforçadores longitudinais grandes com espaçamento maior. Os reforçadores leves são dispostos ao longo de todo o comprimento do navio, formando anéis. Esses anéis mantem a resistência transversal do casco, porém não contribuem para a resistência longitudinal.

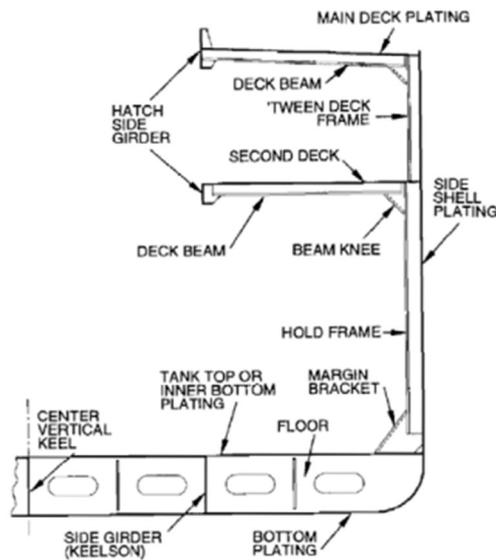


Figura 9 - Sistema de cavernamento transversal (ZUBALY, 1996)

No sistema longitudinal, muitos reforçadores leves são dispostos na direção longitudinal com espaçamento menor entre eles, e são suportados por reforçadores transversais grandes com espaçamento maior. Esses reforçadores contribuem para a resistência longitudinal da embarcação. Esse tipo de reforço é o encontrado no projeto original da lancha, não foi objetivo do trabalho testar a configuração transversal por ser

menos comum nesse tipo de embarcação, porém foi testado alterar a quantidade de reforços presentes nos painéis reforçados.

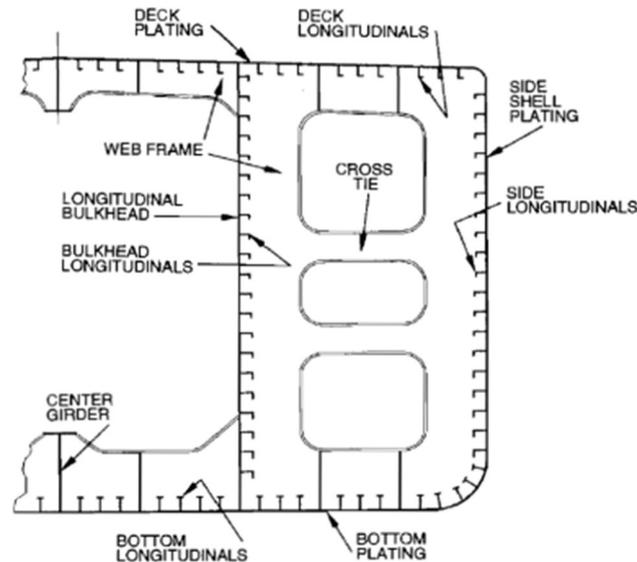


Figura 10 - Sistema de Cavernamento longitudinal (ZUBALY, 1996)

2.3.3 Estrutura Primária

A estrutura primária é a que considera a embarcação como uma viga oca. Essa viga deve suportar os momentos longitudinais aplicados a embarcação gerados pelos múltiplos carregamentos impostos a ela, tais como o próprio peso da estrutura do navio, equipamentos, empuxo das ondas entre outros.

Ao longo da operação da embarcação, ela sofre esforços de flexão que mudam de direção conforme configuração do formato da onda que ela passa sobre ela. Os dois sentidos de flexão da viga navio é chamada de alquebramento e tosamento conforme figura abaixo:

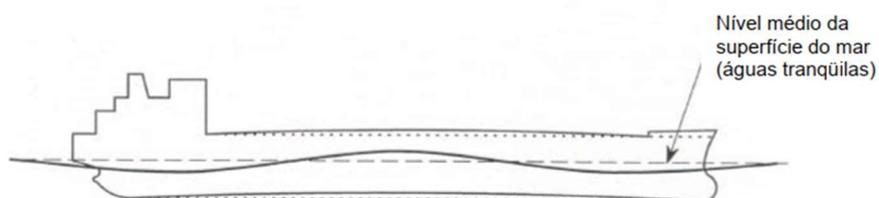


Figura 11 - Exemplo de Alquebramento (AUGUSTO, 2007)

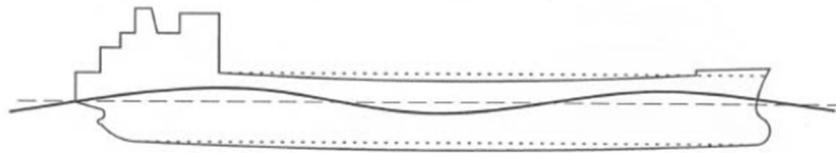


Figura 12 - Exemplo de Tosamento (AUGUSTO, 2007)

Pode-se perceber que os valores extremos de Alquebramento ocorrem quando o meio da embarcação está localizado em cima da crista de uma onda. Assim o convés sofrerá esforços de tração e o fundo sofrerá esforços de compressão.

Já no Tosamento, se observa que a proa e popa se localizam na crista da onda. Assim, o convés sofrerá esforços de compressão e o fundo sofrerá esforços de tração.

A estrutura primária da embarcação sofre além da flexão longitudinal, esforços de torsão e cisalhamento.

É importante salientar que a teoria da viga navio é válida para navios com a relação de comprimento por pontal maior que 12 segundo a regra da DNV (VERITAS, 2015).

Para se fazer o cálculo dos esforços primários na viga navio, deve-se considerar seu peso e empuxo ao longo do comprimento, sendo a carga a diferença entre essas duas forças, com isso é possível fazer o cálculo dos momentos fletores e esforços cortantes ao longo da viga navio conforme figura abaixo:

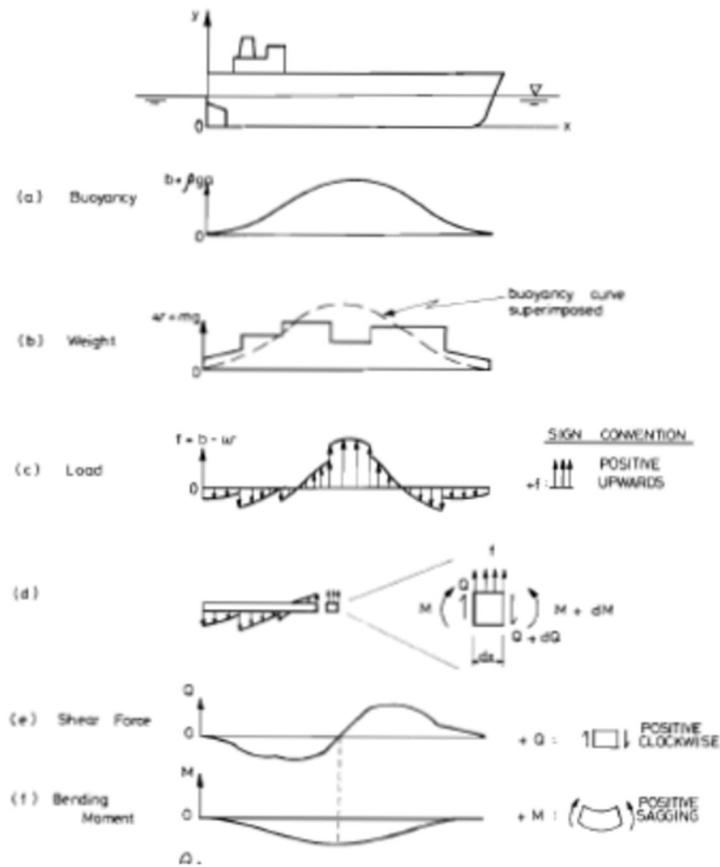


Figura 13 - Momento fletor e esforço cortante na viga navio (OROZCO, 2009)

Essa relação de equilíbrio entre o peso e empuxo pode ser escrito na forma da seguinte equação:

$$\rho g \int_0^l a(x) dx = g \int_0^l m(x) \cdot dx = \Delta \quad (17)$$

Onde:

- ρ Densidade da água do mar
- g Aceleração da gravidade
- $a(x)$ Área submersa em função da posição longitudinal
- $m(x)$ Massa da embarcação em função da posição longitudinal
- Δ Deslocamento da embarcação

De maneira semelhante pode-se determinar o equilíbrio dos momentos utilizando a seguinte equação:

$$\rho g \int_0^l a(x) x dx = g \int_0^l m(x) x dx = \Delta l_s \quad (18)$$

Onde l_g é a distancia longitudinal do peso do navio.

Assim, para fazer o cálculo dos esforços a equação do empuxo e do peso podem ser juntadas numa única equação chamada $f(x)$, aqui se usa o sistema de coordenadas tendo o valor positivo o sinal do empuxo conforme:

$$f(x) = \rho g a(x) - g m(x) \quad (19)$$

Tendo determinado $f(x)$ se pode calcular as forças resultantes no elemento infinitesimal da Figura 13 d, a soma das forças deve ser igual a 0 para ter o equilíbrio, portanto:

$$Q + f(x) dx - Q - dQ = 0 \quad (20)$$

Resultando:

$$f(x) dx = dQ \quad (21)$$

Assim pode-se integrar e obter:

$$\int_0^x f(x) dx + C = Q(x) \quad (22)$$

Nesse caso sabe-se que $C = 0$, pois o navio é uma viga que tem as duas extremidades livres, sendo:

$$Q(0) = Q(l) = 0 \quad (23)$$

Agora também pode-se calcular os momentos resultantes num ponto a direita do elemento infinitesimal da Figura 13 d, definindo como positivo os momentos horários, a soma desses momentos deve ser 0 para ter o equilíbrio, portanto:

$$M + Qdx + f(x)dx \frac{dx}{2} - M - dM = 0 \quad (24)$$

Sabendo que o termo dx^2 é de segunda ordem, a equação pode ser simplificada:

$$Qdx = dM \quad (25)$$

Fazendo a integração de ambos os lados, pode-se obter:

$$\int_0^x Q(x)dx + C = M(x) \quad (26)$$

Nesse caso também $C = 0$.

2.3.4 Cálculo da Tensão Normal

A análise estrutural da viga se baseia na Teoria simples da Viga resultando na seguinte equação do momento fletor em relação a tensão normal:

$$\sigma_x = \frac{M_z y}{I} \quad (27)$$

Onde,

σ_x Tensão Normal na direção x (longitudinal do navio)

M_z Momento fletor longitudinal

y Distância do ponto onde se deseja calcular tensões até o eixo neutro da embarcação

I Momento de inércia da seção

Obs: a equação (27) é usado no modelo proposto quando é calculado as tensões resultantes dos momentos fletores de projeto.

2.3.5 Módulo de Seção

A equação (27) nos mostra, que σ_x é máximo quando y também é, portanto quando o ponto se localiza no convés ou no fundo da embarcação. Quando y corresponde a um desses extremos citados, a quantidade I/y é chamada de módulo de seção:

$$Z = \frac{I}{y} \quad (28)$$

Como o eixo neutro (linha pela qual passa o centro de gravidade da seção) não se localiza no ponto médio da seção, existe, portanto, dois valores extremos de módulo de seção: um do convés (Z_c) e um da quilha (Z_q). Esse valor é requisitado nos cálculos estruturais da sociedade classificadora DNV usado no modelo proposto desse trabalho.

2.4 Tipos comuns de falhas estruturais em embarcações

Todo projetista estrutural tem como objetivo evitar a falha estrutural, que pode ser desde uma pequena rachadura numa hastilha até o colapso total da viga navio. Por este motivo é importante entender os modos de falhas que podem existir em um navio. As falhas estruturais em navios são falhas geralmente que ocorrem em estruturas reforçadas, como placas reforçadas que tem muitos caminhos para a tensão se propagar.

Como mencionado no parágrafo anterior, existem muitos graus de falha, como uma pequena rachadura que não inviabiliza a operação de uma embarcação, até uma rachadura de grandes proporções que podem levar a perda da embarcação. Normalmente navios possuem muitos reforços em redundância, e o início das falhas podem ser detectadas e reparadas antes do colapso.

Existem 3 modos de falhas tradicionais que podem ser considerados quando se trata de falha da navios:

- 1 - Tração excessiva
- 2 - Flambagem
- 3 - Fadiga

2.4.1 Tração excessiva

Esse modo de falha ocorre quando um componente estrutural excede uma determinada tensão denominada tensão de escoamento, acima dessa tensão o componente passa a ter uma deformação plástica ou permanente, ao invés da deformação elástica ou temporária. Vale ressaltar, que elevando mais a tensão, pode se chegar na tensão última (ou de ruptura), que causa a fratura do material.

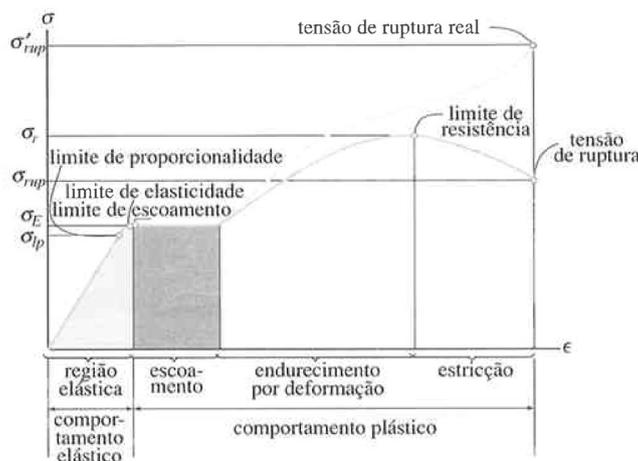


Figura 14 - Diagrama de tensão-deformação de exemplo (HIBBELER, 2009)

Aqui é importante fazer algumas observações, que embora o projetista sempre busque não ter nenhuma deformação plástica na sua estrutura, deformações plásticas em partes localizadas da estrutura, contanto que sejam cargas não-reversas, as vezes podem resultar numa distribuição mais equalizada das tensões através da estrutura (LEWIS, 1988). Essa falha é verificada no modelo proposto quando se analisa as tensões axial e de cisalhamento comparando-as com o limite de escoamento do alumínio.

2.4.2 Flambagem

As falhas de estabilidade ou flambagem de um componente estrutural sobre compressão ocorrem quando níveis de tensão estão abaixo da tensão de escoamento. Esta falha está associada a geometria e o módulo de elasticidade, ao invés da tensão de escoamento (LEWIS, 1988).

Na viga navio a flambagem ocorre devido ao alto carregamento na estrutura ou quando a estrutura fica muito fina devido a corrosão, e isto causa a falha. Quando o navio

está experimentando o aquecimento a flambagem pode ocorrer no fundo da embarcação, enquanto quando está experimentando o tosamento, a flambagem pode ocorrer no deque.

Aqui é importante citar que elementos que sofrem compressão além do limite de flambagem tem a redução da resistência em relação a própria flambagem e tensão última (SUN, 2005).

O exemplo mais comum da falha de instabilidade é a flambagem de uma viga comum submetida a compressão, que atinge seu colapso quando a carga de compressão excede o valor crítico da formula de Euler (HIBBELER, 2009):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_e^2} \quad (29)$$

Onde,

P_{cr} = Carga crítica

E = Módulo de elasticidade

I = momento de inercia

L_e = Comprimento efetivo (que varia conforme a condição de contorno da estrutura)

Abaixo é mostrada uma figura com exemplos de vários L_e :

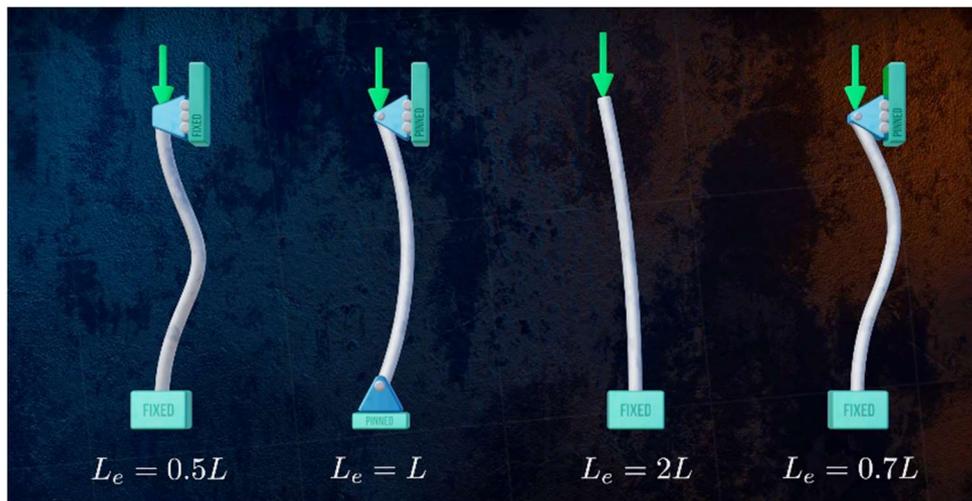


Figura 15 - Exemplos de diferentes tipos de L_e (ENGINEER, 2021)

As placas de navios em compressão também terão a carga crítica de flambagem, e ela irá depender da espessura da placa, das dimensões laterais, das condições dos apoios das bordas e do módulo de elasticidade do material (LEWIS, 1988). Porém as placas que excedem a carga crítica de flambagem, não irão necessariamente colapsar, se esse valor excedido não for tão alto, poderá haver apenas uma deflexão elástica da porção central da placa para fora da sua posição inicial.

Após remoção da carga, a placa volta a sua posição inicial sem deformação. A carga última na placa que sofre flambagem pode ser determinada pelo início do escoamento em algum ponto na chapa ou no reforçador, uma vez iniciado pode se propagar rapidamente por toda placa ou painel reforçado, com o maior aumento da carga.

A norma da DNV estabelece fórmulas próprias para o cálculo da tensão de flambagem de chapas e reforços, porém aqui se decidiu estudar de modo geral esse fenômeno importante a indústria naval.

Daqui em diante será explicado com mais detalhes a questão da flambagem e a carga última de placas.

2.4.2.1 Placas elásticas sujeitas a compressão uniaxial

Como introdução a flambagem de placas retangulares, é válido considerar a placa mostrada na figura abaixo:

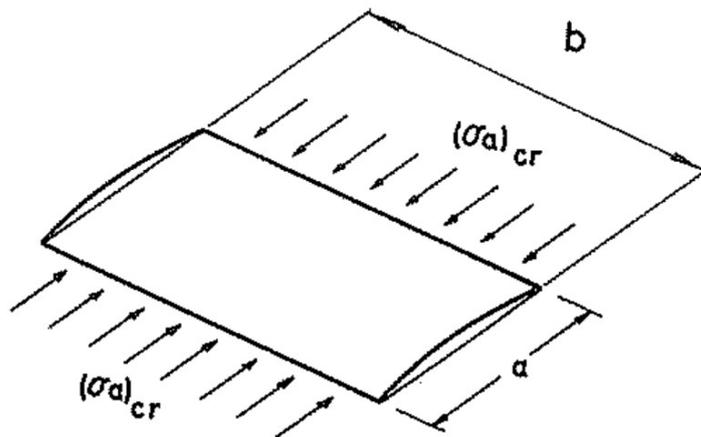


Figura 16 - Flambagem de coluna larga (HUGHES, 1988)

A placa está sujeita a compressão no plano, tendo um simples suporte nos lados carregados, e não tendo suporte nos lados não carregados. E tendo em vista, que não existe

suporte para a placa, a chapa se comporta mais como uma larga coluna ao invés de placa. O carregamento de flambagem ou crítico para tal placa é o mesmo do que o usado para colunas exceto pelo produto EI que é substituído pela rigidez de flexão da placa D. Então, para uma placa de comprimento “a”, a fórmula de Euler para o carregamento de flambagem é:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * D * b}{a^2} \quad (30)$$

A tensão crítica para a flambagem é:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 * D}{a^2 * t} = \frac{\pi^2 * E}{12 * (1 - \nu^2)} * \left(\frac{t}{a}\right)^2 \quad (31)$$

Na equação acima, percebe-se que a relação espessura(t) por comprimento (l) tem a mesma função do índice de esbelteza para colunas. Por outro lado, a largura “b” da placa não exerce influência, e aqui é claro que do ponto de vista de flambagem, é ineficiente usar a placa como coluna larga, que é, sem suporte das bordas sem carregamento.

A Figura 17 mostra um painel simples suportado de placa sujeito a uma compressão uniforme (σ) no plano na direção x.

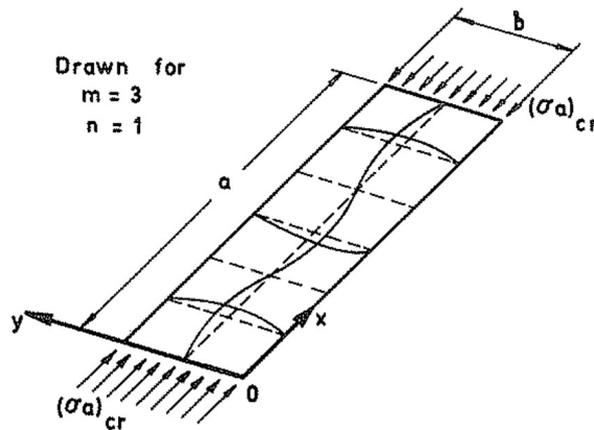


Figura 17 - Perfil flambado de uma placa longa (HUGHES, 1988)

A equação geral da teoria da larga deflexão de uma placa (HUGHES, 1988) pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\nabla^4 * w = \frac{1}{D} * \left(p + N_x * \frac{\partial^2 w}{\partial^2 x} + 2 * N_{xy} * \frac{\partial^2 w}{\partial x * \partial y} + N_y * \frac{\partial^2 w}{\partial^2 y} \right) \quad (32)$$

Onde,

w = Deflexão da chapa

D = Constante de proporcionalidade entre o momento e a curvatura = $\frac{E * t^3}{12(1-\nu^2)}$

E = módulo de Elasticidade

t = espessura da placa

ν = coeficiente de Poisson

N_x = Tração na direção x por unidade de largura

N_y = Tração na direção y por unidade de largura

N_{xy} = Força de cisalhamento por unidade de largura

Portanto, pegando a equação (32), e substituindo $N_x = -\sigma_a * t$ e $p = N_y = N_{xy} = 0$ que leva a:

$$\nabla^4 * w = \frac{\sigma_a * t}{D} * \left(\frac{\partial^2 w}{\partial^2 x} \right) \quad (33)$$

Sabendo que as bordas são suportadas de forma simples, a forma defletida pode ser expressa da seguinte forma:

$$w = \sum_m \sum_n C_{mn} * \sin \frac{m\pi x}{a} * \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (34)$$

Assumindo que a placa é livre para se mover para dentro sobre a ação de compressão no plano e não existe tensão longitudinal no plano central da placa e assumindo que a energia de deformação é devido a flexão apenas, chega-se à conclusão que a tensão crítica pode ser expressada da seguinte forma:

$$(\sigma_a)_{cr} = \frac{\pi^2 a^2 * D * \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2}{t * m^2} \quad (35)$$

Aqui, os parâmetros “m” e “n” indicam o número de meia onda em cada direção da forma flambada. Mas pela equação acima, percebe-se que o valor mínimo da tensão crítica é alcançado quando n=1. Isso leva a seguinte equação:

$$(\sigma_a)_{cr} = k * \frac{\pi^2 * D}{b^2 * t} \quad (36)$$

Onde,

$$k = \left(\frac{m * b}{a} + \frac{a}{m * b}\right)^2 \quad (37)$$

Aqui, é importante frisar que o “k” é para essa determinada condição de contorno.

A figura abaixo mostra a plotagem de diversos valores da razão de aspecto “a/b” para diferentes valores de “m”:

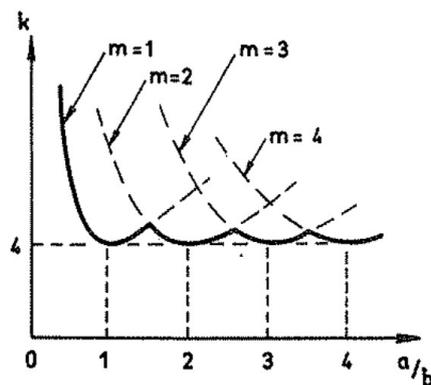


Figura 18 - Plotagem de "m" por "a/b" (HUGHES, 1988)

Pela plotagem da Figura 18 percebe-se que independente da razão de aspecto (a/b) o valor mínimo de “k” é 4 para razões de aspecto maior que 1. Portanto a equação da tensão crítica fica:

$$(\sigma_a)_{cr} = 4 * \frac{\pi^2 * D}{b^2 * t} \quad (38)$$

Para razões de aspecto (a/b) menor que 1, “m” será igual a 1 e a tensão crítica dadas pelas equações (36) e (37) ficará:

$$(\sigma_a)_{cr} = \frac{\pi^2 * D}{a^2 * t} \left[1 + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]^2 \quad (39)$$

Para fins de projeto, não importando a razão de aspecto, a equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$(\sigma_a)_{cr} = \bar{K} * E * \left(\frac{t}{a} \right)^2 \quad (40)$$

Onde,

$$\bar{K} = \frac{\pi^2}{12 * (1 - \nu^2)} * \left[1 + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]^2 \quad (41)$$

As equações acima, trazem uma questão relevante a se discutir, a questão das duas formas de se enrijecer uma estrutura, a figura abaixo mostra os dois tipos de enrijecimento:

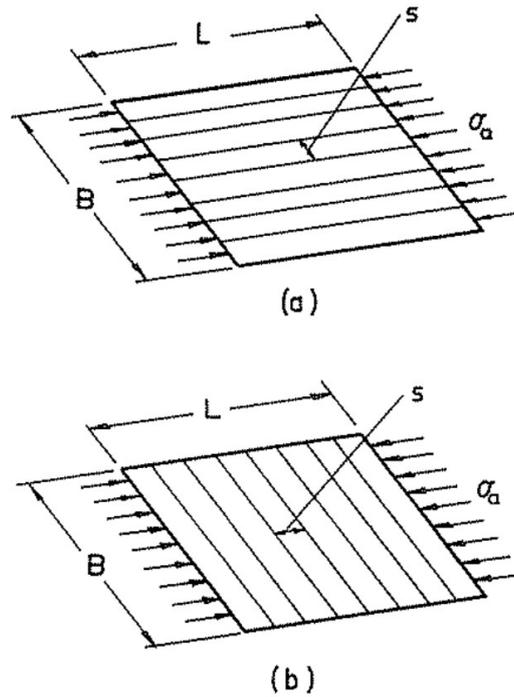


Figura 19 - Tipos de sistemas de reforços em placas (HUGHES, 1988)

Usando a forma “a” da Figura 19 na equação (40), assumindo $b = s$, chega-se a seguinte equação:

$$(\sigma_a)_{cr} = \frac{4 * \pi^2 * D}{s^2 * t} \quad (42)$$

Usando a forma “b” da Figura 19 na equação (40), assumindo $a = s$ e $b = B$, chega-se a seguinte equação:

$$(\sigma_a)_{cr} = \frac{\pi^2 * D}{s^2 * t} * \left[1 + \left(\frac{s}{B} \right)^2 \right]^2 \quad (43)$$

O termo “ s/B ” raramente é maior que $1/6$, o que leva ao termo em colchete o valor de 1. Portanto pelas análises das equações acima, se conclui que os reforços longitudinais (forma “a” da Figura 19) tem 4 vezes mais resistência a flambagem que reforçadores transversais (forma “b” da Figura 19).

2.4.3 Fadiga

Muitas rachaduras são formadas no navio devido a fadiga. Uma embarcação normalmente possui uma infinidade de soldas ao longo de toda sua extensão e estas sofrem os mais variados esforços cíclicos ao longo da vida da embarcação, tais como carregamentos de ondas, esforço do motor e variações das condições climáticas. A fadiga é a falha do material devido a cargas cíclicas alternadas de tração e compressão. O fenômeno da fadiga geralmente é dividido em alto ciclo e baixo ciclo. Em fadigas de alto ciclo, a falha é iniciada na forma de pequenas rachaduras, essas rachaduras vão se propagando lentamente, se forem detectadas a tempo, podem ser reparadas. Fadiga de alto ciclo são caracterizadas por baixas tensões (menos que a tensão de escoamento) e elevados ciclos (alguns milhões). Esse tipo de fadiga normalmente é encontrado em máquinas rotativas ou peças estruturais que sofrem constante vibração. A fadiga de baixo ciclo é caracterizada por grandes níveis de tensão (chegando até a tensão de escoamento e até passando) que resultam em rachaduras em baixos ciclos (alguns milhares de ciclos).

O meio de operação de navios e estruturas oceânicas é o mar. Normalmente eles sofrerão esforços cíclicos relativamente leves ao longo da maior parte de sua operação, porém, durante o mau tempo que é um período relativamente curto, sofrerá uma carga cíclica com tensões elevadas. Assim pode se definir que o navio terá uma fadiga de baixo ciclo, e depois de alguns anos podem surgir rachaduras que podem se tornar sérias se não forem detectadas.

A inicialização da fadiga, é um fenômeno localizado que depende fortemente da geometria estrutural e concentração de tensões. Em estruturas soldadas, como é o caso do navio, rachaduras são conhecidas por iniciar em regiões de concentração de tensão causadas por imperfeições causados por procedimentos de solda, recortes e junções de placas onde transições geométricas abruptas causam uma elevação da intensidade da tensão.

Existem 2 abordagens para a questão da fadiga:

- Uso das curvas SN. Essa é normalmente usada na fase de design.
- Mecânica da Fratura. Essa é usada quando já existe uma trinca.

Momentos fletores na viga navio causados por ondas, causam uma tensão dinâmica no deck e no fundo. E sabe-se que na viga navio, essas tensões são máximas nos membros longitudinais da seção mestra. Os movimentos de *Hogging*

(Alquebramento) e *Sagging* (Tosamento) na viga navio pode gerar rachaduras por fadiga nas estruturas longitudinais do deque e do fundo.

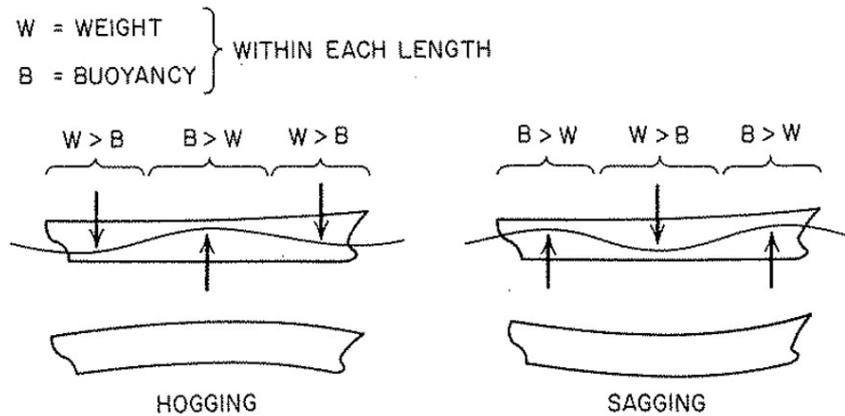


Figura 20 - Movimentos do Hogging e Sagging (HUGHES, 1988)

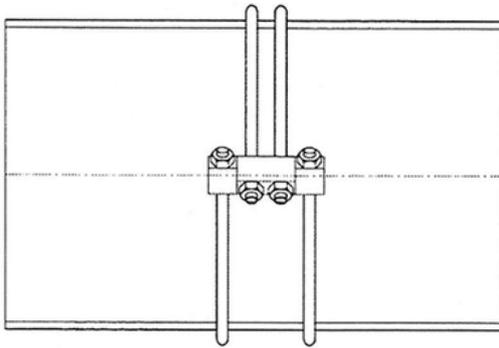
Ondas locais também podem gerar uma certa amplitude de tensões dinâmicas também no costado e fundo, porém elas são mais intensas no nível da linha d'água por motivos conhecidos (velocidade da partícula fluida é mais intensa no nível do mar e vai diminuindo com a profundidade).

Importante citar que a fadiga não foi calculada no modelo por não ser o objetivo do trabalho, porém decidiu-se explicar de forma geral essa falha estrutural presente em estruturas oceânicas.

2.4.3.1 Fratura Frágil (*brittle fracture*)

Na fratura frágil, uma pequena fratura começa a crescer e de forma abrupta começa a se propagar rapidamente atingindo maior proporção da estrutura (LEWIS, 1988). Normalmente a origem da trinca pode ser tanto um projeto ruim quanto uma solda mal feita, exemplo disso é uma escotilha com quina quadrada ou uma falha na solda que não foi detectada. A fadiga também contribui para o início e crescimento da fratura. O controle da fratura frágil se dá através do estabelecimento de padrões de projeto e inspeções visando a prevenção de pontos concentradores de tensão, e com a seleção de materiais aplicados na estrutura que tenham uma tenacidade no entalhe alta assim como a resistência ao crescimento de trincas. Em muitos casos se usa a solução dos “*cracks arrestors*”, que são equipamentos que limitam a propagação das trincas.

Toroidal crack arrestor



Steel rope crack arrestor



Figura 21 - Exemplo do crack arrestor (RAJU, 2018)

2.4.3.2 Corrosão

Corrosão é um problema recorrente em navios com o passar do tempo de operação, e são provenientes dos seguintes fatores (RAJU, 2018):

- Salinidade
- Temperatura
- Quantidade de oxigênio
- Velocidade da água.

A corrosão pode ocorrer nas seguintes formas (VERITAS, 2000):

- Corrosão geral
- Corrosão local
- Corrosão localizada
- Corrosão de borda
- Corrosão de sulcos
- Corrosão por bactérias
- Corrosão galvânica

A corrosão geral é a que ocorre em porões e tanques, são mais prováveis de ocorrer em tanques segregados e desprotegidos contra corrosão.

A corrosão local é comum em estruturas revestidas e sua falha ocorre na quebra do revestimento. Essa corrosão afeta localmente a estrutura, não tendo impacto na estrutura global, podendo causar colapso ou flambagem localmente.

A corrosão localizada é uma parte da corrosão local onde áreas limitadas são atacadas. Este tipo de corrosão é mais provável de ocorrer no fundo do porão de carga ou

nos tanques de lastro, pode também ocorrer em outras superfícies horizontais, ao longo de soldas ou em metais como alumínio e aço inoxidável. Seu poder de penetração de corrosão pode ser alto.

A corrosão de borda é uma corrosão local nos bordos da estrutura interna, que normalmente afeta apenas a resistência local. Em áreas com um nível de tensão de cisalhamento mais elevado, esta corrosão pode gerar a flambagem por tensão de cisalhamento.

A corrosão de sulcos é uma corrosão local que ocorre nas zonas afetadas pelo calor de solda de chapas do costado, convés ou longitudinais. Esta corrosão reduzirá a capacidade de resistir ao cisalhamento.

A corrosão causada por bactérias ocorrerá em zonas propícias a formação de bactérias como os tanques de óleo, lastro etc.

A corrosão galvânica ocorre quando dois materiais são acoplados eletricamente na água do mar, o material mais negativo (ativo) do par atuará como ânodo e terá uma taxa de corrosão aumentada, enquanto o componente mais positivo, o cátodo, terá uma corrosão reduzida. Devido à corrosão, a espessura da placa é diminuída e, portanto, as tensões na placa são aumentadas podendo causar a falha da estrutura.

Segundo a DNV VERITAS, 2015, o alumínio grau 5086 (usado na lancha deste projeto) que vai ficar em contato direto com a água deve ser submetido a um teste de resistência a esfoliação e a corrosão intergranular.

3 METODOLOGIA

A metodologia aqui apresentada, tem como objetivo fundamentar o desenvolvimento do método. Para o método escolhido, objetiva-se desenvolver um modelo de otimização estrutural para lancha de patrulha de alumínio que possui as seguintes características:

- Comprimento Total: 8.14m
- Comprimento de linha d'água: 6.71m
- Boca: 3.21m
- Pontal: 1.37m
- Calado: 0.42m
- Velocidade: 30 nós



Figura 22 - Visão lateral e frontal do arranjo geral da lancha patrulha a ser otimizada (fonte: autor)

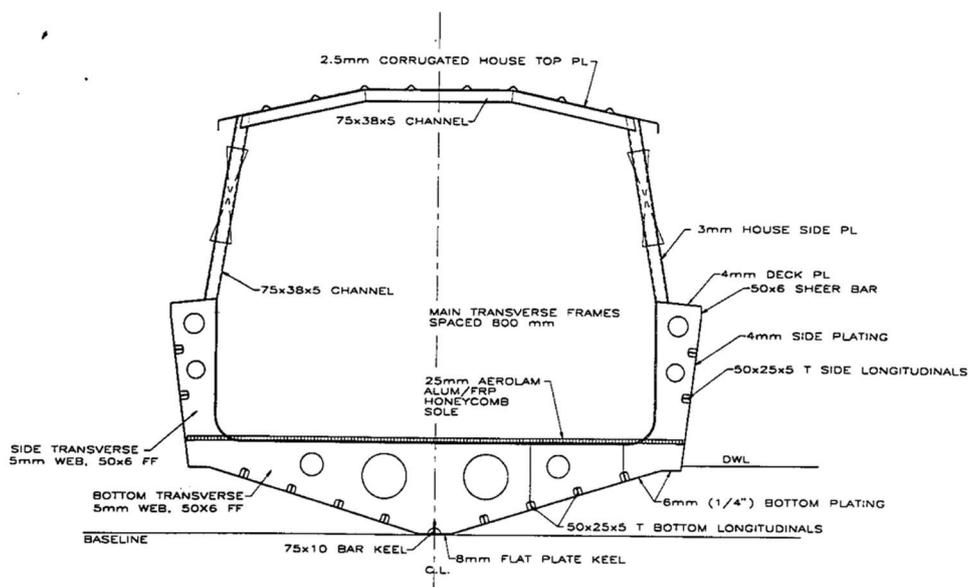


Figura 23 - Visão dos elementos estruturais da seção mestra da embarcação original (fonte: autor)

Dentro do que foi estudado anteriormente sobre otimização, foi dito que a otimização necessita dos seguintes elementos (HAFTKA, 1992):

- Funções objetivo
- Variáveis de projeto
- Restrições de projeto

Primeiramente deve-se definir quais elementos serão avaliados nas funções objetivo, como foi observado em (CAPRACE, 2011), antigamente era objetivo dos projetistas otimizarem somente o peso da embarcação, pois se achava que o custo de produção estava relacionado apenas com a quantidade de material usado. Hoje, já é prática comum da otimização, otimizar a variável custo de forma separada do peso, como já falado anteriormente. Porém o custo de produção é complexo e muito variável sendo de difícil representação, então como forma de representar essa variável foi escolhido o volume de solda, por ser de mais simples descrição e ser uma variável que representa um dos custos de mão de obra mais relevante na construção naval (BAPTISTA, 2018). Por isso foi decidido escolher as seguintes funções objetivo:

- Peso estrutural
- Volume de solda

Tendo definido as funções objetivo se decidiu pela otimização paramétrica, uma vez que a forma, as dimensões principais e nem posição de anteparas serão mudadas.

A partir das linhas das balizas retiradas da Figura 22 foi possível gerar um modelo 3D do casco da embarcação usando conceitos da arquitetura naval (LEWIS, 1988):

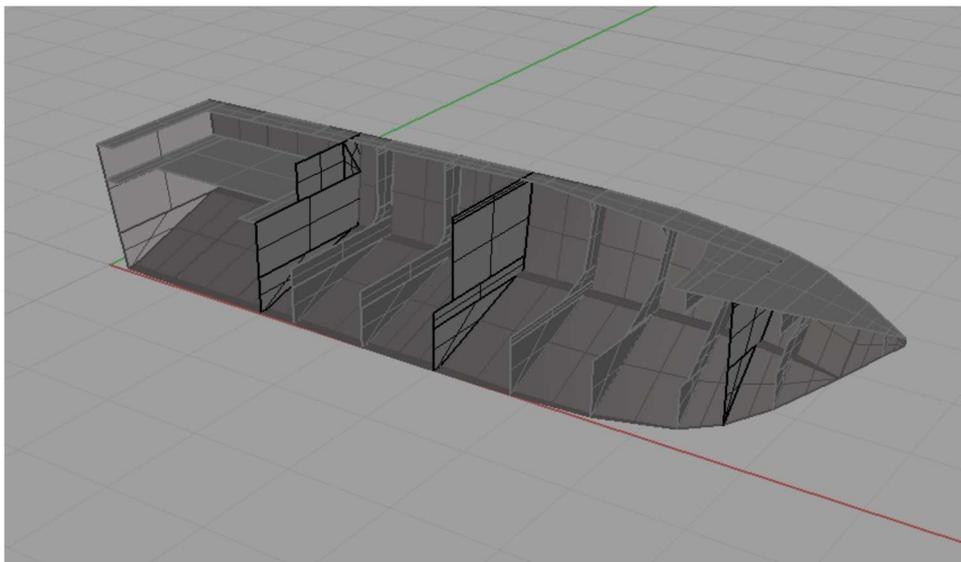


Figura 24 - Modelo 3D que será usado na otimização (fonte: autor)

O peso estrutural e volume de solda será estimado baseado no modelo 3D do casco como explicado nas seções 3.4.1 e 3.4.2 .

Em relação as variáveis de projeto, se decidiu otimizar as variáveis descritas na seção mestra (Figura 23), e usar elas para representar esses elementos estruturais para o resto da embarcação, pois a seção mestra em geral contém elementos estruturais mais resistentes. Porém em alguns casos, quando os esforços eram maiores que na seção mestra, foram usados elementos estruturais representativos de outras regiões de forma a se ter o resultado mais conservadores possível. A descrição das variáveis de projeto está mais bem detalhada na seção 3.5.

Para escolher as restrições de projeto, foi recorrido a regra “DNV Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft July 2015” (VERITAS, 2015), por ela conter regras específicas para dimensionamento estrutural de embarcações patrulha como mais bem detalhado na seção 3.6 .

Para execução do processo de otimização, assim como elaboração dos gráficos necessários para seu entendimento, foi usado o software ModeFrontier (ESTECO, 2023) usando algoritmos genéticos uma vez que eles seriam os mais adequados para o problema em questão tendo em vista que se testou outros e não se obteve resultados satisfatórios.

3.1 Hipóteses do modelo proposto

O modelo proposto de otimização possui as seguintes hipóteses:

- O modelo utiliza a otimização paramétrica, pois apenas parâmetros dos elementos estruturais são alterados (quantidades, posições, dimensões e espessuras). Não foi feita qualquer tipo de alteração na forma do casco original da embarcação.
- A otimização leva apenas em conta regra de sociedade classificadora que é bem conservador, portanto, não seria a solução mais leve e barata para resistir a realidade. Porém, é comum na engenharia usar regras de sociedades classificadoras.
- O método usa avaliação determinística da regra, não levando em consideração incerteza da carga ou espessura.
- Não foi incluído custos de imperfeições na fabricação.
- O método não limita espessuras que seriam difíceis de soldar como a de 3mm, deixando por conta da espessura mínima da regra a avaliação desse valor.
- O método não considera as dificuldades inerentes de cada tipo e região de solda.

- Elementos estruturais da seção mestra (ou da região que possui maior carregamento da regra) são usados para representar elementos estruturais de toda a embarcação, essa foi uma simplificação necessária para reduzir o grande número de variáveis, porém foi contrário a melhor otimização estrutural.

- Não é testado a resistência última do modelo otimizado nem da lancha original usando o método dos elementos finitos.

- Foi usado um *bracket* de 75mm na longitudinal do fundo e na longitudinal da antepara para que a lancha original fosse aprovada pelos requisitos estruturais da regra, esses *bracket* foram mantidos no modelo de otimização.

3.2 Fluxograma da lógica do método

Importante agora citar a estratégia da otimização, para isso foi elaborado um fluxograma conforme mostrado abaixo:

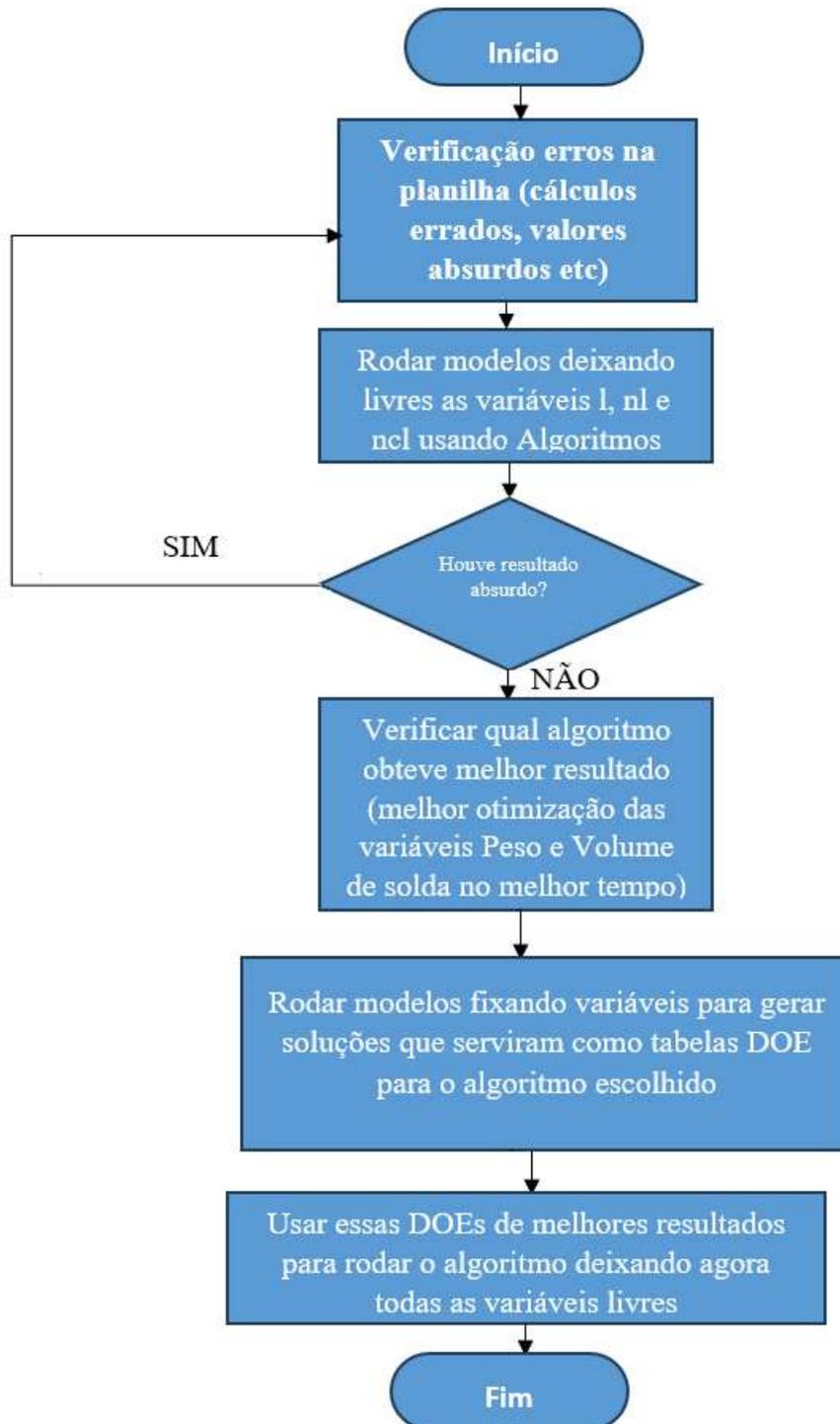


Figura 25 - Fluxograma lógico do método (fonte: autor)

3.3 Visão geral da ferramenta desenvolvida para o cálculo estrutural

Para os cálculos do problema de otimização foi desenvolvida uma planilha programada no software Excel chamada “Calculo_Estrutura” usando como base as regras da DNV(VERITAS, 2015) e conceitos de arquitetura Naval (LEWIS, 1988).

Dados de Entrada Fixos										ERROS:				
Abreviação	Valor	Variável	Descrição											
D(m)	1.37	D _c	Altura do convés							0				
L(m)	6.69	L _c	Comprimento de linha d'água no calado de projeto							0				
B(m)	3.21	B _c	Boca							0				
Cb	0.38	C _B	Coefficiente de Bloco							0				
T(m)	0.41	T _c	Calado de Projeto							0				
V(nós)	30	V _c	Velocidade máxima da lanchar							0				
Δ(ton)	3.23	Δ	Deslocamento no calado de projeto							0				
I _{bottom_transverse_web} (mm)	235	I _{bottom_transverse_web}	Comprimento da alma da hastilha							0				
I _{side_transverse_web} (mm)	200	I _{side_transverse_web}	Comprimento da alma da caverna							0				
I _{sheer_bar} (mm)	50	I _{sheer_bar}	Comprimento da Sheer Bar							0				
Função objetivo										Valor inicial	Diferença do original			
Peso (Kg)	857.33	Peso	Peso da estrutura a ser otimizada							1011.84	-154.51			
Volume de Solda (Centilitros)	462.92	V _{Solda}	Volume de solda							754.29	-291.37			
Aprovado (sim = 0, não = 1)	0	Aprovado	sim = 0, não = 1, 2, 3 ...							0	0			
Varição de Posição do CG	0.009	Var _{CG}	Varição de posição do centro de gravidade (m)							0	-0.009			
Variáveis dependentes														
s(m)	0.3900	s _c	Espaçamento entre longitudinais											
s _{cost} (m)	0.333	s _{cost}	Espaçamento longitudinalis do costado											
Dados de Entrada Variável										Entrada	Faixa min	passo	Faixa max	Valor inicial
I(m)	0.8	I	Espaçamento entre transversais (Hastilhas)							0.8	0.1	1.2	0.8	
I _{bar_keeel} (mm)	90	I _{bar_keeel}	Comprimento Bar keel (longarina)							90	5	100	75	
I _{bar_keeel_flange} (mm)	30	I _{bar_keeel_flange}	Comprimento do flange do bar keel							30	0	5	100	0
I _{bottom_long_flange} (mm)	25	I _{bottom_long_flange}	Comprimento do flange longitudinal do fundo							25	0	5	100	25
I _{bottom_long_web} (mm)	70	I _{bottom_long_web}	Comprimento alma longitudinal do fundo							70	5	5	100	50
I _{bottom_transverse_flange} (mm)	65	I _{bottom_transverse_flange}	Comprimento do flange da Hastilha							65	0	5	100	50
I _{bulk_flange} (mm)	25	I _{bulk_flange}	Comprimento do flange do reforço da antepara							25	0	5	100	25
I _{bulk_web} (mm)	65	I _{bulk_web}	Comprimento da alma do reforço da antepara							65	5	5	100	50

Figura 26 - Visão geral da planilha de cálculo da otimização (fonte: autor)

A planilha é dividida em 7 abas entre elas:

- “Dados_Entrada”: aba que contém dados de entrada fixos, funções objetivo, variáveis dependentes, dados de entrada variável e tabela de erros; essa aba é a única que o software ModeFrontier interage no momento da otimização.

- “Chapas e Perfis”: aba que contém as espessuras de chapa padrão encontradas no mercado, essa aba serve para verificar se o valor digitado na aba entrada está no padrão de chapas do mercado.

- “Peso_Volume”: aba que faz o cálculo do Peso, Volume de Solda e Variação da posição do centro de gravidade.

- “Linha Neutra SM”: aba que calcula o módulo de seção da seção mestra da embarcação.

- “ts202”: aba que calcula a tensão de escoamento do perfil de chapa extrudado e comuns segunda a regra da DNV.

- “h301”: aba que calcula fatores que serão usados no cálculo da estrutura como Coeficiente de onda, aceleração vertical, aceleração horizontal, pressão de *slamming*,

pressão lateral, momentos fletores de projeto para várias situações diferentes, esforços normais e de cisalhamento.

- “ts303” – aba que é feito todos os cálculos estruturais para verificar se a estrutura escolhida vai suportar ao mais diversos testes como: espessura mínima de projeto para chapas e reforços, módulo de seção mínima de requerido para reforçadores, módulo de seção mínimo da seção mestra escolhida, e se os reforços e chapas resistirão a os mais diversos esforços de *slamming*, momentos de alquebramento e tosamento, esforços de cisalhamento, esforços de tração, considerando a flambagem das chapas e reforços. Todos esses cálculos são alimentados com informações calculadas em todas as outras abas.

Será detalhado com mais aprofundamento todos os cálculos feitos nessas abas à medida que for sendo explicado a metodologia.

3.4 Funções objetivo

Os objetivos do problema proposto de otimização são a redução do peso e do volume de solda. Escolher reduzir o peso da estrutura é positivo quando se pensa na questão de velocidade da embarcação, visto ser uma embarcação de patrulha, esse aspecto se torna crucial, este aspecto do peso também inclui de certa forma os custos do material, uma vez que chapas mais pesadas são mais caras que chapas leves, porém, esse único objetivo não traduziria totalmente o custo, visto que os custos de produção e mão de obra não estariam inclusos. Por isso, se decidiu incluir o volume de solda usado como forma de mensurar os custos da mão de obra envolvida e por ser o serviço de solda, um dos mais caros e importantes na indústria naval.

As funções objetivos Peso e Volume de Solda são funções que podem ser escritas da seguinte forma:

$$Peso = F(\textit{geometria}) \quad (44)$$

$$Volume\ de\ Solda = F(\textit{geometria}) \quad (45)$$

3.4.1 Peso

Peso é uma função que depende da geometria da embarcação otimizada. Para fazer o cálculo do peso, foi desenhado um modelo em 3 dimensões da embarcação representando hastilhas, anteparas e chapas do convés, costado e fundo. Esse modelo foi dividido em 4 partes conforme figura abaixo:

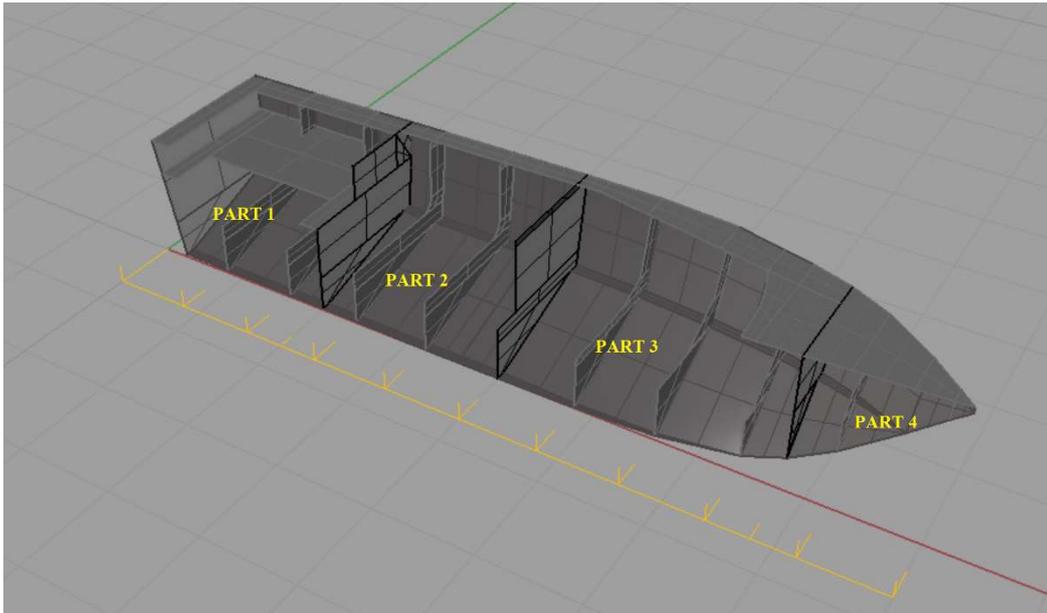


Figura 27 - Modelo 3D da lancha a ser otimizada (fonte: autor)

Cada “part” (mostradas na Figura 27) tem o seus limites delimitados pelas anteparas, sendo que cada “part” contém o peso da antepara mais a ré da sua divisão.

O peso das anteparas, chapeamentos e *sheer bar* são calculados usando a seguinte expressão:

$$Peso_{chapa} = Area_{chapa} * t_{chapa} * \rho_{chapa} * 10^{-6} \quad (46)$$

Onde,

$Peso_{chapa}$ - Peso da chapa em “ton”

$Area_{chapa}$ - Área da chapa em “m²”

t_{chapa} - Espessura da chapa em “mm”

ρ_{chap} - Densidade da chapa de alumínio em “Kg/m³”

Os valores das áreas são fixos retirados do modelo 3D, a densidade do alumínio também é fixa, portanto, a única variável nesse caso é a espessura da chapa em questão. Um exemplo de cálculo do peso do espelho de popa da Area 1 pode ser encontrado no “ANEXO 1 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE PESO DA LANCHAS”

O peso dos reforçadores longitudinais do fundo, do costado, do convés, do costado, e do *bar keel* são calculados da seguinte forma:

$$Peso_{ref} = N * (t_{alma} * l_{alma} + t_{flange} * l_{flange}) * L_{parte} * \rho_{ref} * 10^{-9} \quad (47)$$

Onde,

$Peso_{ref}$	- Peso do reforçador em “ton”
N	- Número de reforços iguais
t_{alma}	- Espessura da alma em “mm”
l_{alma}	- Comprimento da alma em “mm”
t_{flange}	- Espessura do flange em “mm”
l_{flange}	- Comprimento do flange em “mm”
L_{parte}	- Comprimento da parte em “m”
ρ_{ref}	- Densidade do perfil extrudado de alumínio em “Kg/m ³ ”

Nesse caso, a única constante na equação é a ρ_{ref} .

Para exemplificar o cálculo foi escolhido calcular os reforçadores longitudinais do fundo da Area 1, e estes cálculos de exemplo podem ser encontrados no “ANEXO 1 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE PESO DA LANCHAS”.

Para se fazer o cálculo do peso das cavernas e hastilhas foi recorrido ao modelo 3D, e feito um gráfico que correlacionava a posição “x” da hastilha e caverna com as respectivas áreas da alma da hastilha e caverna. No mesmo gráfico, também foi plotado o comprimento linear de cada hastilha e caverna.

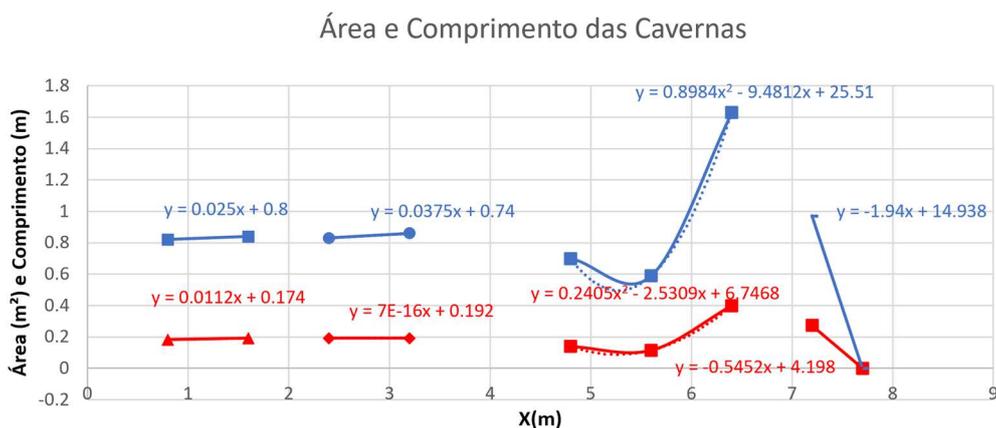


Figura 28 - Gráfico de área e comprimento de cavernas (comprimento em azul, área em vermelho) (fonte: autor)

X da Caverna original (m)	Área original(m ²)	Comprimento(m)
0.8	0.183	0.82
1.6	0.192	0.84
2.4	0.192	0.83
3.2	0.192	0.86
4.8	0.139	0.7
5.6	0.115	0.59
6.4	0.199	1.63
7.2	0.165	0.97
7.7	0	0

Tabela 1 - Base de dados das cavernas retirado do modelo 3D (fonte: autor)

A Figura 28 mostra os comprimentos das cavernas na parte superior (em azul) e os valores das áreas (em vermelho) na parte inferior. É importante salientar que nas posições “x” iguais a 2m, 4m e 6.8 m existem as anteparas transversais, estas posições não foram otimizadas no modelo, permanecendo sempre nessas posições. As cavernas originais do modelo estavam nas posições “x”: 0.8m, 1.6m, 2.4m, 3.2m, 4.8m, 5.6m, 6.4m e 7.2m.

Para se calcular a área e comprimento em posições de cavernas “x” diferentes das originais, foi recorrido a equações de interpolação vistos na Figura 28.

Um exemplo de cálculo de área da alma de uma caverna, assim como seu comprimento usando as interpolações da Figura 28, pode ser encontrado no “ANEXO 1 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE PESO DA LANCHA”.

Assim, tendo calculado a área e comprimento da caverna, pode-se determinar o peso da caverna usando a seguinte expressão:

$$Peso_{cav} = (Área_{alma} * t_{alma} + Comp_{cav} * l_{flange} * t_{flange} * 10^{-3}) * \rho_{ref} * 10^{-6} \quad (48)$$

Onde,

$Peso_{cav}$	- Peso da caverna em “ton”
$Área_{alma}$	- Área da alma da caverna em “m ² ”
t_{alma}	- Espessura da alma em “mm”
$Comp_{cav}$	- Comprimento da caverna em “m”
t_{flange}	- Espessura do flange em “mm”
l_{flange}	- Comprimento do flange em “mm”
ρ_{ref}	- Densidade do perfil extrudado de alumínio em “Kg/m ³ ”

Usando gráfico semelhante ao apresentado na Figura 28, por meio também de interpolação linear se obtém os pesos das hastilhas seguindo o mesmo procedimento usado para o cálculo do peso das cavernas.

Portanto, o peso total da embarcação, será a soma de todos os elementos calculados anteriormente vezes dois (para considerar os 2 bordos):

$$Peso = 2 * \left(\sum Peso_{ref} + \sum Peso_{chapas} + \sum Peso_{cav} + \sum Peso_{hastilha} \right) \quad (49)$$

No “ANEXO 1 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE PESO DA LANCHAS” pode ser encontrada uma planilha de exemplo de cálculo de peso total da lancha.

3.4.2 Volume de Solda

O Volume de solda é uma função que depende da geometria da embarcação. Para fazer o cálculo do volume de solda, foi usado o mesmo modelo 3D da embarcação utilizado para o cálculo do peso. Os comprimentos das soldas foram representados por linhas coloridas através do modelo 3D como pode ser visto na Figura 29:

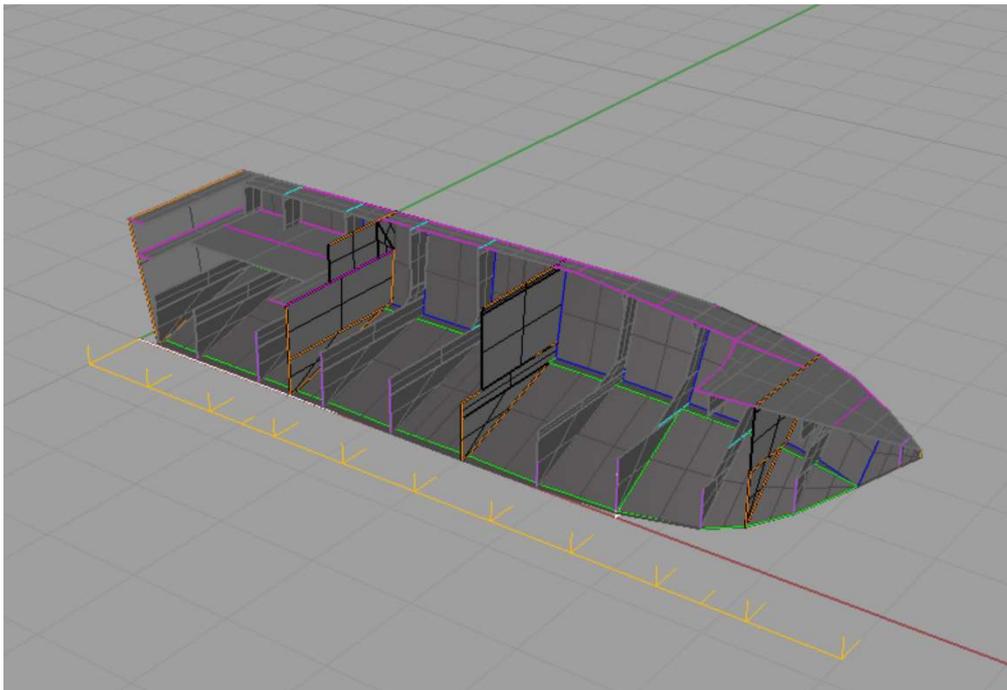


Figura 29 - Modelo 3D com linhas de solda da lancha a ser otimizada (fonte: autor)

Para o cálculo da área da seção de solda na junta de topo, foi recorrido ao trabalho de (BAPTISTA, 2018):

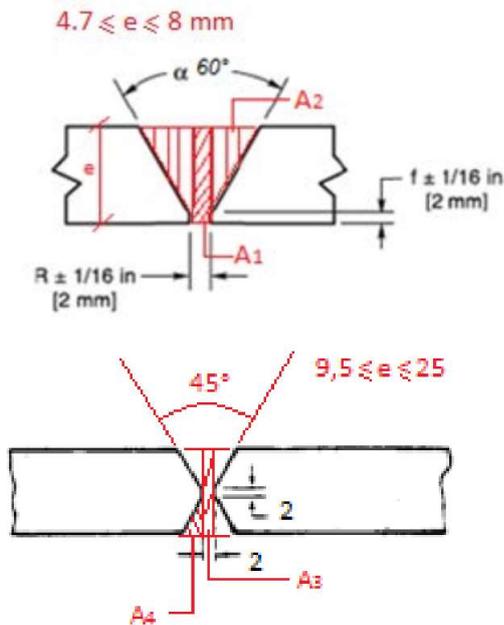


Figura 30 - Área de preenchimento – Junta de topo (BAPTISTA, 2018)

As áreas em “V” ($4.7\text{mm} \leq \text{espessura } [e] \leq 8\text{mm}$) podem ser calculadas usando as seguintes expressões de acordo com a espessura da chapa a ser soldada:

$$\text{ÁreaV} = A_1 + 2A_2 = 2e + \left(\frac{\sqrt{3}}{3} * (e - 2)\right) * (e - 2) \quad (50)$$

$$\text{ÁreaV} = \left(\frac{\sqrt{3}}{3} * (e - 2)^2\right) + 2e \quad (51)$$

Para o cálculo do chanfro em X ($9\text{mm} \leq \text{espessura } [e] \leq 25\text{mm}$), a área da seção foi descomposta em duas áreas A3 e A4 e podem ser calculadas usando a seguinte expressão:

$$\text{ÁreaX} = A_3 + 4A_4 = 2e + 2 * \left(\frac{e - 2}{2}\right) * \left(\frac{e - 2}{2}\right) \quad (52)$$

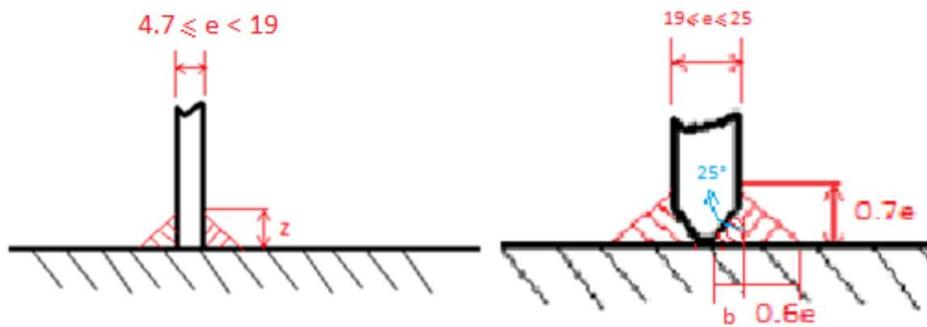


Figura 31 - Área de Preenchimento - Junta T (BAPTISTA, 2018)

Segundo a AWS (*American Welding Society*), o dimensionamento da junta filete é feito através da menor espessura entre os elementos soldados, sendo a dimensão da perna “z” (Figura 31) definida como 75% desta espessura.

Sendo assim, a solda do tipo filete sem chanfro pode ser calculada usando a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \text{Área}_{T\text{Filete}} &= 2 \cdot A = 2 \cdot \frac{B \cdot h}{2} = (0.75e) \cdot (0.75e) \\ &= (0.75e)^2 \end{aligned} \quad (53)$$

A expressão para o cálculo do volume de solda (para apenas um bordo), de reforçadores ou vigas é dado pela seguinte expressão:

$$\text{Volume}_{\text{solda}_{ref}} = L_{\text{parte}} \left(nr \cdot (0.75t_{ref})^2 + n_{flange} (0.75t_{ref})^2 \right) \quad (54)$$

Onde,

$\text{Volume}_{\text{solda}_{ref}}$ - Volume de Solda do reforçador em “m³”

nr - Número de reforçadores na parte analisada

t_{ref} - Espessura do reforçador em “m”

n_{flange} - Número de flanges (se for barra chata esse valor será 0, se for T esse valor será igual a “nr”)

L_{parte} - Comprimento da parte onde está o reforçador em “m”

Um exemplo numérico de cálculo de volume de solda (para apenas um bordo) de reforçadores no fundo da parte 1 pode ser encontrado no “ANEXO 2 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE VOLUME DE SOLDA DA LANCHAS”.

Para o cálculo do volume de solda de cavernas e hastilhas em um bordo, a seguinte expressão é usada:

$$Volume_{solda_cav} = Comp_{cav} \left((0.75t_{cav})^2 + f_{flange} (0.75t_{flange})^2 \right) \quad (55)$$

Onde,

$Volume_{solda_cav}$ - Volume de Solda da caverna em “m³”

$Comp_{cav}$ - Comprimento da caverna em “m”

t_{cav} - Espessura da alma da caverna “m”

f_{flange} - Variável 0 ou 1 (se for barra chata esse valor será 0, se for T esse valor será igual a 1)

t_{flange} - Espessura do flange da caverna “m”

Um exemplo numérico de cálculo de volume de solda (para apenas um bordo) de uma caverna pode ser encontrado no “ANEXO 2 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE VOLUME DE SOLDA DA LANCHAS”.

Para o cálculo do volume de solda de chapas em um bordo, a seguinte expressão é usada:

$$Volume_{solda_chapa} = ÁreaV(ou X) * L_{solda} \quad (56)$$

Onde,

L_{solda} - Comprimento de Solda da caverna em “m”

$ÁreaV(ou X)$ - Área de solda de topo em “m²”, segundo equações (51) ou (52).

Um exemplo numérico de cálculo de volume de solda (para apenas um bordo) de chapas pode ser encontrado no “ANEXO 2 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE VOLUME DE SOLDA DA LANCHAS”.

O Volume de solda total da embarcação, será a soma de todos os elementos calculados anteriormente vezes dois (para considerar os 2 bordos):

$$Volume_Solda = 2 * \left(\sum Volume_{Solda_refs} + \sum Volume_{Solda_chapas} + \sum Volume_{Solda_cavs} + \sum Volume_{Solda_hasts} \right) \quad (57)$$

No “ANEXO 2 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE VOLUME DE SOLDA DA LANCHA” pode ser encontrada uma planilha de exemplo de cálculo de volume de solda total da lancha.

3.5 Variáveis de projeto

Foram escolhidas 31 variáveis de projeto baseados na Figura 23:

- Espaçamento entre transversais (l)
- Comprimento da longarina central (l_bar_keel)
- Comprimento do flange da longarina central (l_bar_keel_flange)
- Comprimento do flange do longitudinal do fundo (l_bottom_long_flange)
- Comprimento da alma do longitudinal do fundo (l_bottom_long_web)
- Comprimento do flange da hastilha (l_bottom_transverse_flange)
- Comprimento do flange do reforço da antepara (l_bulk_flange)
- Comprimento da alma do reforço da antepara (l_bulk_web)
- Comprimento do flange do longitudinal do convés (l_deck_long_flange)
- Comprimento da alma do longitudinal do convés (l_deck_long_web)
- Comprimento do flange do longitudinal do costado (l_side_long_flange)
- Comprimento da alma do longitudinal do costado (l_side_long_web)
- Comprimento do flange da caverna (l_side_transverse_flange)
- Número de longitudinais do costado (ncl)
- Número de longitudinais do fundo (nl)
- Espessura da longarina central (t_bar_keel)
- Espessura da alma do flange da longarina central (t_bar_keel_flange)
- Espessura da chapa do fundo (t_bottom)
- Espessura do longitudinal do fundo (t_bottom_long)
- Espessura da alma da hastilha (t_bottom_transverse)
- Espessura do flange da hastilha (t_bottom_transverse_flange)

- Espessura do reforçador da antepara (t_bulk_long)
- Espessura da chapa de antepara ($t_bulkhead$)
- Espessura da chapa do deque (t_deck)
- Espessura do longitudinal do deque (t_deck_long)
- Espessura da chapa da quilha ($t_flange_plate_keel$)
- Espessura da barra de reforço do deque (t_sheer_bar)
- Espessura da chapa do costado (t_side)
- Espessura do longitudinal de costado (t_side_long)
- Espessura do flange da caverna ($t_side_transverse_flange$)
- Espessura da alma da caverna ($t_side_transverse_web$)

Essas variáveis podem ser vistas na figura abaixo:

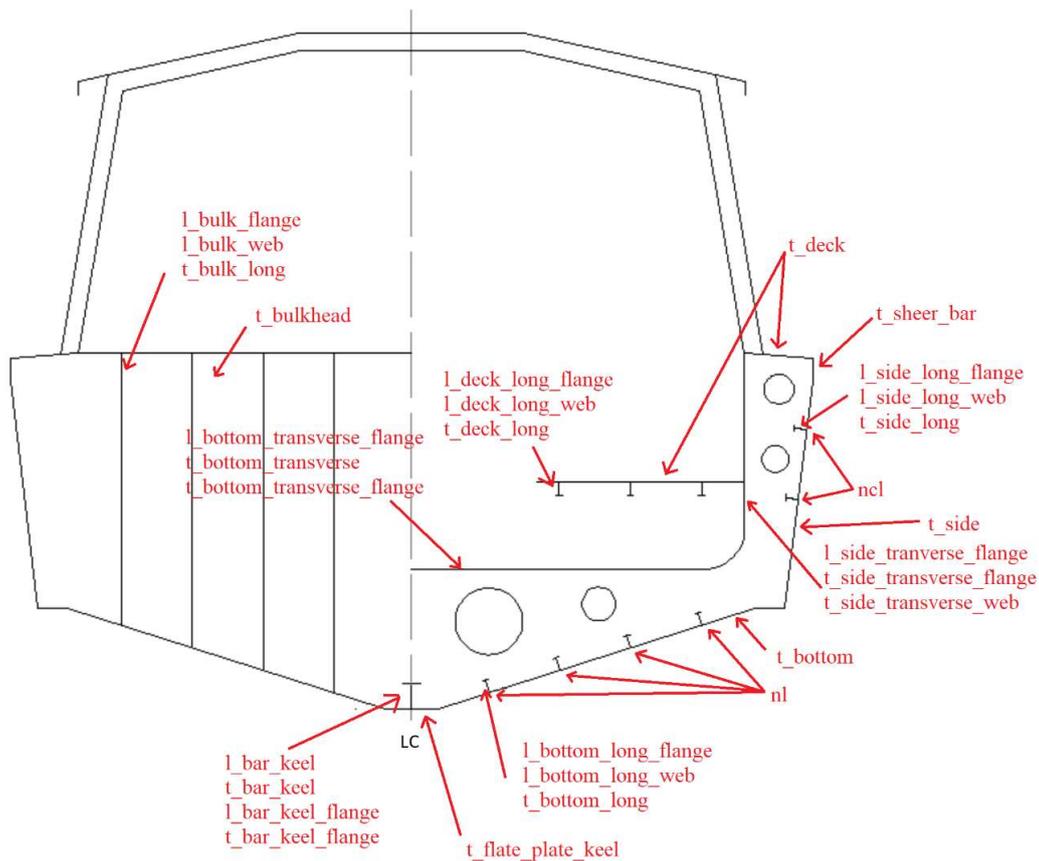


Figura 32 - Seção mostrando variáveis de projeto (fonte: autor)

A única variável que não aparece na Figura 32 é o Espaçamento entre transversais

(l).

Importante salientar que essas variáveis de projeto não só representam elas na seção mestra como na mostradas na Figura 32, mas também em todas as outras partes da embarcação. Para fazer essa aproximação todas elas foram calculadas nos piores casos como explicado posteriormente.

3.6 Restrições de projeto

As restrições de projeto, são as limitações que o otimizador deve respeitar, de forma que consiga calcular soluções viáveis tecnicamente, tendo em vista que existe muitas possibilidades.

Para o cálculo das restrições de projeto, foi usado a regra da DNV para o cálculo da estrutura (VERITAS, 2015).

As restrições do projeto foram calculadas usando os arquivos “ts202”, “hs301” e “hs302” da regra. Foi feita uma planilha de cálculo (“Calculo_Estrutura”) onde foram criadas abas com os mesmos nomes desses arquivos, os cálculos presentes na planilha foram demonstrados a seguir.

Importante mencionar que os conceitos estudados sobre fadiga, corrosão e fratura frágil estudados no referencial teórico, não foram aplicados na metodologia proposta.

As fórmulas a seguir, terão exemplos numéricos de cálculos demonstrados no “ANEXO 3 - EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS RELACIONADOS A VARIAÇÃO DE PESO, CALADO, LW, CB E Z DA LANCHA”.

3.6.1 Variação de Peso, Calado, Lw, Cb e Z da lancha

Antes de explicar como a regra usa os dados da embarcação, é importante citar que a planilha considera as variações de Peso, calado, Coeficiente de Bloco (Cb) e módulo de seção (Z) à medida que o modelo otimizado muda de peso.

Para fazer essa consideração foi feito um gráfico da área alagada para meia seção, considerando variações de calado desde 0,34m até 0,46m:

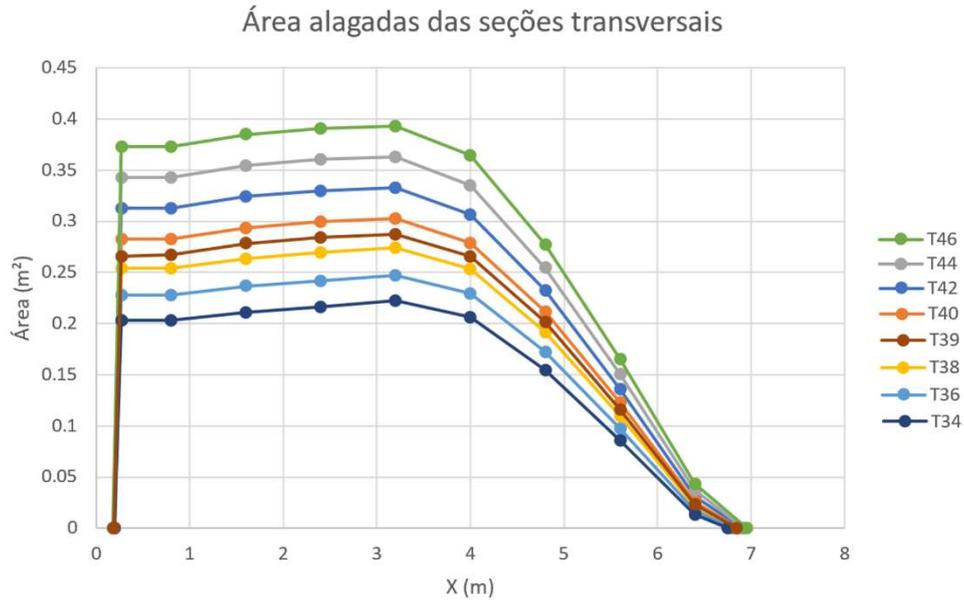


Figura 33 - Área alagada das meias seções transversais (fonte: autor)

A partir desse gráfico é possível calcular o deslocamento da embarcação para diversos calados usando a seguinte expressão:

$$\Delta(T) = 2 * \rho_{mar} \int_0^{Lw} A(x, T) dx \quad (58)$$

Onde,

$\Delta(T)$ - Deslocamento em “ton”

ρ_{mar} - Densidade da água do mar em “ton/m³”

Lw - Comprimento da linha d’água no calado considerado em “m”

$A(x, T)$ - Função da área transversal alagada na posição “x” e calado “T” em “m²”

dx - Comprimento infinitesimal em “m”

Porém a função $A(x, T)$ é discreta possuindo somente 11 valores para cada calado, assim a expressão (58) se torna:

$$\Delta(T) = 2 * \rho_{mar} \sum_{i=1}^{i=10} \frac{(A(x, T)_{i+1} + A(x, T)_i)}{2} * (x_{i+1} - x_i) \quad (59)$$

Para se calcular o coeficiente de bloco (C_b), usa-se a seguinte expressão:

$$Cb = \frac{\nabla(T)}{\nabla_{bloco}(T)} \quad (60)$$

Onde,

- Cb - Coeficiente de bloco
 $\nabla(T)$ - Volume submerso em “m³”
 $\nabla_{bloco}(T)$ - Volume submerso do bloco em “m³”

O volume submerso e o volume submerso do bloco podem ser calculados usando as seguintes expressões:

$$\nabla(T) = 2 * \sum_{i=1}^{i=10} \frac{(A(x, T)_{i+1} + A(x, T)_i)}{2} * (x_{i+1} - x_i) \quad (61)$$

$$\nabla_{bloco}(T) = 2 * Largura_{alagada} * (Lw) * T \quad (62)$$

Onde,

- $Largura_{alagada}$ - Máxima meia boca alagada em “m”
 Lw - Comprimento de linha d’água em “m” ($x_{10} - x_1$)
 T - Calado da lancha em “m”

Usando as equações (60) e (59), foi possível calcular “Cb” e Deslocamento para os calados: 0.36m, 0.38m, 0.39m, 0.40m, 0.42m e 0.44m. A partir dos resultados, foram plotados os seguintes gráficos:

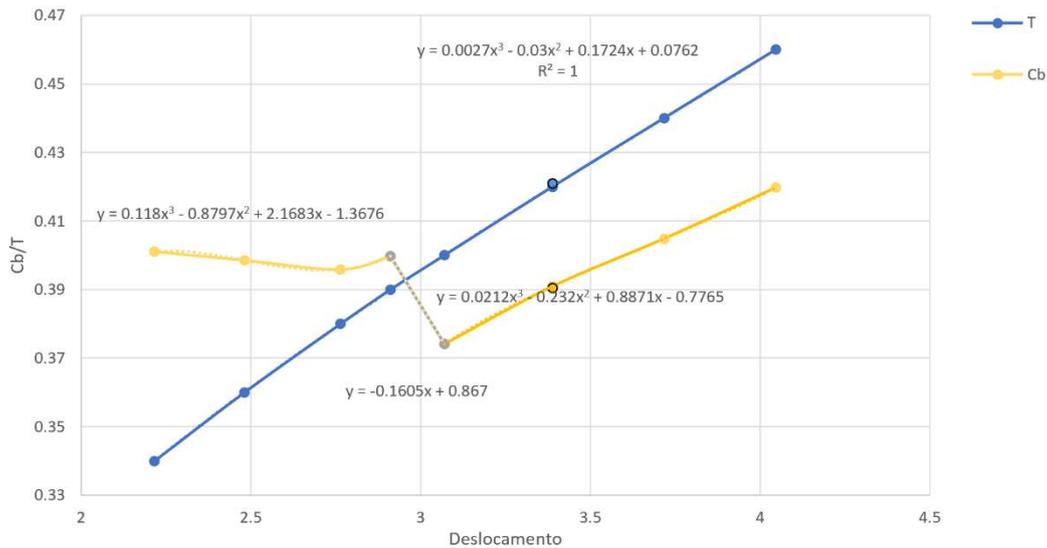


Figura 34 - Gráfico de Deslocamento X Cb/T (fonte: autor)

É interessante notar que na Figura 34 existe uma região central descontínua em relação a valores de Cb, isto se deve ao fato de existir uma quina no casco nessa região.

Também com ajuda do modelo 3D foi medido e plotado o gráfico da Figura 35, que correlaciona os deslocamentos dos calados anteriormente obtidos com as seguintes variáveis: comprimento de linha d'água ("Lw"), posição longitudinal do centro de carena ("LCB") e posição da longitudinal de ré ("AP").

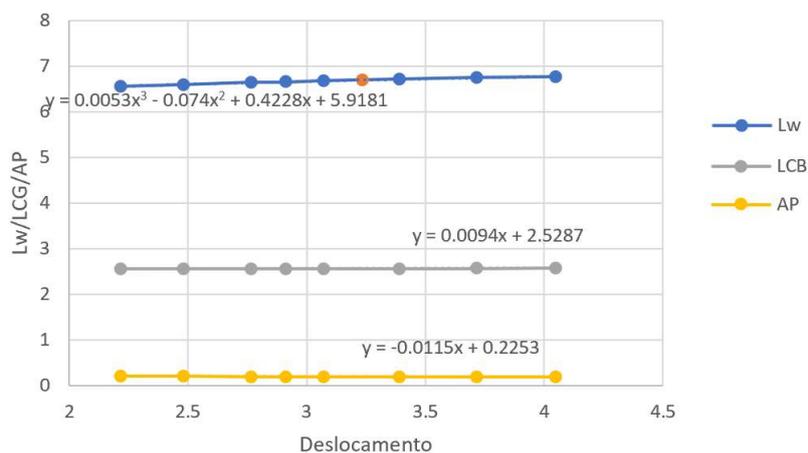


Figura 35 - Gráfico Deslocamento X Lw/LCB/AP (fonte: autor)

A partir do gráfico da Figura 34, foi possível fazer interpolações de valores de Cb e T para deslocamentos diferentes dos calculados para os calados iniciais escolhidos usando as expressões presentes nos gráficos.

Para se calcular o deslocamento da embarcação otimizada, primeiro se deve saber o deslocamento da embarcação original. A embarcação original possui calado de 0.42m.

Usando informações da Figura 33, juntamente com a equação (59), chega ao seguinte valor de deslocamento original da embarcação:

$$\Delta_{original}(0.42m) = 3.39ton \quad (63)$$

O peso da estrutura original da embarcação pode ser calculado usando a equação (49) com os dados da estrutura original da lancha, resultando:

$$Peso_{original} = 1011.84Kg \quad (64)$$

Para calcular um deslocamento diferente do original ($\Delta_{otimizado}$), a seguinte expressão pode ser usada:

$$\Delta_{otimizado} = \frac{(Peso_{otimizado} - Peso_{original})}{1000} + \Delta(0.42m) \quad (65)$$

Onde,

$\Delta_{otimizado}$ - Deslocamento da embarcação otimizada em “ton”

$Peso_{otimizado}$ - Peso do novo arranjo estrutural otimizado em “kg”

$Peso_{original}$ - Peso do arranjo estrutural original em “kg”

A partir do $\Delta_{otimizado}$, pode-se usar as interpolações dos gráficos da Figura 34 e Figura 35 para se obter o C_b , T , L_w , LCB e AP .

Para se calcular o módulo de seção (Z) é usada a seguinte expressão:

$$Z = \frac{\sum I_i}{y} \quad (66)$$

Onde,

Z = módulo de seção em “cm³”

I_i = momento de inércia de um elemento “i” da estrutura em relação a linha neutra da embarcação em “cm⁴” (aqui deverão considerados todos os elementos estruturais que estão na seção mestra e que tem inércia em relação a linha neutra)

y = distância da linha neutra até o pontal da embarcação em “cm” (é usado o pontal por ser a maior distância)

3.6.2 Propriedades mecânicas do alumínio

As propriedades dos materiais metálicos usados na embarcação são calculadas usando o arquivo “ts202” da regra da DNV.

Nesta parte é feita verificação das propriedades mecânicas do alumínio usado nas chapas e perfis da lancha.

O projeto original usa chapas de alumínio NV-5086 H116, na regra se obtém a seguinte tabela contendo a tensão de escoamento de chapas:

Table A2 Mechanical properties for rolled aluminium alloys						
Grade	Temper	Thickness, t (mm)	Yield strength $R_{p0.2}$ min. or range (MPa)	Tensile strength R_m min. or range (MPa)	Elongation ¹⁾	
					$A_{50\text{mm}}$ min. (%)	A_{5d} min. (%)
NV-5052	O	t ≤ 50	65	165 to 215	19	18
	H32	t ≤ 6	130	210 to 260	10	
		6 < t ≤ 50	130	210 to 260	12	12
	H34	t ≤ 6	150	230 to 280	7	
6 < t ≤ 50		150	230 to 280	9	9	
NV-5059	O	t ≤ 50	160	330		24
	H111	t ≤ 50	160	330	24	24
	H116	t ≤ 20	270	370	10	10
		20 < t ≤ 50	260	360	10	10
	H321	t ≤ 20	270	370	10	10
20 < t ≤ 50		260	360	10	10	
NV-5083	O	t ≤ 50	125	275 to 350	16	14
	H111	t ≤ 50	125	275 to 350	16	14
	H112	t ≤ 50	125	275	12	10
	H116	t ≤ 50	215	305	10	10
	H321	t ≤ 50	215 to 295	305 to 385	12	10
NV-5086	O	t ≤ 50	95	240 to 305	16	14
	H111	t ≤ 50	95	240 to 305	16	14
	H112	t ≤ 12.5	125	250	8	
		12.5 < t ≤ 50	105	240		9
	H116	t ≤ 6.3	195	275	8	
6.3 < t ≤ 50		195	275	10	9	

Tabela 2 - propriedades mecânicas da chapa de alumínio (VERITAS, 2015)

Portanto a Tensão de escoamento da chapa é: 195MPa.

O alumínio NV-5086 H116 tem densidade de 2666 kg/ m³.

O projeto original usa perfis extrudados de alumínio NV-6061 T6, na regra se obtém a seguinte tabela contendo a tensão de escoamento de perfis extrudados:

Table A3 Mechanical properties for extruded aluminium alloys						
Grade	Temper	Thickness, t (mm)	Yield strength $R_{p0.2}$ min. (MPa)	Tensile strength R_m min. or range (MPa)	Elongation l_1	
					$A_{50\text{mm}}$ min. (%)	A_{5d} min. (%)
NV-5059	H112	t ≤ 50	200	330	10	10
NV-5083	O	t ≤ 50	110	270 to 350	14	12
	H111	t ≤ 50	165	275	12	10
	H112	t ≤ 50	110	270	12	10
NV-5086	O	t ≤ 50	95	240 to 315	14	12
	H111	t ≤ 50	145	250	12	10
	H112	t ≤ 50	95	240	12	10
NV-5383	O	t ≤ 50	145	290	17	17
	H111	t ≤ 50	145	290	17	17
	H112	t ≤ 50	190	310	13	13
NV-6005A	T4	t ≤ 50	90	180	15	13
	T5	t ≤ 50	215	260	9	8
	T6	t ≤ 10	215	260	8	6
		10 < t ≤ 50	200	250	8	6
NV-6060	T4	t ≤ 50	60	120	16	14
	T5	t ≤ 50	100	140	8	6
	T6	t ≤ 50	140	170	8	6
NV-6061	T4	t ≤ 50	110	180	15	13
	T5	t ≤ 50	205	240	6	7
	T6	t ≤ 50	240	260	10	8

Tabela 3 - propriedades mecânicas do perfil de alumínio (VERITAS, 2015)

Portanto a Tensão de escoamento do perfil é: 240MPa.

O alumínio NV-6061 T6 tem densidade de 2710 kg/ m³.

3.6.3 Princípios de projeto e carregamentos de projeto

A seguir serão demonstrados os procedimentos de cálculos de alguns princípios de projeto, assim como carregamentos que serão usados posteriormente no modelo proposto, todos contidos no arquivo “hs301” da norma da DNV (VERITAS, 2015).

Para exemplo numérico de cálculos desses princípios e carregamentos, foi usado um modelo otimizado de exemplo, e pode ser encontrado no “ANEXO 4 - EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS RELACIONADOS A PRINCIPIOS DE PROJETO E CARREGAMENTOS DE PROJETO”.

3.6.3.1 Posição da antepara de colisão

No início é calculado a posição da antepara de colisão através das seguintes equações:

$$x_{c_{\text{minimo}}}(m) = 0.05 * L \quad (67)$$

$$x_{c_{\text{maximo}}}(m) = 3 + 0.05 * L \quad (68)$$

Onde,

$x_{c_{\text{minimo}}}$ - Distância mínima da antepara em relação a perpendicular de vante

$x_{c_{\text{maximo}}}$ - Distância máxima da antepara em relação a perpendicular de vante

L - Comprimento da linha d'água no calado de projeto em "m"

Das equações (67) e (68), se obtém o limite mínimo e máximo de distância da antepara de vante até a antepara de colisão; este valor dependerá da variável L (Comprimento da linha d'água) obtido através de interpolações dos gráficos da Figura 35. Depois de obtido esse valor, ele é comparado com o valor da posição da antepara original de 1.35m.

3.6.3.2 Coeficiente de onda (Cw)

O Coeficiente de onda (Cw) pode ser calculado usando a seguinte expressão:

$$C_w = 0.08 * L \quad (69)$$

Onde,

L - Comprimento da linha d'água no calado de projeto em "m"

A regra também fornece a seguinte tabela para redução do Cw:

Tabela 4 - Tabela de redução do coeficiente de onda (VERITAS, 2015)

<i>Class notation</i>	<i>Reduction</i>
R0	0
R1	0
R2	10%
R3	20%
R4	40%
R5-R6	60%

Pode ser visto na equação (69), que o coeficiente de onda depende da variável L (Comprimento da linha d'água) obtido através de interpolações dos gráficos da Figura 35. A Tabela 4 propõem uma tabela de reduções desse coeficiente de onda, no caso do modelo

otimizado foi escolhida a classe de notação R3 (navegação em águas costeiras), que possui uma redução de 20% no valor do coeficiente.

3.6.3.3 Aceleração vertical de projeto

A aceleração vertical do centro de gravidade de projeto é calculada usando a seguinte expressão da regra:

$$a_{cg} = \frac{V}{\sqrt{L}} * \frac{3.2}{L^{0.76}} * f_g * g_0 \quad (70)$$

Onde,

a_{cg} = aceleração vertical do centro de gravidade de projeto em “m/s²”

f_g = fator de aceleração, fração de g_0 , obtido dependendo do tipo e a notação de serviço e a notação de restrição de serviço de área dado pela Tabela 5. Usando a restrição de serviço R3 para lancha “Patrol” obtém-se o valor de “1”.

$V = 30$ nós (obtido do projeto original da lancha)

$g_0 = 9.81$ m/s² (aceleração da gravidade)

L (comprimento de linha d’água em “m”, obtida de interpolações dos gráficos da Figura 35)

$$\frac{V}{\sqrt{L}} > 3 \text{ (requisito da regra)}$$

A regra também fornece a seguinte tabela para obtenção do fator de aceleração (fg):

Tabela 5 - Tabela para obtenção do fator "fg" (VERITAS, 2015)

Acceleration factor f_g						
Type and service notation	Service area restriction notation					
	R0	R1	R2	R3	R4	R5-R6
Passenger	1)	1	1	1	1	0.5
Car ferry	1)	1	1	1	1	0.5
Cargo	4	3	2	1	1	0.5
Patrol	7	5	3	1	1	0.5
Yacht	1	1	1	1	1	0.5

1) Service area restriction R0 is not available for class notations Passenger and Car Ferry.

3.6.3.4 Aceleração horizontal de projeto

A aceleração horizontal de projeto é calculada usando a seguinte expressão da regra:

$$a_l = 2.5 * \frac{C_w}{L} * \left(0.85 + 0.25 * \frac{V}{\sqrt{L}}\right)^2 * g_0 \quad (71)$$

Onde,

a_l = aceleração horizontal de projeto em m/s²

C_w = Coeficiente de onda (valor obtido na seção 3.6.3.2)

V = 30 nós (obtido do projeto original da lancha)

g_0 = 9.81 m/s² (aceleração da gravidade)

L (comprimento de linha d'água, obtida de interpolações dos gráficos da Figura 35)

$$\frac{V}{\sqrt{L}} > 4 \text{ (requisito da regra)}$$

3.6.3.5 Pressão de *Slamming* no fundo

A pressão de *slamming* (batimento) no fundo é calculado usando a seguinte expressão da regra e gráficos:

$$P_{sl} = 1.3 * k_l * \left(\frac{\Delta}{nA}\right)^{0.3} * T_o^{0.3} * \frac{50 - \beta_x}{50 - \beta_{cg}} * a_{cg} \quad (72)$$

Onde,

P_{sl} = pressão de *slamming* em kN/m²

Δ = deslocamento em “t” no calado de projeto (obtido através da equação (65))

k_l = 1 para toda a extensão da lancha, essa escolha foi conservadora, pois esse valor de “ k_l ” geraria pressão de *slamming* maior (extraído da Figura 36).

n = 1 (número de cascos)

s = espaçamento entre reforçadores ou vigas em “m”

l = comprimento da chapa ou do reforçador em “m”

A = área de projeto em “m²” para o elemento considerado. Para chapas seu valor não deve ser maior que $2.5 \cdot s^2$. Para $l/s < 2.5$, “ A ” deve ser igual a $s \cdot l$. Para reforçadores ou vigas “ A ” deve ser igual $s \cdot l$. “ A ” deve ser sempre maior que $0.002 \cdot (\Delta / T)$.

β_x = ângulo de “*deadrise*” da seção transversal considerada (mínimo valor de 10° e máximo de 30°), calculado usando a Figura 37.

β_{cg} = ângulo de “*deadrise*” da seção do centro de gravidade (mínimo valor de 10° e máximo de 30°), calculado usando a Figura 37.

T_0 = calado de projeto em “m” (obtido da interpolação da Figura 34)

a_{cg} = aceleração vertical do centro de gravidade em “m/s²” (obtido na seção 3.6.3.3)

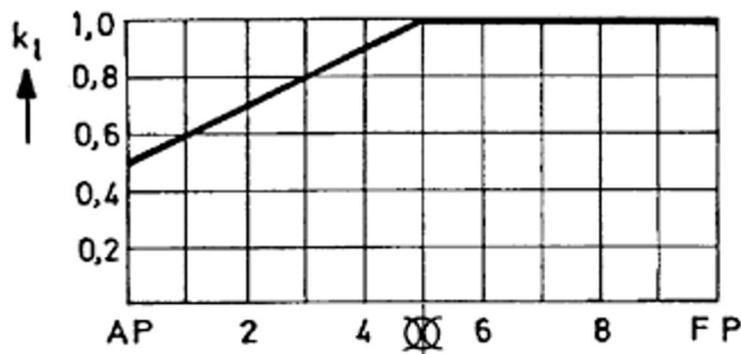


Figura 36 – Gráfico usado para se obter k_1 (VERITAS, 2015)

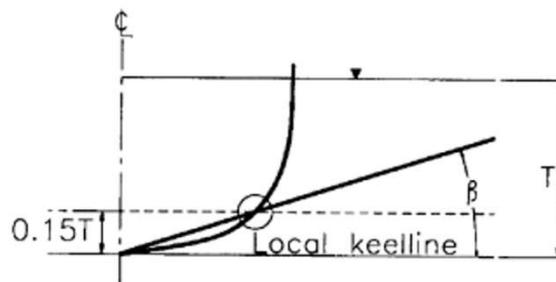


Figura 37 – Figura para auxílio no cálculo de β_x e β_{cg} (VERITAS, 2015)

3.6.3.6 Pressão do mar

A pressão do mar calculada na regra usa duas fórmulas diferentes; uma para pontos acima da linha d’água e outra para pontos abaixo da linha d’água, para o cálculo da pressão de pontos abaixo da linha d’água, a seguinte expressão é usada:

$$p = 10 * h_0 + \left(k_s - 1.5 * \frac{h_0}{T} \right) * C_w \quad (73)$$

Para pontos acima da linha d'água, a seguinte expressão é usada:

$$p = a * k_s * (C_w - 0.67 * h_0) \quad (74)$$

Onde,

- h_0 = distância vertical em “m” do ponto da altura do calado até o ponto que se quer medir a pressão.

- k_s = coeficiente extraído do gráfico da Figura 38

- T = calado de projeto (calado de projeto em “m” (obtido da interpolação da Figura 34)

- C_w = Coeficiente de onda (valor obtido na seção 3.6.3.2)

$a = 1$ (para costado e deque de borda livre aberta)

$a = 0.8$ (para deques expostos ao tempo acima do deque de borda livre)

A regra também estabelece as pressões mínimas segundo a seguinte tabela:

Tabela 6 - Pressão do mar mínima (VERITAS, 2015)

Minimum sea pressures			
Notation	Sides	Weather decks	Roofs higher than 0.1 L above WL
R0, R1, R2, R3	6.5	5	3
R4	5	4	3
R5-R6	4	3	3

Para o cálculo de “ks” a regra fornece o seguinte gráfico:

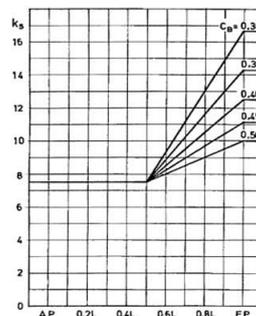


Figura 38 – gráfico que correlaciona ks com Cb (VERITAS, 2015)

3.6.3.7 Carregamentos na viga navio

Nesta seção serão demonstrados os cálculos necessários para se obter os seguintes carregamentos na viga navio: momento fletor longitudinal de slamming (crest – quando está na crista da onda), momento fletor longitudinal de slamming (hollow – quando está no cavado da onda), o momento fletor longitudinal de alquebramento (Hog), momento fletor de tosamento (Sag), forças de cisalhamento causados pelos momentos e forças axiais.

Primeiramente a regra estipula uma área de referência que a pressão do *slamming* irá atuar. A área em questão deve ser situada com o ponto de carregamento na posição longitudinal do centro de gravidade. Essa área é válida para lanchas com $V/\sqrt{L} > 3$ (que é o caso da lancha em estudo) e pode ser calculada usando a seguinte expressão:

$$A_R = k * \Delta * \frac{\left(1 + 0.2 * \frac{a_{cg}}{g_0}\right)}{T} \quad (75)$$

Sendo:

A_R = área de referência em “m²”

$k = 0.7$ (para crista de onda)

$k = 0.6$ (para o cavado da onda)

Δ = deslocamento em “t” no calado de projeto (obtido através da equação (65))

a_{cg} = aceleração vertical do centro de gravidade em “m/s²” (obtido na seção 3.6.3.3)

$g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2$ (aceleração da gravidade)

T = calado de projeto (calado de projeto em “m” (obtido da interpolação da Figura 34)

L = Comprimento de linha d’água

A regra também fornece a seguinte expressão para o momento fletor longitudinal no meio do navio na crista (crest):

$$M_{B_CREST} = \frac{\Delta}{2} * (g_0 + a_{cg}) * \left(e_w - \frac{l_s}{4} \right) \quad (76)$$

Onde:

M_{B_CREST} = momento fletor longitudinal no meio do navio na crista em “kNm”

Δ = deslocamento em “t” no calado de projeto (obtido através da equação (65))

$g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2$ (aceleração da gravidade)

a_{cg} = aceleração vertical do centro de gravidade em “m/s²” (obtido na seção 3.6.3.3)

e_w = obtido através da equação (77)

l_s = extensão longitudinal da área de referência de slamming (obtido através da equação (78))

$e_w - \frac{l_s}{4} > 0.04 * L$ (requisito da regra)

Para calcular o “ e_w ” usa-se a seguinte expressão:

$$e_w = 0.25 * L \quad (77)$$

Onde:

L = comprimento de linha d’água, obtida de interpolações dos gráficos da Figura 35

É importante observar, que o “ e_w ” é metade da distância entre o centro de gravidade da metade de ré da seção mestra até o centro de gravidade da metade de vante da seção mestra, como não se possui essa informação, a regra diz que se pode calcular com a fórmula usada acima.

Para o cálculo de “ l_s ” (extensão longitudinal da área de referência de slamming), a regra oferece a seguinte equação:

$$l_s = \frac{A_R}{b_S} \quad (78)$$

Onde:

A_R = área de referência em “m²” calculada na equação (75)

b_S = boca da embarcação em “m”

A regra fornece a seguinte equação para o momento fletor longitudinal no meio do navio no cavado (hollow):

$$M_{B_HOLLOW} = \frac{\Delta}{2} * (g_0 + a_{cg}) * (e_r - e_w) \quad (79)$$

Onde:

M_{B_HOLLOW} = momento fletor longitudinal no meio do navio no cavado em “kNm”

Δ = deslocamento em “t” no calado de projeto (obtido através da equação (65))

$g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2$ (aceleração da gravidade)

a_{cg} = aceleração vertical do centro de gravidade em “m/s²” (obtido na seção 3.6.3.3)

e_r = distância média dos centros das áreas finais AR/2 até o centro de gravidade do navio

e_w = metade da distância entre o centro de gravidade da metade de ré da seção mestra até o centro de gravidade da metade de vante da seção mestra

$e_r - e_w$ = obtido da equação (80) (por não se ter informação do LCG)

Como não era conhecido o “ e_r ”, por não se conhecer o LCG, foi usado o seguinte valor dado na regra:

$$(e_r - e_w) = 0.04 * L \quad (80)$$

Onde:

L = comprimento de linha d’água, obtida de interpolações dos gráficos da Figura 35

Para o momento fletor de água parada do alquebramento (M_{SW_hog}), a regra fornece a seguinte expressão:

$$M_{SW_hog} = 0.11 * C_W * L^2 * B * C_B \quad (81)$$

Onde:

M_{SW_hog} = momento fletor de água parada do alquebramento em “kNm”

C_w = Coeficiente de onda (valor obtido na seção 3.6.3.2)

L = comprimento de linha d'água, obtida de interpolações dos gráficos da Figura 35

B = boca da embarcação em “m”

C_b = coeficiente de bloco da embarcação (obtido da interpolação do gráfico da Figura 34)

A regra fornece a seguinte equação para o momento fletor longitudinal de alquebramento (hog):

$$M_{tot_hog} = M_{SW_hog} + 0.19 * C_w * L^2 * B * C_b \quad (82)$$

Onde:

M_{tot_hog} = momento fletor longitudinal de alquebramento (hog) em “kNm”

M_{SW_hog} = momento fletor de água parada do alquebramento (retirado da equação (81))

C_w = Coeficiente de onda (valor obtido na seção 3.6.3.2)

L = comprimento de linha d'água, obtida de interpolações dos gráficos da Figura 35

B = boca da embarcação em “m”

C_b = coeficiente de bloco da embarcação (obtido da interpolação do gráfico da Figura 34)

Para o tosamento, a regra diz que o momento fletor de água parada do tosamento (M_{SW_sag}) pode ser igual a zero se não for conhecido, por isso foi usado o valor zero.

A regra fornece a seguinte equação para o momento fletor longitudinal de tosamento (sag):

$$M_{tot_sag} = M_{SW_sag} + 0.14 * C_w * L^2 * B * (C_b + 0.7) \quad (83)$$

Onde:

$M_{SW_sag} = 0$ (como explicado anteriormente)

C_w = Coeficiente de onda (valor obtido na seção 3.6.3.2)

L = comprimento de linha d'água, obtida de interpolações dos gráficos da Figura 35

B = boca da embarcação em “m”

C_b = coeficiente de bloco da embarcação (obtido da interpolação do gráfico da Figura 34)

A regra fornece a seguinte expressão para o cálculo das forças de cisalhamento devido a momentos fletores:

$$Q_b = \frac{M_B}{0.25 * L} \quad (84)$$

Onde:

Q_b = Força de cisalhamento devido a momentos fletores em “kN”

M_b = momento fletor usado (pode ser

M_{B_CREST}, M_{B_HOLLOW}, M_{tot_hog} ou M_{tot_sag}) em “kNm”

L = comprimento de linha d’água, obtida de interpolações dos gráficos da Figura 35

Para se calcular a tensão de cisalhamento na seção mestra, é necessário fazer o cálculo da área da seção mestra somando a área transversal de todos os elementos estruturais da seção mestra:

$$A_{mestra} = \sum A_{elemento_estrutural} \quad (85)$$

Com a área da seção mestra calculada, pode-se calcular a tensão de cisalhamento usando a seguinte expressão:

$$\tau(MPA) = \frac{Q_b(kN)}{A(m^2)} * 10^{-3} \quad (86)$$

Onde:

A = área de seção mestra em “m²” (obtida da equação (85))

Q_b = Força de cisalhamento em “kN” (obtida da equação (84))

A regra fornece a seguinte expressão para o cálculo das forças axiais devido ao avanço da embarcação (*Surge*):

$$surge = \Delta \cdot a_l \quad (87)$$

Onde:

surge = força de *surge* em “kN”

Δ = deslocamento em “t” no calado de projeto (obtido através da equação (65))

g_0 = aceleração da gravidade de 9,81 m/s²

$a_l = 0.4 * g_0$ em “m/s²” para $V/\sqrt{L} > 5$ (que é o caso da lancha em estudo)

$a_l = 0.2 * g_0$ em “m/s²” para $V/\sqrt{L} < 5$ (não se aplica a lancha em estudo)

Assim, pode-se calcular a tensão devido ao avanço da embarcação (*Surge*) usando a seguinte expressão:

$$\sigma_{surge} = \frac{surge}{A_{mestra}} * 10^{-3} \quad (88)$$

Onde,

σ_{surge} = tensão de *surge* em “MPa”

surge = força de *surge* em “kN”

A_{mestra} = área da seção mestra em “m²”

Depois se compara a tensão obtida com a tensão de escoamento de chapas de alumínio (195MPa) e com a tensão de escoamento de perfis extrudados do alumínio (240MPa).

3.6.4 Projeto estrutural do casco de alumínio

A seguir serão demonstrados os cálculos do projeto estrutural do casco de alumínio aplicada na metodologia, todos retirados do arquivo “hs303” da norma da DNV (VERITAS, 2015).

Para exemplo numérico desses cálculos, foi usado um modelo otimizado de exemplo, e pode ser encontrado no “ANEXO 5 - EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS RELACIONADOS AO PROJETO ESTRUTURAL DO CASCO DE ALUMÍNIO”.

3.6.4.1 Resistência a flexão vertical

A regra fornece a seguinte expressão para o módulo de seção requerido necessário para resistir a flexão vertical na viga navio:

$$Z = \frac{M}{\sigma} * 10^3 \quad (89)$$

Sendo:

Z = módulo de seção requerido em “cm³”

M = momento fletor (pode ser M_{B_CREST} , M_{B_HOLLOW} , $M_{tot_{hog}}$, $M_{tot_{sag}}$) em “kNm”

$f_1 = 0.71$ (menor valor entre chapas ou perfis extrudados obtido comparando Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9)

$$\sigma = 175 * f_1 = 175 * 0.71 = 124.25 \text{ N/mm}^2$$

Tabela 7 – Tabela usada para obtenção do fator “ f_1 ” de chapas de alumínio V-5086 H116 (VERITAS, 2015)

Table B1 Factor f_1 for wrought aluminium alloy sheets, strips and plates, t: 2 mm ≤ t ≤ 40 mm (Continued)		
DNV Designation	Temper	f_1
V-5086	H116, H32 H34	0.80 0.88
NV-5083	H116, H321	0.89
NV-5383	H116, H34	0.89

Note: For tempers 0 and H111, the factor f_1 is to be taken from Table B4.

Tabela 8 – Tabela usada para obtenção do fator “ f_1 ” para perfis extrudados de alumínio NV-6061 (VERITAS, 2015)

Table B2 Factor f_1 for extruded aluminium alloy profiles, rods and tubes, t: 2 mm ≤ t ≤ 25 mm		
DNV Designation	Temper	f_1
NV-6060	T5	0.55
NV-6061	T4 T5/T6	0.46 0.76
NV-6063	T5 T6	0.44 0.60
NV-6005A	T5/T6	0.76
NV-6082	T4 T5/T6	0.46 0.90

Note: Table B2 only applies when the main loading direction is longitudinal to the extrusion, see also Table B3.

Tabela 9 – Tabela usada para obtenção do fator “ f_1 ” para perfis extrudados de alumínio NV-6061 (VERITAS, 2015)

Table B3 Factor f_1 for extruded aluminium alloy profiles, rods and tubes, t: 2 mm ≤ t ≤ 25 mm, transverse to extruding direction		
DNV Designation	Temper	f_1
NV-6060	T5	0.51
NV-6061	T4 T5/T6	0.46 0.71
NV-6005A	T5/T6 6 < t < 10 10 < t < 25	0.76 0.67
NV-6082	T5 / T6	0.85

Note: Table B2 only applies when the main loading direction is longitudinal to the extrusion

Após o cálculo do módulo de seção requerido para a viga navio, é necessário verificar se o módulo de seção escolhido para a seção mestra tem valor menor ou maior ao calculado.

3.6.4.2 Espessura mínimas de chapas

Para o cálculo das espessuras mínimas de chapas, a regra fornece a seguinte expressão:

$$t = \frac{t_0 + k * L}{\sqrt{f}} * \frac{s}{s_R} \quad (90)$$

Onde,

t_0 = retirada da Tabela 10

k = retirado da Tabela 10

$f = \sigma_f / 240$ (onde $\sigma_f = 195 \text{ N/mm}^2$ = tensão de escoamento para chapa de alumínio)

s = espaçamento entre longitudinais em “m” (variável de entrada no otimizador)

$s_R = \frac{2*(100+L)}{1000}$ (onde L é comprimento de linha d’água, obtida de interpolações

dos gráficos da Figura 35

$0.5 < s / s_R < 1.0$ (requisito da regra)

Tabela 10 – Tabela usada para obtenção de t_0 e k de acordo com o tipo de estrutura (VERITAS, 2015)

Item	t_0	k	
Shell plating	Bottom, bilge and side to loaded water line	4.0	0.03
	Side above loaded water line	3.5	0.02
	Bottom aft in way of rudder, shaft brackets etc.	10.0	0.10
Deck and inner bottom plating	Strength deck weather part forward of amidships	3.0	0.03
	Strength deck weather part aft of amidships	2.5	0.02
	Inner bottom	3.0	0.03
	Car deck	4.0	0.03
	Accommodation deck	2.0	0.02
	Deck for cargo	4.0	0.03
	Superstructure and deckhouse decks	1.0	0.01
Bulkhead plating	Collision bulkhead	3.0	0.03
	Tank bulkhead	3.0	0.03
	Other watertight bulkheads	3.0	0.02
	Superstructure and deckhouse front	3.0	0.01
	Superstructure and deckhouse sides and aft	2.5	0.01
Other structures	Foundations	3.0	0.08
	Structures not mentioned above	3.0	0

3.6.4.3 Espessura mínima de chapas sujeitas a pressão lateral

Para o cálculo das espessuras mínimas de chapas sujeitas a pressão lateral, a regra fornece a seguinte expressão para chapas fixadas em todas as bordas e com razão de aspecto menor que 5:

$$t = \frac{22.4 * s * \sqrt{p}}{\sqrt{\sigma}} \quad (91)$$

Onde,

t = espessura mínima de chapa sujeita a pressão lateral em “mm”

s = espaçamento entre longitudinais em “m” (variável de entrada no otimizador)

p = pressão do mar (obtido na seção 3.6.3.6)

σ = tensão de flexão admissível (retirado da Tabela 11)

A norma fornecia outra fórmula para razões de aspecto maiores que 5, porém foi escolhida a fórmula acima por sempre dar valores superiores a outra fórmula da norma, independente da razão de aspecto, esta decisão foi tomada no sentido de ser mais conservador no valor da espessura mínima.

Tabela 11 – tensão de flexão admissível (VERITAS, 2015)

Allowable bending stresses		
Item	Plate	Stiffener
	(N/mm ²)	
Bottom, slamming load	200 f ₁	180 f ₁
Bottom, sea load	180 f ₁	160 f ₁
Side	180 f ₁	160 f ₁
Deck	180 f ₁	160 f ₁
Flat cross structure, slamming load	200 f ₁	180 f ₁
Flat cross structure, sea load	180 f ₁	160 f ₁
Bulkhead, collision	180 f ₁	160 f ₁
Superstructure/deckhouse front	160 f ₁	140 f ₁
Superstructure/deckhouse side/deck	180 f ₁	160 f ₁
Bulkhead, watertight	220 f ₁	200 f ₁
Tank bulkhead	180 f ₁	160 f ₁

Vale ressaltar que o termo “f1” da Tabela 11 é obtido através da Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9.

3.6.4.4 Espessura mínima de chapas sujeitas ao *slamming*

Para o cálculo das espessuras mínimas de chapas sujeitas a pressão de *slamming* ou batimento do fundo, a regra fornece a seguinte expressão:

$$t = \frac{22.4 * k_r * k_a * s * \sqrt{P_{sl}}}{\sqrt{\sigma_{sl}}} \quad (92)$$

Onde,

t = espessura mínima de chapa sujeita a pressão de *slamming* em “mm”

ka = fator de correção para a razão de aspecto de campo de placa com valor de (1.1-0.25s/l)², com valor máximo 1.0 para s/l = 0.4 e com valor mínimo de 0.72 para s/l =1.0. Foi escolhido o máximo valor de 1.0 para ser mais conservador.

kr = fator de correção para placas curvas com valor de (1.0-0.5*(s/r)). Foi escolhido o valor de 1.0 por ser o máximo valor para ser mais conservador.

s = espaçamento entre longitudinais em “m”

Psl = pressão de *slamming* em “kN/m²” (obtido na seção 3.6.3.5)

σsl = 200f1 = tensão de *slamming* em “N/mm²” (f1 obtido das Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9)

3.6.4.5 Espessuras mínimas de vigas e reforçadores

Para o cálculo das espessuras mínimas de vigas e reforçadores, a regra fornece a seguinte expressão:

$$t = \frac{t_0 + k * L}{\sqrt{f}} * \frac{s}{s_R} \quad (93)$$

Onde,

t = espessura mínima de vigas e reforçadores em “mm”

t₀ = retirado da Tabela 12

k = retirado da Tabela 12

f = σ_f / 240 (onde σ_f = 240N/mm²=tensão de escoamento para perfis extrudados de alumínio)

s = espaçamento entre longitudinais em “m” (variável de entrada no otimizador)

s_R = $\frac{2*(100+L)}{1000}$ (onde L é comprimento de linha d’água, obtida de interpolações dos gráficos da Figura 35)

0.5 < s/s_R < 1.0 (requisito da regra)

Tabela 12 – Tabela usada para obtenção de t₀ e k de acordo com o tipo de estrutura (VERITAS, 2015)

Item		t ₀	k
Girders and stiffeners	Bottom centre girder	3.0	0.05
	Bottom side girders, floors, brackets and stiffeners	3.0	0.03
	Side, deck and bulkhead longitudinal girders and stiffeners outside the peaks	3.0	0.02
	Peak girders and stiffeners	3.0	0.03
	Longitudinals	3.0	0.03
	Double bottom floors and girders	3.0	0.02
Other structures	Foundations	3.0	0.08
	Structures not mentioned above	3.0	0

3.6.4.6 Módulos de seção mínimos de reforçadores ou vigas sujeitos a pressão lateral

Para o cálculo do módulo de seção mínimo de reforçadores ou vigas sujeitos a pressão lateral, a regra fornece a seguinte expressão:

$$Z = \frac{m * l^2 * s * p}{\sigma} \quad (94)$$

Onde,

Z = módulo de seção mínimo de reforçadores ou vigas sujeitos a pressão lateral em cm^3 .

m = fator de momento fletor (obtido na Tabela 13)

l = espaçamento entre transversais em “m”

s = espaçamento entre longitudinais em “m”

p = pressão do mar em kN/m^2 (obtido na seção 3.6.3.6)

σ = tensão de flexão admissível (retirado da Tabela 11)

Tabela 13 – tabela para obtenção do fator de momento fletor (VERITAS, 2015)

Values of m	
Item	m
Continuous longitudinal members	85
Non-continuous longitudinal members	100
Transverse members	100
Vertical members, ends fixed	100
Vertical members, simply supported	135
Bottom longitudinal members	85
Bottom transverse members	100
Side longitudinal members	85
Side vertical members	100
Deck longitudinal members	85
Deck transverse members	100
Watertight bulkhead stiffeners, fixed ends	65
Watertight bulkhead stiffeners, fixed one end (lower)	85
Watertight bulkhead stiffeners, simply supported ends	125
Watertight bulkhead horizontal stiffeners, fixed ends	85
Watertight bulkhead stiffeners, fixed one end (upper)	75
Watertight bulkhead horizontal stiffeners, simply supported	125
Tank cargo bulkhead, fixed ends	100
Tank cargo bulkhead, simply supported	135
Deckhouse stiffeners	100
Casing stiffeners	100

3.6.4.7 Módulos de seção mínimos de reforçadores ou vigas sujeitos a pressão de *slamming*

Para o cálculo do módulo de seção mínimo de reforçadores ou vigas sujeitos a pressão de *slamming*, a regra fornece a seguinte expressão:

$$Z = \frac{m * l^2 * s * p_{sl}}{\sigma_{sl}} \quad (95)$$

Onde,

Z = módulo de seção mínimo de reforçadores ou vigas sujeitos a pressão de *slamming* em “cm³”

$m = 85$ (para reforços longitudinais) ou 100 (para reforços transversais)

l = espaçamento entre transversais em “m”

s = espaçamento entre longitudinais em “m”

p_{sl} = pressão de *slamming* em kN/m² (obtido na seção 3.6.3.5)

$\sigma_{sl} = 180f_l$ (f_l obtido da Tabela 8)

Também segundo a regra, a área de cisalhamento de vigas ou reforçadores devem ser maiores que:

$$A_S = \frac{6.7 * (l - s) * s * p_{sl}}{\tau_{sl}} \quad (96)$$

onde,

$\tau_{sl} = 90f_l$ (f_l obtido da Tabela 8)

3.6.4.8 Verificação de flambagem de chapas sob compressão

Para a verificação da tensão de flambagem elástica de chapas sob compressão, a regra fornece a seguinte expressão:

$$\sigma_{el} = 0.9 * k * E * \left(\frac{t}{1000 * s} \right)^2 \quad (97)$$

Onde,

σ_{el} = tensão de flambagem elástica de chapa em “N/mm²”

$k = 8.4 / (\psi + 1.1)$, onde ψ é a razão entre a menor e maior tensão de compressão para chapas com reforçadores longitudinais assumindo variação linear, sendo $0 < \psi < 1$.

Foi escolhido $\psi = 1$ por esse valor ser o que causa maior redução da tensão de flambagem elástica

$E = 69000 \text{ N/mm}^2$ (módulo de elasticidade do alumínio)

$t =$ espessura da chapa analisada em “mm”

$s =$ espaçamento entre longitudinais em “m”

Tendo calculado a tensão de flambagem para cada chapa, deve-se verificar se a tensão na viga navio de compressão naquela chapa não supera os valores de flambagem, para isso se usa os momentos M_{B_CREST} , M_{B_HOLLOW} , $M_{tot_{hog}}$ e $M_{tot_{sag}}$ (calculados na seção 3.6.3.7) para calcular a tensão de compressão na chapa analisada usando a seguinte expressão:

$$\sigma_a = \frac{M_z * y * 10^5}{I} \quad (98)$$

Onde,

$\sigma_a =$ tensão de compressão devido ao momento fletor em “N/mm²”

$M_z =$ momento fletor analisado em “kNm” (podendo ser

M_{B_CREST} , M_{B_HOLLOW} , $M_{tot_{hog}}$ e $M_{tot_{sag}}$)

$y =$ distância vertical do elemento estrutural até a linha neutra em “m”

$I =$ momento de inercia da viga navio em “cm⁴”

Depois de calcular σ_a , pode-se igualar tensão crítica de flambagem (σ_c) com a tensão de flambagem elástica (σ_{el}) e verificar se essa tensão supera ou não a tensão σ_a usando a seguinte expressão retirada da regra:

$$\sigma_c \geq \frac{\sigma_a}{\eta} \quad (99)$$

Onde,

$\sigma_c =$ tensão crítica de flambagem em “N/mm²”

$\sigma_c = \sigma_{el}$ (calculada usando a equação (97))

$\eta = 1$ (para chapas do deque, costado)

$\eta = 0.9$ (para chapas do fundo, porém usado para chapas de antepara também de forma a ser mais conservador)

Se o valor de “ σ_a/η ” for superior a “ σ_c ”, a chapa analisada falha por flambagem.

3.6.4.9 Verificação de flambagem em reforçadores e vigas

Para a verificação da tensão de flambagem elástica de reforçadores sob compressão, a regra fornece a seguinte expressão:

$$\sigma_{el} = 10 * \frac{E}{\left(100 * \frac{l}{i}\right)^2} \quad (100)$$

Onde,

σ_{el} = tensão de flambagem elástica de reforçador em “N/mm²”

E = módulo de elasticidade do alumínio (69000 N/mm²)

$$i = \sqrt{\frac{I_A}{A}}$$

l = espaçamento entre transversais em “m”

I_A = momento de inércia em “cm⁴” em relação ao eixo perpendicular da direção esperada de flambagem

A = área de seção do reforçador em “cm²”

Depois de calcular σ_{el} , é necessário calcular σ_a , para isso se usa a equação (98). Após o cálculo de σ_a , pode-se igualar a tensão de flambagem (σ_{el}) (equação (100)) com a tensão crítica de flambagem (σ_c) (equação (99)). Logo após, é feita a análise mostrada na equação (99) para se verificar se o reforçador resiste ou não.

Para o caso das cavernas e hastilhas, a regra fornece a seguinte expressão para o cálculo da tensão de flambagem elástica:

$$\sigma_{el} = 1.38 * \frac{\pi^2}{S^2 * (t + t_a)} * \sqrt{\frac{I_a * I_b}{s * l}} \quad (101)$$

Onde,

σ_{el} = tensão de flambagem elástica de cavernas e hastilhas em “N/mm²”

S = comprimento da viga em “m”

s = espaçamento entre reforçadores em “m”

l = espaçamento entre transversais em “m”

I_a = momento de inércia do reforçador entre vigas em “cm⁴”

I_b = momento de inércia da viga em “cm⁴”

t = espessura da chapa em que a viga está soldada em “mm”

ta = espessura equivalente da chapa da área do reforço em “mm” (área do reforçador / espaçamento do reforçador)

Depois de calcular σ_{el} , é necessário calcular σ_a , para isso se usa a equação (98). Após o cálculo de σ_a , pode-se igualar a tensão de flambagem (σ_{el}) com a tensão crítica de flambagem (σ_c) (equação (99)). Logo após, é feita a análise mostrada na equação (99) para se verificar se o reforçador resiste ou não a tensão de compressão.

3.7 Uso da ferramenta de otimização

Tendo programado a regra da DNV (VERITAS, 2015) no formato de planilha, foi importante estabelecer o fluxo de trabalho dentro de uma ferramenta de otimização. Foi escolhido o software ModeFrontier (ESTECO, 2023) por este ser eficaz com diversos tipos de otimização, e também já ter se mostrado eficaz em trabalhos anteriores dos orientadores e ser compatível com o software Excel.

O modelo construído no ModeFRONTIER deve ser feito primeiramente adicionando as variáveis de entrada, que no software são chamadas de “Input Variable”. A seguir foi feita uma tabela mostrando as informações mais importantes inseridas para cada variável:

Tabela 14 – Informações mais importantes inseridas para cada variável (fonte: autor)

Name	Type	Lower bound	Step	Upper bound
ncl	Var - Discrete Ordered	0	1	4
nl	Var - Discrete Ordered	1	1	6
l	Var - Discrete Ordered	0.1	0.1	1.2
l_bar_keel (mm)	Var - Discrete Ordered	5	5	100
l_bar_keel_flange (mm)	Var - Discrete Ordered	0	5	100
l_bottom_long_flange(mm)	Var - Discrete Ordered	0	5	100
l_bottom_long_web(mm)	Var - Discrete Ordered	5	5	100
l_bottom_transverse_flange(mm)	Var - Discrete Ordered	0	5	100
l_bulk_flange(mm)	Var - Discrete Ordered	0	5	100
l_bulk_web(mm)	Var - Discrete Ordered	5	5	100
l_deck_long_flange(mm)	Var - Discrete Ordered	0	5	100
l_deck_long_web(mm)	Var - Discrete Ordered	5	5	100
l_side_long_flange (mm)	Var - Discrete Ordered	0	5	100
l_side_long_web (mm)	Var - Discrete Ordered	5	5	100
l_side_transverse_flange (mm)	Var - Discrete Ordered	0	5	100
e_t_bar_keel (mm)	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_bar_keel_flange	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_bottom	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_bottom_long	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_bottom_transverse	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_bottom_transverse_flange	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_bulk_long	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_bulkhead	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_deck	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_deck_long	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_flate_plate_keel	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_sheer_bar	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_side	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_side_long	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_side_transverse_flange	Var - Discrete Ordered	1	1	11
e_t_side_transverse_web	Var - Discrete Ordered	1	1	11

É de suma importância, fazer as seguintes observações sobre a Tabela 14:

- ncl (número de longitudinais do costado) teve seu valor escolhido entre 0 e 4, o motivo de ser 0, é que os primeiros resultados de otimização davam resultados de $ncl = 1$ como solução ótima, porém esse já era o valor do limite inferior, então para não cair no risco de limitar a solução ótima, foi escolhida o valor 0 para ser o limite inferior. O limite superior foi adotado arbitrariamente, porém resultados ótimos não chegavam a atingir ele.

- nl (número de longitudinais no fundo) teve seu valor escolhido entre 1 e 6, o motivo de ser 1, é que os primeiros resultados de otimização davam resultados de $ncl = 2$ como solução ótima, porém esse já era o valor do limite inferior, então para não cair no risco de limitar a solução ótima, foi escolhida o valor 1 para ser o limite inferior. O limite superior foi adotado arbitrariamente, porém resultados ótimos não chegavam a atingir ele.

- l (espaçamento entre transversais) teve seu valor escolhido entre 0.1m e 1.2m, inicialmente o limite superior era 1m, porém alguns resultados de pareto iguais a 1m levaram a considerar 1.2m como limite superior visando não limitar a solução ótima.

- l_bar_keel, l_bottom_long_web, l_bulk_web, l_deck_long_web e l_side_long_web tiveram seus valores entre 5 e 100mm, não foi colocado o valor 0 como limite inferior pois este gerava erro por ser divisão por 0.

- l_bar_keel_flange, l_bottom_long_flange, l_bottom_transverse_flange, l_bulk_flange, l_deck_long_flange, l_side_long_flange, l_side_transverse_flange tiveram seus valores escolhidos entre 0 e 100mm, o valor 0 no caso seria o representante da barra chata.

- t_bar_keel, t_bar_keel_flange, t_bottom, t_bottom_long, t_bottom_transverse, t_bottom_transverse_flange, t_bulk_long, t_bulkhead, t_deck, t_deck_long, t_flate_plate_keel, t_sheer_bar, t_side, t_side_long, t_side_transverse_flange e t_side_transverse_web são variáveis que indicam espessuras de entrada para o programa modeFRONTIER. Seus valores variam de 1 a 11. De acordo com o valor colocado, a planilha “Calculo_Estrutura” irá procurar o valor da espessura em “mm” corresponde de acordo com a Tabela 15 :

Tabela 15 – Relação da espessura de entrada para a espessura real (fonte: autor)

Espessura(mm)	entrada
2.5	1
3	2
4	3
4.76	4
5	5
6	6
6.35	7
7.94	8
9.53	9
12.7	10
15.87	11

É importante observar que foi necessário criar essa variável de entrada para o modeFrontier, visto não ser possível colocar os valores de forma discreta em milímetros

no programa diretamente. Foi escolhida essa faixa de valores de espessura que atendiam a gama de possibilidades de estrutura desse tipo de projeto de lancha de alumínio. Vale ressaltar que os valores de espessura escolhidos foram retirados de catálogos de fabricantes.

As variáveis de saída, são todos os valores que o modeFrontier irá extrair da planilha de cálculo, como resultado da inserção das variáveis de entrada. As variáveis de saída são: Peso, Volume_Solda, Aprovado, Variacao_CG, t_bar_keel, t_bar_keel_flange, t_bottom, t_bottom_long, t_bottom_transverse, t_bottom_transverse_flange, t_bulk_long, t_bulkhead, t_deck, t_deck_long, t_flate_plate_keel, t_sheer_bar, t_side, t_side_long, t_side_transverse_flange e t_side_transverse_web.

As variáveis de saída que começam com a letra “t” são representativas de espessuras e são obtidas usando a Tabela 15 como já anteriormente mencionado. As outras variáveis tem o seguinte significado:

- Peso: representa o peso da embarcação em “kg” extraído da planilha “Calculo_Estrutura”.
- Volume_Solda: representa o volume de solda usado em centilitros.
- Aprovado: variável criada que alcança valor acima de “0” toda vez que alguma restrição de projeto é quebrada.
- Variacao_CG: variável que representa a variação da posição do centro de gravidade em relação ao projeto original. Essa variável está em “m”.

Depois de definir as variáveis de entrada e saída, foi necessária a escolha do algoritmo que é um aspecto importante na busca da solução ótima de projeto. Foram escolhidos algoritmos de abordagem heurística, visto que eles possuem as seguintes características CAPRACE, 2011:

- Eles são mais genéricos e o mesmo algoritmo tem aplicações em várias áreas.
- Esses algoritmos não dependem do ponto inicial de projeto.
- São mais suscetíveis a achar uma aproximação aceitável ao ótimo global através de um processamento de cálculo razoável.
- Esses algoritmos são eficientes com a otimização multiobjetivo para encontrar um bom valor para a otimização de Pareto que será explicado mais à frente.
- São muito mais eficientes com variáveis discretas que contínuas.
- São mais robustos com relação as falhas de acurácia das análises.

Tendo isso em vista, foi feito 5 modelos diferentes, cada um usando os seguintes algoritmos heurísticos disponíveis na ferramenta ModeFrontier: MOGA-2, NSGA-2, ARMOGA, Evolution-strategy e Many-objective.

É importante ressaltar que esses algoritmos tem mais convergência quando existem poucas variáveis, portanto quando se roda esse algoritmo sem dar soluções iniciais possíveis viáveis e deixando todas as variáveis livres, os algoritmos obtiveram soluções distantes da solução global.

Por isso adotou-se a estratégia (como já definido no fluxograma na seção 3.2) de avaliar o melhor algoritmo em termos de tempo de processamento e melhor resultado (menor peso e volume de solda) para depois usar o mesmo para produzir tabelas DOE.

Projeto de experimentos (DOE – *Design of experiments*), são um conjunto de técnicas usadas para que de forma eficiente possa guiar a escolha dos experimentos.

Na otimização estrutural de engenharia um experimento válido é uma série de testes em que os valores da variável de entrada são mudados de acordo com determinada regra para identificar as razões para a mudança nas variáveis de saída. Por esta razão, um importante passo no processo de otimização é uma amostra inicial do espaço de projeto, que é a região de interesse em que as variáveis de entrada são dispersas (ESTECO, 2023).

Projeto de experimentos foi originado em 1920 pelo cientista britânico Sir R. A. Fisher, como um método para maximizar o conhecimento obtido de dados experimentais. O método tradicional para esse teste é o chamado “um fator por vez” (OFAT – *one factor at a time*), nele, o primeiro fator é mantido constante enquanto os outros são variados, então o segundo fator é mantido constante enquanto o primeiro e o restante são variados, e assim por diante. DOE fornece uma forte e universal estrutura para projetar e analisar todos os experimentos comparativos. Usando o OFAT é necessário rodar muitas vezes para se obter suficientes informações e isso geralmente não é possível. A abordagem por DOE é em contraste direto com o OFAT tendo em vista que considera todos os fatores simultaneamente. Com DOE as melhores configurações de fatores são usadas para obter uma certa quantidade de informações.

No caso deste trabalho que é a otimização, o DOE é útil para início de uma população para os algoritmos de otimização. Cada algoritmo de otimização requer um DOE de diferente tamanho. Otimizadores robustos como algoritmos genéticos, são normalmente pouco influenciados pela qualidade do DOE, porém no trabalho desenvolvido nessa dissertação, essa diferença foi considerável.

Ao se definir as variáveis de saída e de entrada do modelo, já pode se definir as funções objetivo, que no modelo em questão serão minimização do peso e do volume da solda, que serão representados pelas variáveis de saída: “Peso” e “Volume_Solda”.

Tendo definido as funções objetivo, definiu-se também as restrições de projeto, que no caso é a restrição aprovado que sempre deveria ser “0” tendo em vista que se assumir o valor 1 ocorre uma transgressão a restrição de projeto da regra da DNV e a restrição do CG que foi escolhida como sendo sempre menor que 1m para não variar muito do projeto original.

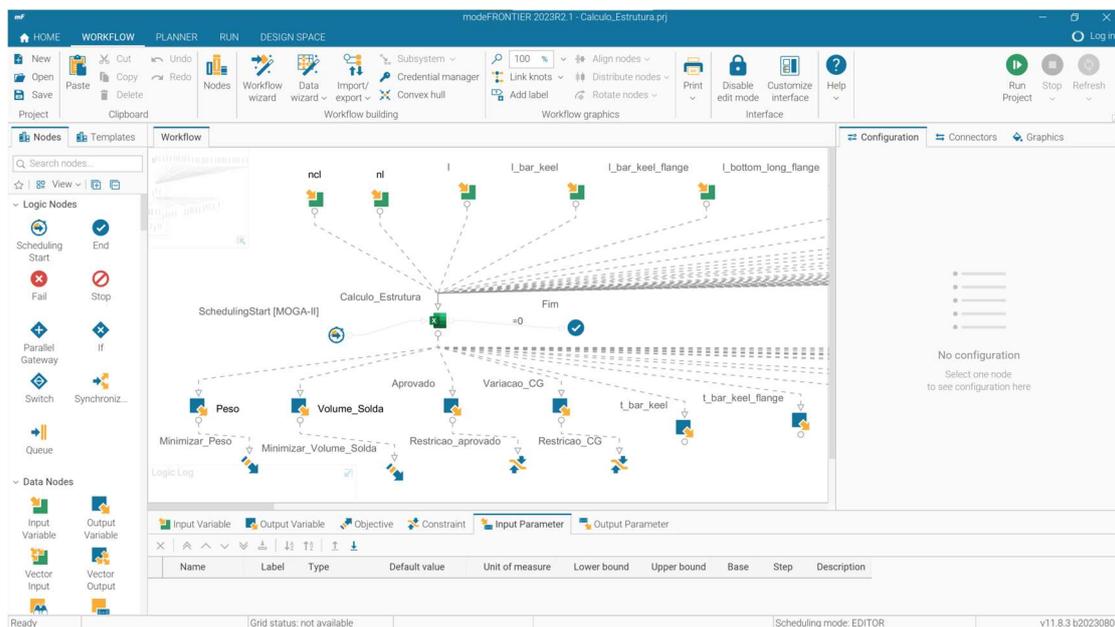


Figura 39 – Visão geral da ferramenta ModeFrontier (ESTECO, 2023)

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS GERADOS NA OTIMIZAÇÃO

Este capítulo se destina a mostrar os resultados gerados pelo modelo idealizado anteriormente seguindo o fluxograma de trabalho proposto (seção 3.2).

Como referência, usou-se uma lancha patrulha real de alumínio para que se executasse a otimização como já discutido anteriormente. Foi adotado um modelo real com o intuito de testar a efetividade real da ferramenta desenvolvida para otimização de um projeto já estabelecido.

4.1 Testes dos algoritmos

Como já anteriormente mencionado, o modelo foi submetido ao teste de eficiência do algoritmo, nele foram testados os 5 algoritmos genéticos disponíveis no modeFRONTIER e foi decidido que os avaliaria em termos de resultado final de minimização das funções objetivo e tempo de processamento. É importante ter em mente que esse tempo de processamento varia de acordo com a máquina utilizada para executar a otimização, de forma que serve apenas para se avaliar a eficiência do algoritmo de forma qualitativa.

O computador utilizado para fazer as análises é um Intel (R) Core (TM) i7-4500U CPU @ 1.80GHz 2.40 GHz, com 16GB de RAM no sistema operacional Windows 10 Pro.

Aqui é interessante mostrar o resultado da planilha “Calculo_Estrutura” usando os dados do projeto original, de forma a usar ele de base para comparação com os resultados dos algoritmos:

Tabela 16 - Resultado para a lancha original (fonte: autor)

Funções objetivo		Restrição		Valor Restrição	Valor otimizado	%
Peso (Kg)	1011.84	t_min_deck_plating (mm)		2.90	4.00	138%
Volume de Solda (Centilitros)	754.288	t_min_side_plating (mm)		4.00	4.00	100%
Restrição Aprovado e CG		t_min_bottom_plating(mm)		4.70	6.00	128%
Aprovado (sim = 0 , não = 1)	0	t_min_flate_plate_keel (mm)		4.70	8.00	170%
Varição de Posição do CG	0	t_min_bulkhead (mm)		3.50	4.00	114%
Dados de Projeto		t_min_lat_pres_deck_plating (mm)		1.24	4.00	324%
s(m)	0.296	t_min_lat_pres_side_plating (mm)		1.34	4.00	298%
s_cost(m)	0.282	t_min_lat_pres_bulkhead (mm)		1.27	4.00	314%
D(m)	1.37	t_min_slam_bottom (mm)		3.13	6.00	191%
L(m)	6.70727	t_min_slam_flate_plate_keel (mm)		3.13	8.00	255%
B(m)	3.21	t_min_side_long (mm)		3.13	5.00	160%
Cb	0.39044	t_min_bottom_long (mm)		3.20	5.00	156%
T(m)	0.42095	t_min_bar_keel (mm)		3.34	10.00	300%
Δ(ton)	3.38826	t_min_bar_keel_flange (mm)		0.00	0.00	300%
Dados de Entrada Variável		t_min_bottom_transverse(mm)		3.34	5.00	150%
l(m)	0.8	t_min_bottom_transverse_flange(mm)		3.34	6.00	180%
l_bar_keel (mm)	75	t_min_side_transverse_web(mm)		3.13	5.00	160%
l_bar_keel_flange (mm)	0	t_min_side_transverse_flange(mm)		3.13	6.00	191%
l_bottom_long_flange(mm)	25	t_min_sheer_bar(mm)		3.13	6.00	191%
l_bottom_long_web(mm)	50	t_min_bulk_long(mm)		3.13	5.00	160%
l_bottom_transverse_flange(mm)	50	t_min_deck_long(mm)		3.13	5.00	160%
l_bulk_flange(mm)	25	Z_min_lat_pres_side_long (cm^3)		0.88	3.38	385%
l_bulk_web(mm)	50	Z_min_lat_pres_side_transverse (cm^3)		2.44	42.60	1746%
l_deck_long_flange(mm)	25	Z_min_lat_pres_bulk_long (cm^3)		1.35	3.38	249%
l_deck_long_web(mm)	50	Z_min_lat_pres_deck_long (cm^3)		0.71	3.38	477%
l_side_long_flange (mm)	25	Z_min_slam_bottom_long (cm^3)		3.15	3.38	107%
l_side_long_web (mm)	50	Z_min_slam_bar_keel (cm^3)		8.22	9.38	114%
l_side_tranverse_flange (mm)	50	Z_min_slam_bottom_transverse (cm^3)		61.93	62.52	101%
ncl	2	Z_min_slam_bulkhead_long (cm^3)		3.15	3.38	107%
nl	4	Z_min_slam_side_transverse (cm^3)		8.31	46.72	562%
t_bar_keel (mm)	10	Módulo de seção (cm^3)		453.34	7466.83	1647%
t_bar_keel_flange (mm)	0	σbuck_Deck_Plating (MPa)		45.39	8.05	18%
t_bottom(mm)	6	σbuck_Side_Plating (MPa)		50.08	7.21	14%
t_bottom_long (mm)	5	σbuck_Bottom_Plating (MPa)		102.13	4.44	4%
t_bottom_transverse (mm)	5	σbuck_Flat_Plate_Keel (MPa)		45.39	3.99	9%
t_bottom_transverse_flange(mm)	6	σbuck_bulkhead (MPa)		45.39	8.94	20%
t_bulk_long(mm)	5	σbuck_Side_Long (MPa)		381.69	8.05	2%
t_bulkhead(mm)	4	σbuck_Side_Transverse (MPa)		636.34	8.05	1%
t_deck (mm)	4	σbuck_bottom_long (MPa)		317.94	4.44	1%
t_deck_long(mm)	5	σbuck_sheer_bar (MPa)		205.11	4.44	2%
t_flate_plate_keel (mm)	8	σbuck_bar_keel (MPa)		576.68	3.99	1%
t_sheer_bar (mm)	6	σbuck_bottom_transverse (MPa)		88.11	3.99	5%
t_side (mm)	4	σbuck_deck_long (MPa)		381.69	8.05	2%
t_side_long (mm)	5	σbuck_bulk_long (MPa)		10.52	8.94	85%
t_side_transverse_flange (mm)	6	Tensão de cisalhamento (MPa)		195.00	0.97	0%
t_side_transverse_web (mm)	5	Tensão Axial (MPa)		195.00	0.38	0%

Obs: a explicação das restrições da Tabela 16 se encontram na seção 4.4.

Antes de apresentar os resultados dos algoritmos testados, é importante mencionar que os resultados nas tabelas tiveram seus valores destacados em amarelo quando algum limite numérico inferior ou superior daquela variável foi alcançado. Também é importante mencionar que variáveis de espessura de flange, tinham seus valores automaticamente mudados para “0” na planilha toda vez que o valor do comprimento do flange era “0”. O volume de solda teve a medida de centilitros escolhida de forma a ser compatível graficamente com o valor quilograma (Kg) escolhido para o peso.

No software ModeFrontier todos os algoritmos foram usados no modo automático (*Autonomous*). O modo autônomo não requer parâmetros. Neste modo, o algoritmo usa as informações coletadas na análise do problema para conduzir a otimização na direção certa e interrompe a execução quando o Pareto não melhora mais. De forma mais precisa, a execução termina quando o algoritmo é incapaz de encontrar projetos dominantes suficientes ou os projetos que ele encontra não são nem dominantes nem dominados. O tamanho máximo da execução é diferente para cada algoritmo (ESTECO, 2023).

O primeiro algoritmo testado de forma livre (sem uso de DOE) foi o Algoritmo Genético de Multiobjetivo (MOGA-2), o único resultado Pareto pode ser visto na Tabela 17, Figura 40 e Figura 41:

Tabela 17 - Resultado único de Pareto para o algoritmo MOGA2 livre (fonte: autor)

Peso (Kg)	931.07
Volume de Solda (Centilitros)	420.61
Aprovado (sim = 0 , não = 1)	0
Variação de Posição do CG	0.036
Variáveis dependentes	
s(m)	0.5200
s_cost(m)	0.333
Dados de Entrada Variável	
l(m)	0.5
l_bar_keel (mm)	75
l_bar_keel_flange (mm)	15
l_bottom_long_flange(mm)	0
l_bottom_long_web(mm)	55
l_bottom_transverse_flange(mm)	20
l_bulk_flange(mm)	0
l_bulk_web(mm)	85
l_deck_long_flange(mm)	0
l_deck_long_web(mm)	30
l_side_long_flange (mm)	35
l_side_long_web (mm)	20
l_side_transverse_flange (mm)	0
ncl	1
nl	2
t_bar_keel (mm)	4
t_bar_keel_flange (mm)	6.35
t_bottom(mm)	6
t_bottom_long (mm)	4
t_bottom_transverse (mm)	4
t_bottom_transverse_flange(mm)	6.35
t_bulk_long(mm)	4
t_bulkhead(mm)	4
t_deck (mm)	4
t_deck_long(mm)	4
t_flate_plate_keel (mm)	6
t_shear_bar (mm)	4
t_side (mm)	4
t_side_long (mm)	4
t_side_transverse_flange (mm)	0
t_side_transverse_web (mm)	4

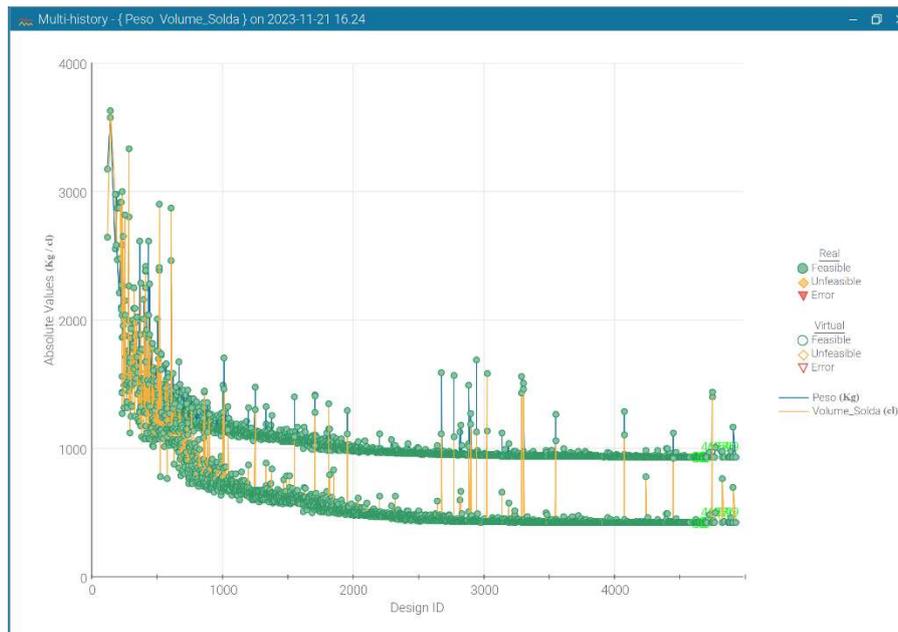


Figura 40 - Gráfico de convergência do algoritmo MOGA2 sem o uso de DOE (fonte: autor)

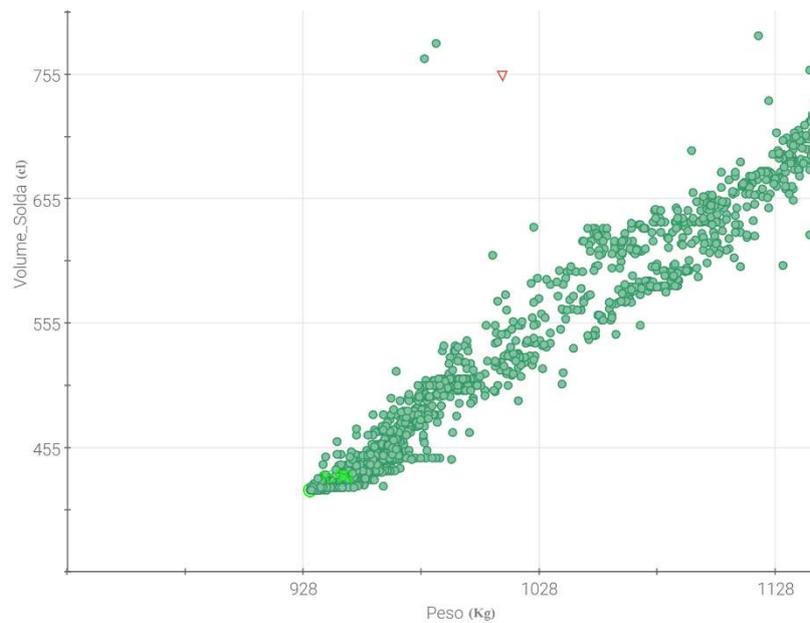


Figura 41 - Gráfico de Volume de Solda X Peso do MOGA-2 sem DOE (Pareto em verde claro, lancha original em vermelho) (fonte: autor)

Algumas informações são importantes de citar ao se observar a Tabela 17:

- As únicas células que ficaram em amarelo (limite inferior ou superior de uma variável) são flanges de elementos estruturais que nesse caso alcançaram o valor “0”, que por assim dizer, fazem os elementos serem considerados barras chatas; apenas os flanges do bar_keel e do side_long (longitudinal do costado) não tiveram valores igual a “0”. Será

observado mais a frente que o flange do bar_keel realmente tem a tendência de ter valores maiores que 0, porém o flange do side_long não necessariamente possui tal necessidade, isto reforça a necessidade de posteriormente usar as tabelas de DOE.

- Minimização do Peso: 80.77Kg (-8%)
- Minimização do Volume de Solda: 333.68 centilitros (-33%)

Em relação a Figura 40 foi feita a seguinte análise:

- O tempo de processamento foi de 111 min
- 3891 Gerações não repetidas foram avaliadas
- O algoritmo tem uma convergência bem robusta para uma solução única, porém percebe-se que o mesmo não tenta muito soluções afastadas da solução que lhe parece ótima.

A respeito dos resultados obtidos da Figura 41 pode-se destacar os seguintes aspectos:

- O gráfico de Peso por Volume de Solda só apresenta uma solução Pareto, portanto percebe-se que o algoritmo não busca muitas alternativas, procurando pouco no universo de soluções possíveis.
- O algoritmo não apresenta soluções Pareto priorizando só Peso ou priorizando só Volume de Solda, converge apenas para a solução “ótima” onde tem as duas variáveis priorizadas de forma equilibrada.

O segundo algoritmo testado de forma livre (sem uso de DOEs) foi a Estratégia Evolucionária (*Evolution Strategy - EVO*), o resultado pode ser visto na Tabela 18, Figura 42 e Figura 43:

Tabela 18 - Resultados de Pareto para o algoritmo EVO (fonte: autor)

Peso (Kg)	830.63	Peso (Kg)	830.63
Volume de Solda (Centilitros)	455.06	Volume de Solda (Centilitros)	455.06
Aprovado (sim = 0, não = 1)	0	Aprovado (sim = 0, não = 1)	0
Variação de Posição do CG (m)	0.009	Variação de Posição do CG (m)	0.009
Variáveis dependentes		Variáveis dependentes	
s(m)	0.3900	s(m)	0.3900
s_cost(m)	0.333	s_cost(m)	0.333
Dados de Entrada Variável		Dados de Entrada Variável	
l(m)	0.8	l(m)	0.8
l_bar_keel (mm)	85	l_bar_keel (mm)	85
l_bar_keel_flange (mm)	50	l_bar_keel_flange (mm)	50
l_bottom_long_flange(mm)	30	l_bottom_long_flange(mm)	30
l_bottom_long_web(mm)	60	l_bottom_long_web(mm)	60
l_bottom_transverse_flange(mm)	50	l_bottom_transverse_flange(mm)	50
l_bulk_flange(mm)	15	l_bulk_flange(mm)	15
l_bulk_web(mm)	65	l_bulk_web(mm)	65
l_deck_long_flange(mm)	30	l_deck_long_flange(mm)	35
l_deck_long_web(mm)	30	l_deck_long_web(mm)	25
l_side_long_flange (mm)	5	l_side_long_flange (mm)	5
l_side_long_web (mm)	35	l_side_long_web (mm)	35
l_side_transverse_flange (mm)	0	l_side_transverse_flange (mm)	0
ncl	1	ncl	1
nl	3	nl	3
t_bar_keel (mm)	5	t_bar_keel (mm)	5
t_bar_keel_flange (mm)	5	t_bar_keel_flange (mm)	5
t_bottom(mm)	4.76	t_bottom(mm)	4.76
t_bottom_long (mm)	4	t_bottom_long (mm)	4
t_bottom_transverse (mm)	4.76	t_bottom_transverse (mm)	4.76
t_bottom_transverse_flange(mm)	6.35	t_bottom_transverse_flange(mm)	6.35
t_bulk_long(mm)	4	t_bulk_long(mm)	4
t_bulkhead(mm)	4	t_bulkhead(mm)	4
t_deck (mm)	3	t_deck (mm)	3
t_deck_long(mm)	4.76	t_deck_long(mm)	4.76
t_flate_plate_keel (mm)	4.76	t_flate_plate_keel (mm)	4.76
t_shear_bar (mm)	5	t_shear_bar (mm)	5
t_side (mm)	4	t_side (mm)	4
t_side_long (mm)	4	t_side_long (mm)	4
t_side_transverse_flange (mm)	0	t_side_transverse_flange (mm)	0
t_side_transverse_web (mm)	4	t_side_transverse_web (mm)	4

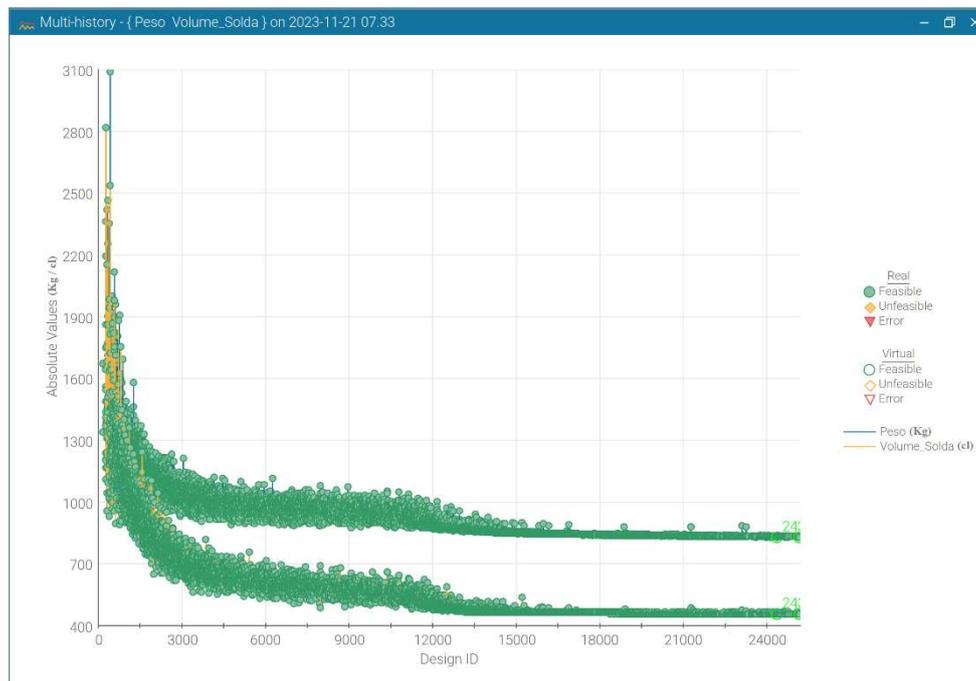


Figura 42 - Gráfico de convergência do algoritmo EVO sem o uso de DOE (fonte: autor)

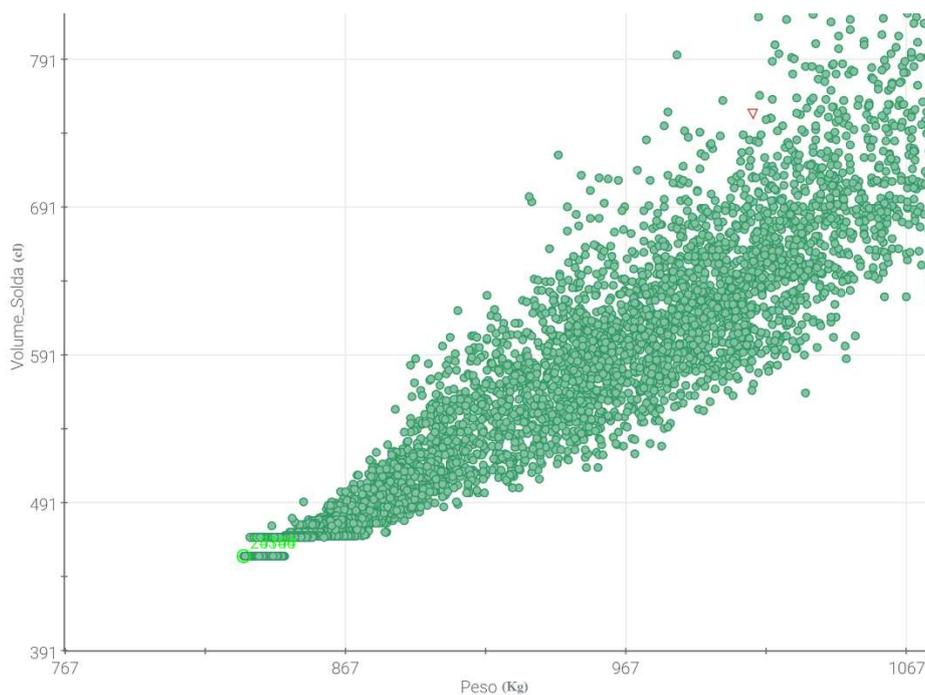


Figura 43 - Gráfico de Volume de Solda X Peso da EVO sem DOE (Pareto em verde claro, lancha original em vermelho) (fonte: autor)

Algumas informações são importantes de citar ao observar a Tabela 18:

- As únicas células que ficaram em amarelo (limite inferior ou superior de uma variável) foram o flange e espessura do elemento estrutural side_transverse (caverna) que no caso alcançaram o valor “0”, por isso esse elemento é considerado barra chata. Outro fato que deve ser destacado é que as duas soluções Pareto só diferem pelo valor da variável l_deck_long_flange e l_deck_long_web, que na primeira solução possui 5mm a menos no l_deck_long_flange enquanto tem 5mm a mais no l_deck_long_web quando comparada com a segunda solução. Essa mudança não altera a minimização do peso ou do volume de solda.

- Minimização do Peso: 181.21 Kg (-18%)
- Minimização do Volume de Solda: 299.23 centilitros (-30%)

Em relação a Figura 42 foi feita a seguinte análise:

- O tempo de processamento foi de 513 min
- 18149 Gerações não repetidas avaliadas
- O algoritmo tem uma convergência bem robusta para uma solução única, porém percebe-se que o mesmo exige um número elevado de gerações para chegar na solução ótima.

A respeito dos resultados obtidos da Figura 43 pode-se destacar os seguintes aspectos:

- O gráfico de Peso por Volume de Solda só apresenta uma solução Pareto, embora o algoritmo procure bastante soluções possíveis através de muito mais gerações.
- O algoritmo não apresenta soluções Pareto priorizando só Peso ou priorizando só Volume de Solda, converge apenas para a solução “ótima” onde tem as duas variáveis priorizadas de forma equilibrada.

O terceiro algoritmo testado de forma livre (sem o uso de DOEs) foi o Algoritmo Genético de Ordenação Não Dominada (NSGA-2), o resultado pode ser visto na Tabela 19, Figura 44 e Figura 45:

Tabela 19 - Resultados de Pareto para o algoritmo NSGA2 (fonte: autor)

Peso (Kg)	980.96	Peso (Kg)	961.89
Volume de Solda (Centilitros)	720.74	Volume de Solda (Centilitros)	734.32
Aprovado (sim = 0 , não = 1)	0	Aprovado (sim = 0 , não = 1)	0
Variação de Posição do CG (m)	0.021	Variação de Posição do CG (m)	0.018
Variáveis dependentes		Variáveis dependentes	
s(m)	0.2600	s(m)	0.2600
s_cost(m)	0.333	s_cost(m)	0.333
Dados de Entrada Variável		Dados de Entrada Variável	
l(m)	1	l(m)	1
l_bar_keel (mm)	90	l_bar_keel (mm)	90
l_bar_keel_flange (mm)	0	l_bar_keel_flange (mm)	35
l_bottom_long_flange(mm)	0	l_bottom_long_flange(mm)	0
l_bottom_long_web(mm)	80	l_bottom_long_web(mm)	80
l_bottom_transverse_flange(mm)	0	l_bottom_transverse_flange(mm)	0
l_bulk_flange(mm)	0	l_bulk_flange(mm)	0
l_bulk_web(mm)	65	l_bulk_web(mm)	60
l_deck_long_flange(mm)	95	l_deck_long_flange(mm)	95
l_deck_long_web(mm)	55	l_deck_long_web(mm)	45
l_side_long_flange (mm)	0	l_side_long_flange (mm)	15
l_side_long_web (mm)	85	l_side_long_web (mm)	85
l_side_transverse_flange (mm)	10	l_side_transverse_flange (mm)	10
ncl	1	ncl	1
nl	5	nl	5
t_bar_keel (mm)	9.53	t_bar_keel (mm)	9.53
t_bar_keel_flange (mm)	0	t_bar_keel_flange (mm)	12.7
t_bottom(mm)	5	t_bottom(mm)	5
t_bottom_long (mm)	5	t_bottom_long (mm)	5
t_bottom_transverse (mm)	9.53	t_bottom_transverse (mm)	9.53
t_bottom_transverse_flange(mm)	0	t_bottom_transverse_flange(mm)	0
t_bulk_long(mm)	5	t_bulk_long(mm)	5
t_bulkhead(mm)	4	t_bulkhead(mm)	4
t_deck (mm)	3	t_deck (mm)	3
t_deck_long(mm)	9.53	t_deck_long(mm)	9.53
t_flate_plate_keel (mm)	7.94	t_flate_plate_keel (mm)	4.76
t_sheer_bar (mm)	4.76	t_sheer_bar (mm)	4.76
t_side (mm)	4	t_side (mm)	4
t_side_long (mm)	6.35	t_side_long (mm)	4
t_side_transverse_flange (mm)	7.94	t_side_transverse_flange (mm)	5
t_side_transverse_web (mm)	6	t_side_transverse_web (mm)	5

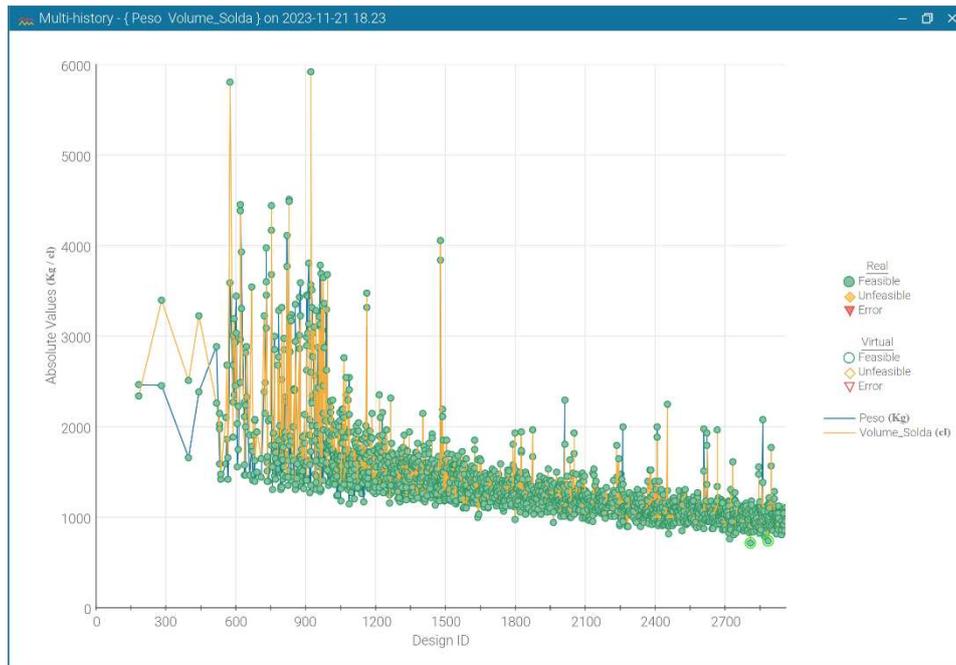


Figura 44 - Gráfico de convergência do algoritmo NSGA2 sem o uso de DOE (fonte: autor)

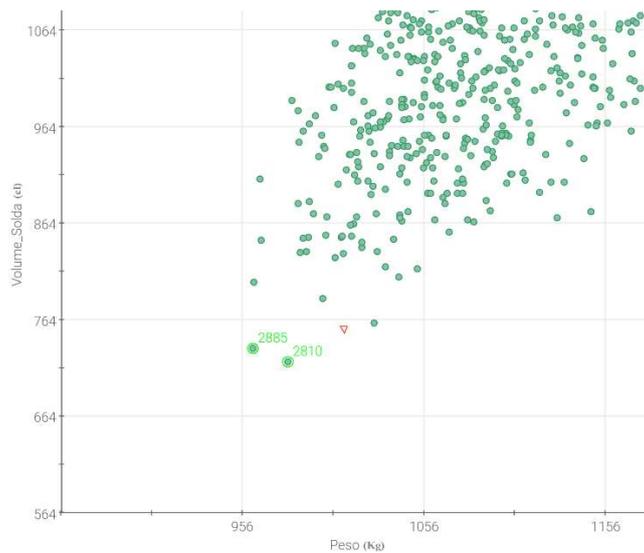


Figura 45 - Gráfico de Volume de Solda X Peso do NSGA2 sem DOE (Pareto em verde claro, lanca original em vermelho) (fonte: autor)

Algumas informações são importantes de citar ao observar a Tabela 19:

- As duas soluções apresentam soluções com diferentes valores de Peso e Volume de Solda. Esse algoritmo possui maior dispersão dos resultados em relação aos 2 anteriores, porém seus resultados ótimos não são muito bons em termo de minimização das funções objetivo do modelo proposto.
- Minimização do Peso da solução Pareto 1: -30.87 Kg (-3%)

- Minimização do Volume de Solda da solução Pareto 1: -33.54 centilitros (-4%)
- Minimização do Peso da solução Pareto 2: -49.94Kg (-5%)
- Minimização do Volume de Solda da solução Pareto 2: -19.96 centilitros (-3%)

Em relação a Figura 44 foi feita a seguinte análise:

- O tempo de processamento foi de 69 min
- 2812 Gerações não repetidas avaliadas
- O algoritmo apresenta convergência muito mais rápida em muito menos gerações, porém seu resultado final não é satisfatório para o modelo proposto pois a minimização da função objetiva é inferior as anteriormente vistas.

A respeito dos resultados obtidos da Figura 45 pode-se destacar os seguintes aspectos:

- O gráfico de Peso por Volume de Solda apresenta duas soluções Pareto, o algoritmo procura a solução de forma mais dispersa que o MOGA-2, porém seus resultados não são satisfatórios.
- O algoritmo apresenta soluções Pareto priorizando só Peso (ID = 2885) e priorizando só Volume de Solda (ID = 2810), porém essas soluções são piores que os algoritmos anteriores como quantificado na Tabela 22.

O quarto algoritmo testado de forma livre foi o Algoritmo Genético Multiobjetivo de Faixa Adaptativa (ARMOGA), o resultado pode ser visto na Tabela 20, Figura 46 e Figura 47:

Tabela 20 - Resultados de Pareto para o algoritmo ARMOGA (fonte: autor)

Peso (Kg)		1473.09	Peso (Kg)		1830.01
Volume de Solda (Centilitros)		1541.85	Volume de Solda (Centilitros)		1536.20
Aprovado (sim = 0, não = 1)		0	Aprovado (sim = 0, não = 1)		0
Variação de Posição do CG (m)		0.042	Variação de Posição do CG (m)		0.145
Variáveis dependentes			Variáveis dependentes		
s(m)		0.2200	s(m)		0.3900
s_cost(m)		1	s_cost(m)		0.2817
Dados de Entrada Variável			Dados de Entrada Variável		
l(m)		0.4	l(m)		0.3
l_bar_keel (mm)		55	l_bar_keel (mm)		70
l_bar_keel_flange (mm)		85	l_bar_keel_flange (mm)		30
l_bottom_long_flange(mm)		30	l_bottom_long_flange(mm)		65
l_bottom_long_web(mm)		85	l_bottom_long_web(mm)		50
l_bottom_transverse_flange(mm)		15	l_bottom_transverse_flange(mm)		70
l_bulk_flange(mm)		20	l_bulk_flange(mm)		50
l_bulk_web(mm)		85	l_bulk_web(mm)		95
l_deck_long_flange(mm)		55	l_deck_long_flange(mm)		85
l_deck_long_web(mm)		50	l_deck_long_web(mm)		50
l_side_long_flange (mm)		85	l_side_long_flange (mm)		50
l_side_long_web (mm)		55	l_side_long_web (mm)		55
l_side_transverse_flange (mm)		55	l_side_transverse_flange (mm)		80
ncl		0	ncl		2
nl		6	nl		3
t_bar_keel (mm)		4	t_bar_keel (mm)		6.35
t_bar_keel_flange (mm)		6	t_bar_keel_flange (mm)		4.76
t_bottom(mm)		4.76	t_bottom(mm)		6
t_bottom_long (mm)		5	t_bottom_long (mm)		4.76
t_bottom_transverse (mm)		6.35	t_bottom_transverse (mm)		4
t_bottom_transverse_flange(mm)		9.53	t_bottom_transverse_flange(mm)		4
t_bulk_long(mm)		5	t_bulk_long(mm)		5
t_bulkhead(mm)		12.7	t_bulkhead(mm)		6.35
t_deck (mm)		3	t_deck (mm)		9.53
t_deck_long(mm)		12.7	t_deck_long(mm)		6.35
t_flate_plate_keel (mm)		6	t_flate_plate_keel (mm)		7.94
t_shear_bar (mm)		4	t_shear_bar (mm)		7.94
t_side (mm)		6	t_side (mm)		6.35
t_side_long (mm)		6	t_side_long (mm)		6.35
t_side_transverse_flange (mm)		5	t_side_transverse_flange (mm)		6
t_side_transverse_web (mm)		4	t_side_transverse_web (mm)		9.53

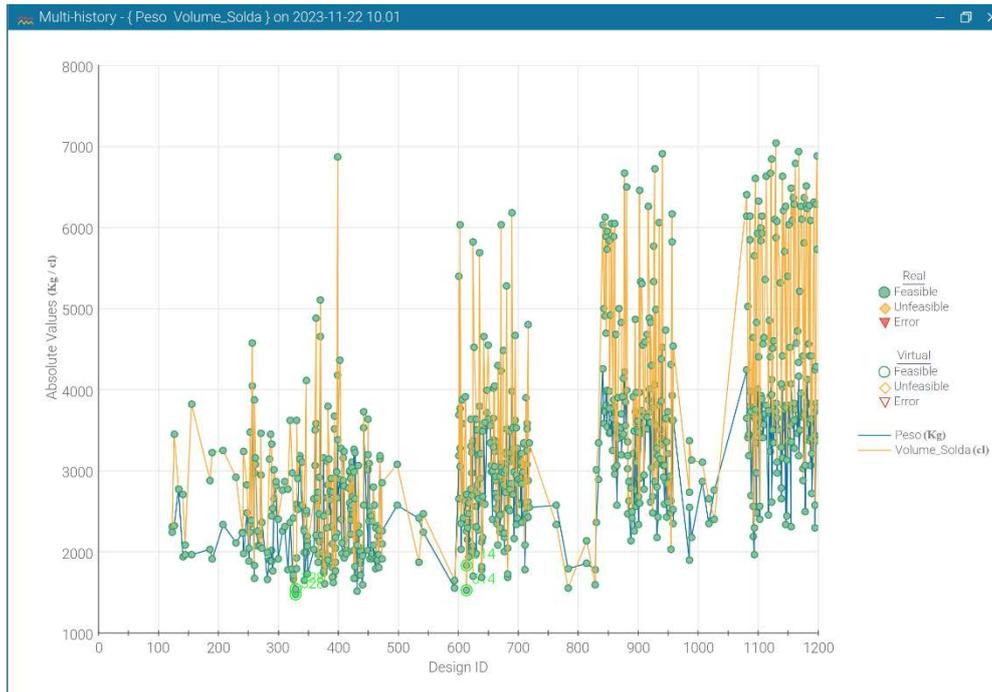


Figura 46 - Gráfico de convergência do algoritmo ARMOGA sem DOE (fonte: autor)

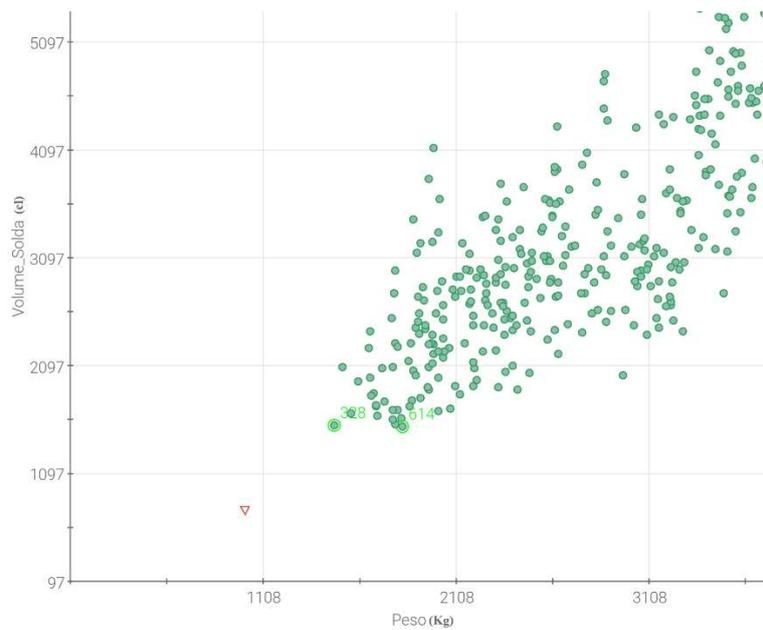


Figura 47 - Gráfico de Volume de Solda X Peso do ARMOGA sem DOE (Pareto em verde claro, lancha original em vermelho) (fonte: autor)

Algumas informações são importantes de citar ao se observar a Tabela 20 e Figura 46:

- As duas soluções apresentam soluções com diferentes valores de Peso e Volume de Solda. Esse algoritmo possui maior dispersão dos resultados em relação aos 3 anteriores, porém seus resultados são péssimos e foram descartados por apresentarem valores de peso e volume de solda superiores aos originais.
- Aumento do Peso da solução Pareto 1: 461.25 Kg (+46%)
- Aumento do Volume de Solda da solução Pareto 1: 33.54 centilitros (+104%)
- Aumento do Peso da solução Pareto 2: 818.17 Kg (+81%)
- Aumento do Volume de Solda da solução Pareto 2: 781.91 centilitros (+104%)

Em relação a Figura 46 foi feita a seguinte análise:

- O tempo de processamento foi de 35 min
- 1200 Gerações não repetidas avaliadas

A respeito dos resultados obtidos da Figura 47 pode-se destacar os seguintes aspectos:

- O gráfico de Peso por Volume de Solda apresenta duas soluções Pareto, o algoritmo, porém obteve resultados de Peso e Volume de solda maiores que do projeto original (até 104% a mais no caso do volume de solda), por isso seus resultados não foram considerados.

O quinto algoritmo testado de forma livre foi o Muitos objetivos (*MANY-OBJECTIVE*), o resultado pode ser visto na Tabela 21, Figura 48 e Figura 49:

Tabela 21 - Resultados de Pareto para o algoritmo *MANY OBJECTIVE* (fonte: autor)

Peso (Kg)	1451.77	Peso (Kg)	1586.87	Peso (Kg)	1504.51
Volume de Solda (Centilitros)	1200.09	Volume de Solda (Centilitros)	1077.45	Volume de Solda (Centilitros)	1140.97
Aprovado (sim = 0, não = 1)	0	Aprovado (sim = 0, não = 1)	0	Aprovado (sim = 0, não = 1)	0
Variação de Posição do CG (m)	0.031	Variação de Posição do CG (m)	0.025	Variação de Posição do CG (m)	0.072
Variáveis dependentes		Variáveis dependentes		Variáveis dependentes	
s(m)	0.2600	s(m)	0.2600	s(m)	0.2200
s_cost(m)	1	s_cost(m)	1	s_cost(m)	1
Dados de Entrada Variável		Dados de Entrada Variável		Dados de Entrada Variável	
l(m)	0.8	l(m)	0.7	l(m)	0.8
l_bar_keel (mm)	85	l_bar_keel (mm)	100	l_bar_keel (mm)	85
l_bar_keel_flange (mm)	75	l_bar_keel_flange (mm)	60	l_bar_keel_flange (mm)	55
l_bottom_long_flange(mm)	55	l_bottom_long_flange(mm)	90	l_bottom_long_flange(mm)	85
l_bottom_long_web(mm)	70	l_bottom_long_web(mm)	65	l_bottom_long_web(mm)	70
l_bottom_transverse_flange(mm)	60	l_bottom_transverse_flange(mm)	60	l_bottom_transverse_flange(mm)	55
l_bulk_flange(mm)	20	l_bulk_flange(mm)	70	l_bulk_flange(mm)	35
l_bulk_web(mm)	95	l_bulk_web(mm)	95	l_bulk_web(mm)	65
l_deck_long_flange(mm)	65	l_deck_long_flange(mm)	65	l_deck_long_flange(mm)	70
l_deck_long_web(mm)	65	l_deck_long_web(mm)	75	l_deck_long_web(mm)	90
l_side_long_flange (mm)	70	l_side_long_flange (mm)	55	l_side_long_flange (mm)	70
l_side_long_web (mm)	65	l_side_long_web (mm)	65	l_side_long_web (mm)	80
l_side_transverse_flange (mm)	80	l_side_transverse_flange (mm)	95	l_side_transverse_flange (mm)	100
ncl	0	ncl	0	ncl	0
nl	5	nl	5	nl	6
t_bar_keel (mm)	6	t_bar_keel (mm)	6	t_bar_keel (mm)	6.35
t_bar_keel_flange (mm)	9.53	t_bar_keel_flange (mm)	9.53	t_bar_keel_flange (mm)	7.94
t_bottom(mm)	6.35	t_bottom(mm)	6.35	t_bottom(mm)	5
t_bottom_long (mm)	6	t_bottom_long (mm)	4.76	t_bottom_long (mm)	4
t_bottom_transverse (mm)	6.35	t_bottom_transverse (mm)	7.94	t_bottom_transverse (mm)	6.35
t_bottom_transverse_flange(mm)	9.53	t_bottom_transverse_flange(mm)	12.7	t_bottom_transverse_flange(mm)	6
t_bulk_long(mm)	6.35	t_bulk_long(mm)	4.76	t_bulk_long(mm)	6.35
t_bulkhead(mm)	7.94	t_bulkhead(mm)	6.35	t_bulkhead(mm)	9.53
t_deck (mm)	5	t_deck (mm)	5	t_deck (mm)	6
t_deck_long(mm)	6.35	t_deck_long(mm)	4.76	t_deck_long(mm)	4
t_flate_plate_keel (mm)	12.7	t_flate_plate_keel (mm)	12.7	t_flate_plate_keel (mm)	9.53
t_sheer_bar (mm)	6.35	t_sheer_bar (mm)	7.94	t_sheer_bar (mm)	9.53
t_side (mm)	6	t_side (mm)	6.35	t_side (mm)	7.94
t_side_long (mm)	15.87	t_side_long (mm)	12.7	t_side_long (mm)	15.87
t_side_transverse_flange (mm)	12.7	t_side_transverse_flange (mm)	12.7	t_side_transverse_flange (mm)	12.7
t_side_transverse_web (mm)	6.35	t_side_transverse_web (mm)	7.94	t_side_transverse_web (mm)	5

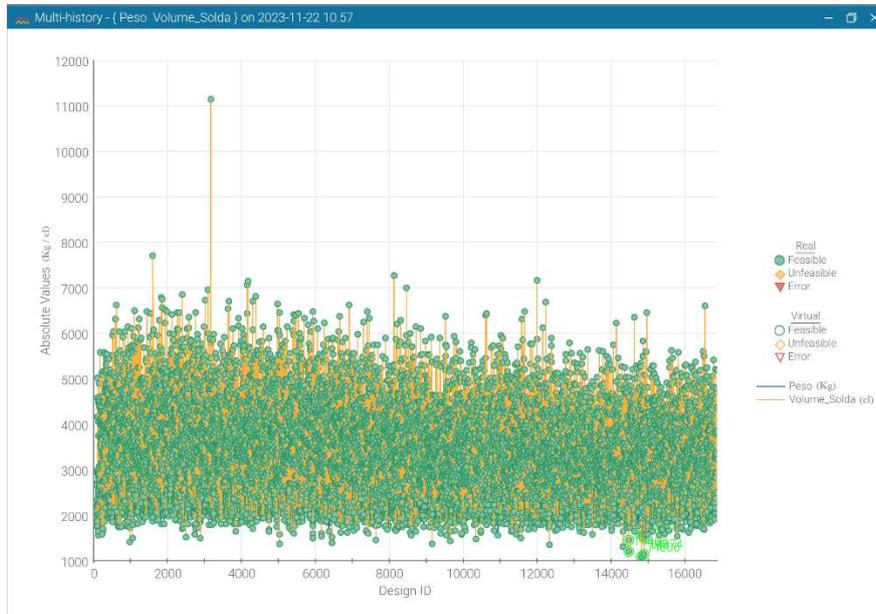


Figura 48 - Gráfico de convergência do algoritmo MANY-OBJECTIVE sem o uso de DOE (fonte: autor)

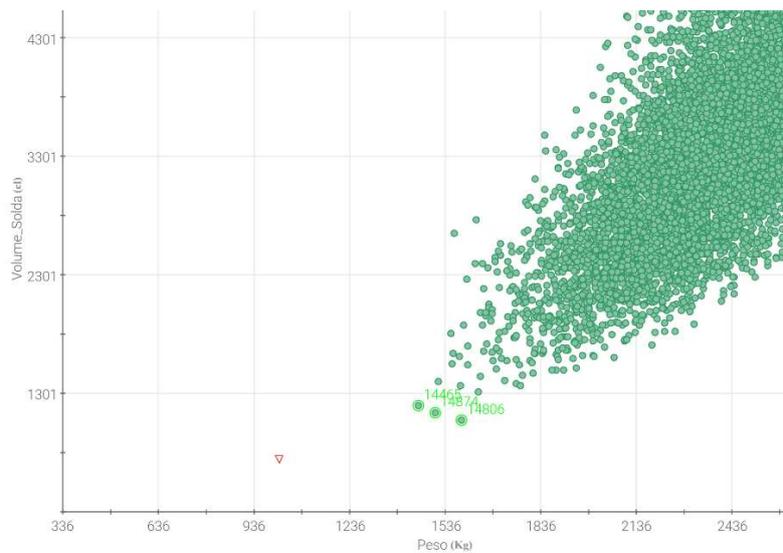


Figura 49 Gráfico de Volume de Solda X Peso do MANY-OBJECTIVE sem DOE (Pareto em verde claro, lancha original em vermelho) (fonte: autor)

Algumas informações são importantes de citar ao observar a Tabela 21 e Figura 48:

- As três soluções apresentam soluções com diferentes valores de Peso e Volume de Solda. Esse algoritmo possui maior dispersão dos resultados em relação aos 2

primeiros, porém seus resultados são péssimos e foram descartados por apresentarem valores de peso e volume de solda superiores aos originais:

- Aumento do Peso da solução Pareto 1: 439.94 Kg (+43%)
- Aumento do Volume de Solda da solução Pareto 1: 445.80 centilitros (+59%)
- Aumento do Peso da solução Pareto 2: 575.03 Kg (+57%)
- Aumento do Volume de Solda da solução Pareto 2: 323.16 centilitros (+43%)
- Aumento do Peso da solução Pareto 3: 492.67 Kg (+49%)
- Aumento do Volume de Solda da solução Pareto 3: 386.68 centilitros (+51%)

Em relação a Figura 48 foi feita a seguinte análise:

- O tempo de processamento foi de 478 min
- 16861 Gerações não repetidas avaliadas

A respeito dos resultados obtidos da Figura 49 pode-se destacar os seguintes aspectos:

- O gráfico de Peso por Volume de Solda apresenta três soluções Pareto, o algoritmo, porém obteve resultados de Peso e Volume de solda maiores que do projeto original (até 59% a mais no caso do volume de solda), por isso seus resultados não foram considerados.

Tendo analisado os 5 algoritmos foi construída a seguinte tabela para análise:

Tabela 22 - Resultados dos algoritmos selecionados (fonte: autor)

	MOGA-2		EVO		NSGA-2				ARMOGA				MANY					
Min Peso (kg / %)	-80.8	-8%	-181.2	-18%	-30.9	-3%	-49.9	-5%	461.3	46%	818.2	81%	439.9	43%	575.0	57%	492.7	49%
Min Vol Solda (centilitros / %)	-333.7	-44%	-299.2	-40%	-33.5	-4%	-20.0	-3%	787.6	104%	781.9	104%	445.8	59%	323.2	43%	386.7	51%
Gerações	3891		18149		2812		2812		1200		1200		16861		16861		16861	
Tempo(min)	111		513		69		69		35		35		478		478		478	

A partir dos resultados obtidos, pode-se enfatizar os seguintes pontos:

- Os algoritmos ARMOGA e MANY tiveram suas soluções descartadas pois obtiveram um resultado de peso e volume de solda superior aos obtidos no projeto original da lancha, por isso, esses valores foram destacados em vermelho e os valores obtidos nas variáveis de otimização não foram usadas como limites para os DOEs.

- O algoritmo EVO obteve a melhor minimização do Peso (-18%), quando se comparado com o resultado do segundo melhor (MOGA-2) percebe-se uma minimização de 10% a mais. Em relação ao volume de solda a minimização foi de -40%, quando se compara com o segundo melhor (MOGA-2) percebe-se uma minimização de apenas 4%

a menos, por esse motivo, os resultados desse algoritmo foram considerados melhor e destacados em verde.

- O algoritmo MOGA-2 obteve uma boa minimização Peso (-8%) e Volume de Solda (-44%). Esse algoritmo obteve também um valor de tempo quase cinco vezes menor que o EVO (21% do tempo gasto pelo EVO), por isso o tempo foi destacado em verde.

- O algoritmo NSGA-2 obteve resultados de minimização muito distantes dos obtidos pelo EVO (com diferenças percentuais de mais de 10%), portanto os valores obtidos nas variáveis de otimização, não foram usadas como limites para os DOEs.

Assim, tendo testado todos os algoritmos, foram escolhidos o MOGA2 e Evolucionário (EVO) para serem usados nos próximos testes e como referência para limites das variáveis de otimização, como pode ser observado abaixo:

Tabela 23 – Valores de referência das variáveis a serem usadas na criação dos DOEs (fonte: autor)

	MOGA-2	EVO
l(m)	0.5	0.8
ncl	1	1
nl	2	3

4.2 Construção e análises dos DOEs

No funcionamento do algoritmo genético, assim que se inicia o processo de otimização, uma população inicial é gerada de forma aleatória para que o algoritmo tenha uma base inicial de amostra para entender como as funções objetivo se comportam com as diversas variáveis de entrada. Os indivíduos dessa população são projetos de experimentos (DOE). O número de DOEs necessários dependem do tipo de otimização e da quantidade de variáveis de entrada. Na etapa de teste dos algoritmos, esses DOEs foram gerados de forma aleatória pelos algoritmos testados, porém após definir os dois algoritmos mais eficientes para o problema, foi necessário fazer uma avaliação mais aprofundada do universo de soluções possíveis, para isso foi proposto rodar modelos utilizando as variáveis “l”, “ncl” e “nl” de forma fixa, e a cada novo modelo se alterar apenas uma das três variáveis, de forma a alcançar a faixa de valores que foi proposta a se estudar baseados nos resultados obtidos na Tabela 23:

Tabela 24 - limites das variáveis a serem usadas para criação dos DOEs (fonte: autor)

	Mínimo	Passo	Máximo
l(m)	0.6	0.2	1.2
ncl	0	1	2
nl	1	1	4

Obs: também foi usado o valor de $l=0.5m$

Além disso, as outras variáveis ficaram livres em cada simulação realizada, assim a quantidade total de simulações para criar o DOE foi:

$$N = 5 * 3 * 4 = 60 \quad (102)$$

Devido ao número elevado de simulações necessárias, foi escolhido um número máximo de 2000 gerações a cada simulação executada, baseado em experiência anteriores, número esse que conseguiria um resultado satisfatoriamente próximo do ótimo.

Para a escolha do algoritmo para fazer as simulações necessárias para construção dos DOEs, foi proposta a eficiência de redução da variável em função do tempo, pois deveriam ser realizadas 60 simulações, a seguinte fórmula foi proposta:

$$E = \frac{\min}{\text{gerações}} \quad (103)$$

Onde,

E = eficiência de redução de função objetivo em Kg/geração ou centilitros/geração

min = minimização da variável em relação ao projeto original em Kg ou centilitros

gerações = gerações necessárias para a minimização

Usando os resultados da Tabela 22, pode-se calcular essa eficiência para o peso e volume de solda dos algoritmos MOGA-2 e Evolucionário:

$$E_{MOGA2_Peso} = \frac{-80.8}{3891} = -0.02 \frac{Kg}{\text{geração}} \quad (104)$$

$$E_{MOGA2_Vol} = \frac{-333.7}{3891} = -0.08 \frac{\text{centilitros}}{\text{geração}} \quad (105)$$

$$E_{EVO_Peso} = \frac{-181.2}{18149} = -0.00998 \frac{\text{Kg}}{\text{geração}} \quad (106)$$

$$E_{EVO_Vol} = \frac{-299.2}{18149} = -0.016 \frac{\text{centilitros}}{\text{geração}} \quad (107)$$

Foi selecionado o algoritmo MOGA-2 para as análises, tendo em vista sua melhor eficiência, minimizando mais as funções objetivo em menos tempo.

Importante mencionar que em média cada simulação usando MOGA-2 demora cerca de 60 minutos quando se limita em 2000 o número máximo de gerações. Por este motivo, foi necessário escolher apenas 3 variáveis (“l”, “ncl” e “nl”) de forma fixa, e a cada novo modelo se alterar apenas uma das três variáveis, de forma a executar apenas 60 simulações como já mencionado anteriormente. Essa aproximação foi necessária para tornar viável o tempo necessário para construção dos DOEs. Estas 3 variáveis foram escolhidas por terem mais influência na variação de todas as outras variáveis que ficaram livres, uma vez que a regra utiliza equações que dependem das dimensões dos painéis reforçados, e estas são diretamente afetadas pelas 3 variáveis escolhidas.

Diferentemente de problemas mais simplificados governados por algoritmos baseados em gradientes, por exemplo, a otimização baseada em algoritmos genéticos não apresenta necessariamente um resultado final definitivo como já visto anteriormente, portanto o número de soluções finais para as 60 simulações foi 149, os resultados podem ser vistos no “ANEXO 6 - RESULTADOS DOS DOES”. O resultado da fronteira de Pareto para os DOEs testados pode ser observada na Figura 50:

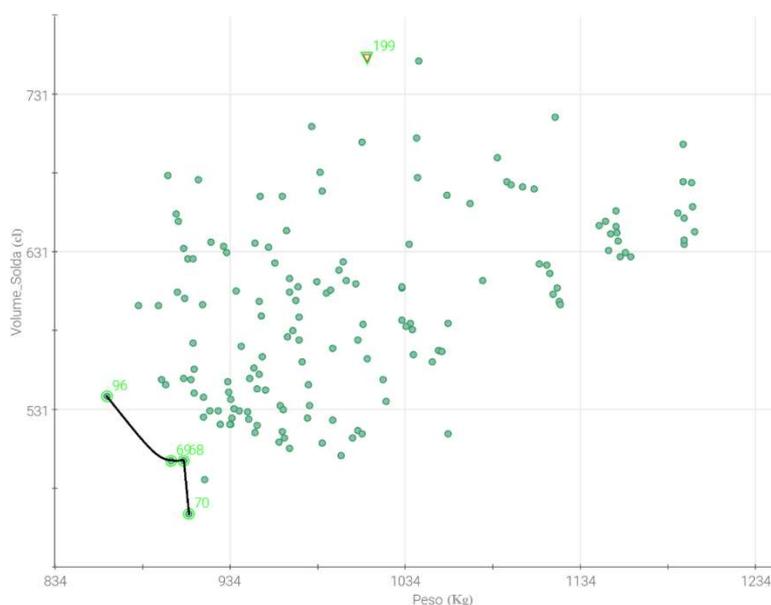


Figura 50 - Fronteira de Pareto dos DOEs (lancha original em vermelho) (fonte: autor)

Com relação a Figura 50, observa-se que 4 experimentos obtiveram os melhores resultados, fazendo assim parte da fronteira de Pareto, são eles: Ids: 68, 69, 70 e 96. Eles fazem parte da fronteira de Pareto pois se mudar de um resultado para outro, sempre o volume de Solda ou Peso é melhor ou pior que o outro. Os valores das suas variáveis de entrada assim como das funções objetivo são:

Tabela 25 - Resultados Pareto dos DOEs (fonte: autor)

ID	l (m)	ncl	nl	l_bar_keel (mm)	l_bar_keel_flange (mm)	l_bottom_long_flange (mm)	l_bottom_long_web (mm)	l_bottom_transverse_flange (mm)	l_bulk_flange (mm)	l_bulk_web (mm)	l_deck_long_flange (mm)	l_deck_long_web (mm)	l_side_long_flange (mm)	l_side_long_web (mm)	l_side_transverse_flange (mm)	Aprovado	t_bar_keel (mm)	t_bar_keel_flange (mm)	t_bottom (mm)	t_bottom_long (mm)	t_bottom_transverse (mm)	t_bottom_transverse_flange (mm)	t_bulk_long (mm)	t_bulkhead (mm)	t_deck (mm)	t_deck_long (mm)	t_flate_plate_keel (mm)	t_shear_bar (mm)	t_side (mm)	t_side_long (mm)	t_side_transverse_flange (mm)	t_side_transverse_web (mm)	Peso (kg)	Variacao_CC (m)	Volume_Solda (cl)
68	0.8	1	2	100	55	45	85	75	5	75	25	45	40	60	25	0	5	4	5	5	5	6.35	5	4	4	5	6.35	6	4	4	6	4	907.2	0.01	498.2
69	0.8	1	2	95	55	45	60	70	5	80	25	40	45	60	30	0	5	5	5	5	5	6	5	4	4	5	6.35	6.35	4	4	6	4	900.0	0.02	498.4
70	0.8	1	2	95	55	40	65	80	0	85	25	50	50	60	35	0	6.35	4.76	5	4	5	7.94	5	4	4	6	6.35	7.94	4	4	6	4	910.2	0.02	464.9
96	1	1	4	100	20	25	75	65	20	60	0	50	35	35	10	0	6.35	6.35	5	4	6	5	4	5	3	4	6.35	4.76	4	5	8	5	863.5	0.04	539.5

A respeito dos resultados obtidos da Tabela 25 e Figura 50 pode-se destacar os seguintes aspectos:

- Se comparada a Tabela 24, percebe-se que nenhuma das três variáveis escolhidas (l, ncl e nl) tem seu valor igual ao limite mínimo ou máximo.

- A variável “l_bar_keel” atinge seu valor máximo (destacado em amarelo) assim como as variáveis “l_bulk_flange” e “l_deck_long_flange” atingem seus valores mínimos (destacado em amarelo). O valor mínimo representa nesse caso a escolha de uma barra chata. O valor máximo significa que o algoritmo foi limitado nesse aspecto, porém se optou por deixar esse limite para não gerar elementos estruturas muito longos.

Foi também construída a seguinte tabela para análise:

Tabela 26 - Resultados dos melhores DOE (fonte: autor)

	ID = 68		ID = 69		ID = 70		ID = 96	
Min Peso (kg / %)	-104.63	-10%	-111.9	-11%	-101.7	-10%	-148.3	-15%
Min Vol Solda (centilitros / %)	-256.1	-34%	-255.9	-34%	-289.4	-38%	-214.8	-28%
Gerações	2000		2000		2000		2000	

A partir da comparação da Tabela 26 com a Tabela 22 chega-se as seguintes conclusões:

- **ID = 68**: obteve uma minimização 2% maior do Peso obtido pelo algoritmo MOGA-2 de forma livre, porém obteve uma minimização 8% menor em relação ao algoritmo evolucionário na sua forma livre. Porém vale destacar, que obteve uma minimização 10% menor do Volume de Solda obtido pelo algoritmo MOGA-2 de forma livre, também obteve uma minimização 6% menor em relação ao algoritmo evolucionário na sua forma livre.

- **ID = 69**: obteve uma minimização 3% maior do Peso obtido pelo algoritmo MOGA-2 de forma livre, porém obteve uma minimização 10% menor em relação ao algoritmo evolucionário na sua forma livre. Porém vale destacar, que obteve uma minimização 10% menor do Volume de Solda obtido pelo algoritmo MOGA-2 de forma livre, também obteve uma minimização 6% menor em relação ao algoritmo evolucionário na sua forma livre.

- **ID = 70**: obteve uma minimização 2% maior do Peso obtido pelo algoritmo MOGA-2 de forma livre, porém obteve uma minimização 8 % menor em relação ao algoritmo evolucionário na sua forma livre. Porém vale destacar, que obteve uma minimização 6% menor do Volume de Solda obtido pelo algoritmo MOGA-2 de forma livre, também obteve uma minimização 2% menor em relação ao algoritmo evolucionário na sua forma livre.

- **ID = 96**: obteve uma minimização 7% maior do Peso obtido pelo algoritmo MOGA-2 de forma livre, porém obteve uma minimização 3 % menor em relação ao

algoritmo evolucionário na sua forma livre. Porém vale destacar, que obteve uma minimização 16% menor do Volume de Solda obtido pelo algoritmo MOGA-2 de forma livre, também obteve uma minimização 12% menor em relação ao algoritmo evolucionário na sua forma livre.

O modelo produzido possui 31 variáveis, sendo assim de difícil visualização da relação de influência das variáveis. Como forma de se observar a robustez do modelo produzido, foi proposto alguns gráficos que relacionavam variáveis que se julgou ter mais influência sobre outras, sendo elas: “l”, “nl” e “nl” e as variáveis “e_t_bottom” (espessura do fundo) e a “e_t_side” (espessura do costado).

Primeiramente foi estudada a relação de influência entre as variáveis “l”, “nl” e “e_t_bottom”, o estudo é composto por duas figuras, a primeira (Figura 51) mostra 4 gráficos tendo no eixo “x” a variável “l” e tendo no eixo “y” a variável “e_t_bottom”, os 4 gráficos se diferem pela quantidade de reforços no fundo (nl), variando de 1 até 4. A segunda figura (Figura 52) mostra 5 gráficos tendo no eixo x a variável “nl” e tendo no eixo “y” a variável “e_t_bottom”, os 5 gráficos se diferem pelo espaçamento entre reforçadores transversais no fundo (l), variando de 0.5m até 1.2m. Na verdade as duas figuras mostram as mesmas informações, porém foi assim escolhido para facilitar a visualização dos resultados:

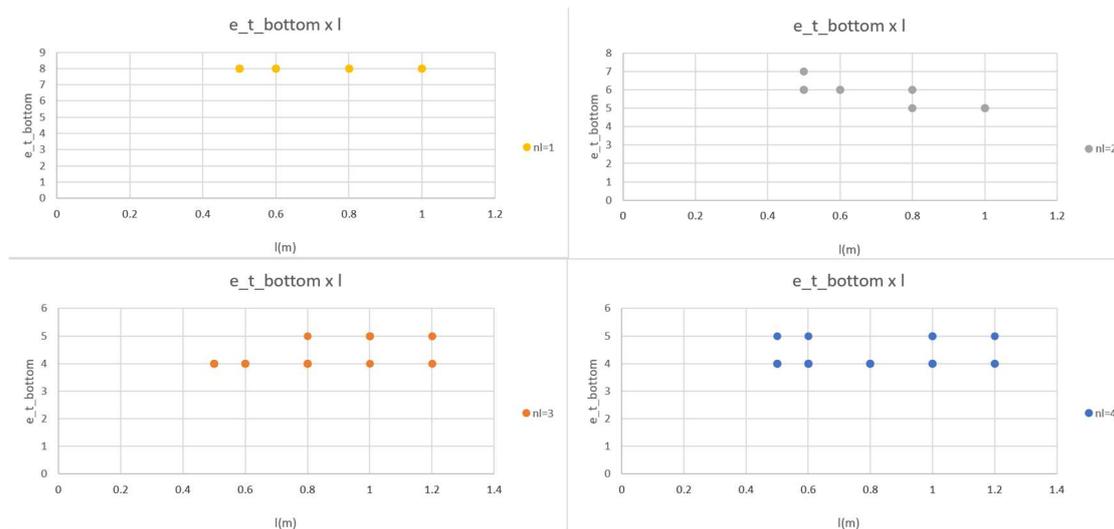


Figura 51 - Gráfico de correlação das variáveis l, nl e e_t_bottom (fonte: autor)

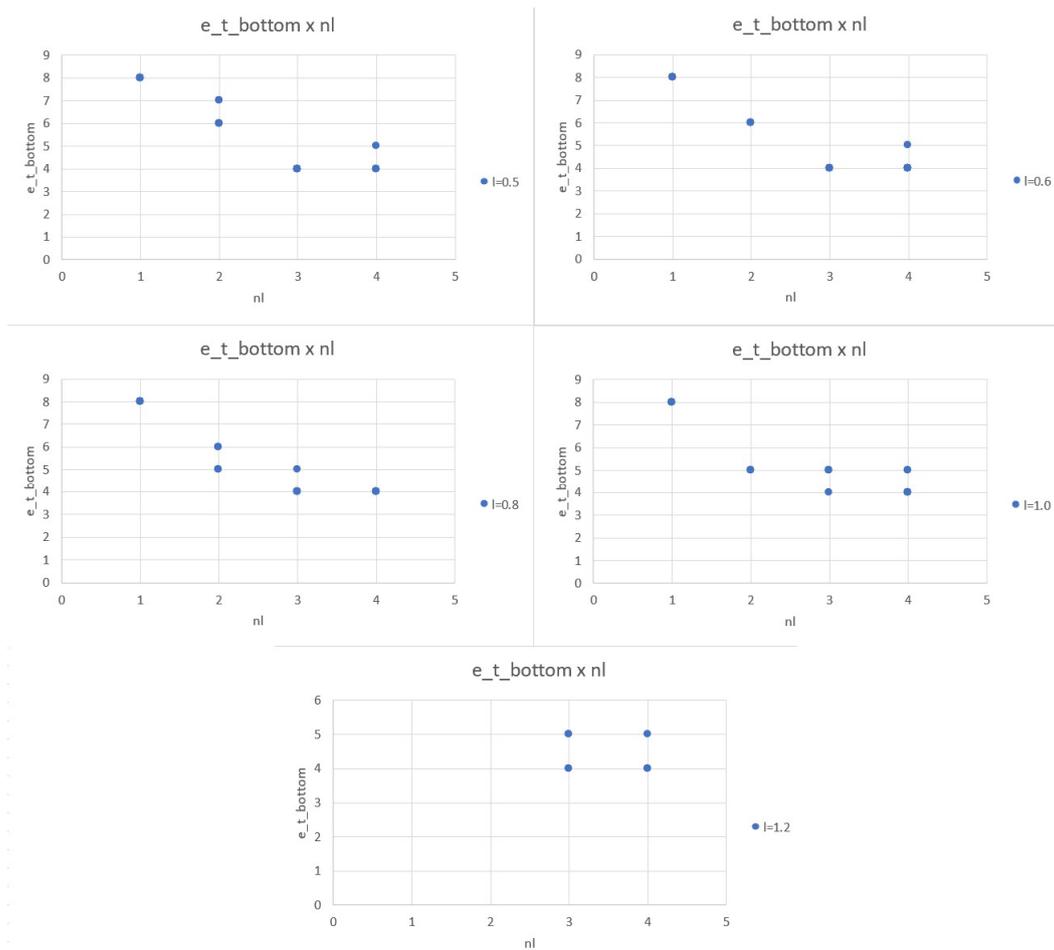


Figura 52 - Gráfico de correlação das variáveis l , nl e e_t_bottom (fonte: autor)

Pela comparação das Figura 51 e Figura 52 pode-se enfatizar os seguintes pontos:

- **Figura 51:** a variável “ e_t_bottom ” é pouco influenciada pela variável “ l ” tendo em vista que em cada gráfico a variável “ e_t_bottom ” oscila entre no máximo 2 valores, mesmo com a mudança da variável “ l ”.

- **Figura 52:** a variável “ e_t_bottom ” é bem influenciada pela variável “ nl ” tendo em vista que a variável “ e_t_bottom ” oscila em até 5 valores, dependendo do espaçamento das hastilhas (l). As variáveis apresentam robustez nos seus conceitos, uma vez que a espessura do fundo (e_t_bottom) diminui com o aumento no número de reforços no fundo.

- A variável “ e_t_bottom ” não é totalmente independente de “ l ”, tendo em vista que quando seu valor chegou em 1.2m a variável “ nl ” só alcançou resultados viáveis com 3 ou 4 reforçadores no fundo, não sendo possível construir uma estrutura com 1 ou 2 reforçadores, uma vez que a área do painel do fundo seria muito grande, favorecendo a falha estrutural.

O segundo estudo, foi a relação de influência das variáveis “l”, “ncl” e “e_t_side”. Novamente o estudo é composto por duas figuras, a primeira (Figura 53) mostra 3 gráficos tendo no eixo “x” a variável “l”, e tendo no eixo “y” a variável “e_t_side”. Os 3 gráficos se diferem pela quantidade de reforços no costado (ncl), variando de 0 até 2. A segunda figura (Figura 54) mostra 5 gráficos tendo no eixo “x” a variável “ncl” e tendo no eixo “y” a variável “e_t_side”. Os 5 gráficos se diferem pelo espaçamento entre reforçadores transversais no fundo (l), variando de 0.5m até 1.2m. Na verdade as duas figuras mostram as mesmas informações, porém foi assim escolhido para facilitar a visualização dos resultados:

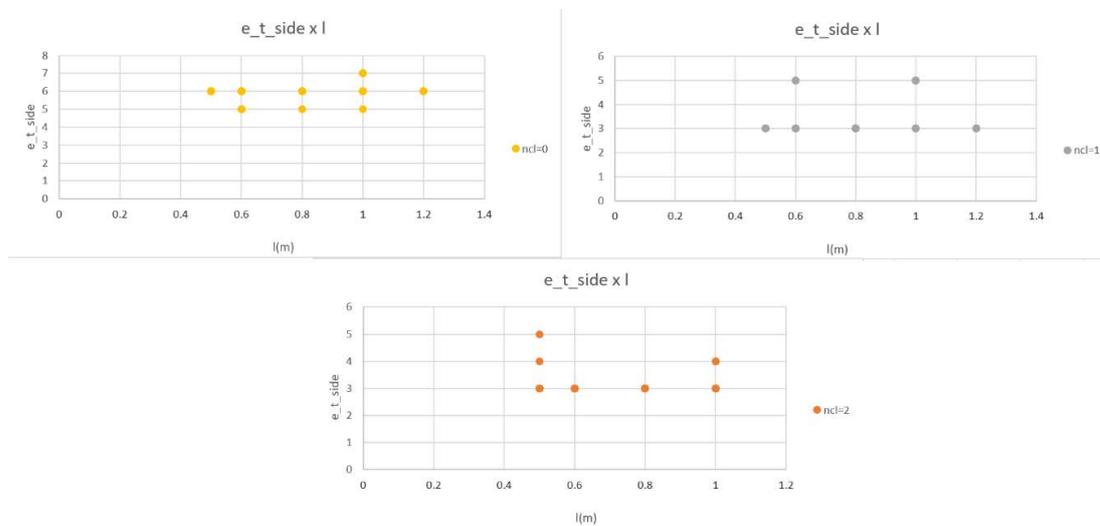


Figura 53 - Gráfico de correlação das variáveis l , n_{cl} e e_{t_side} (fonte: autor)

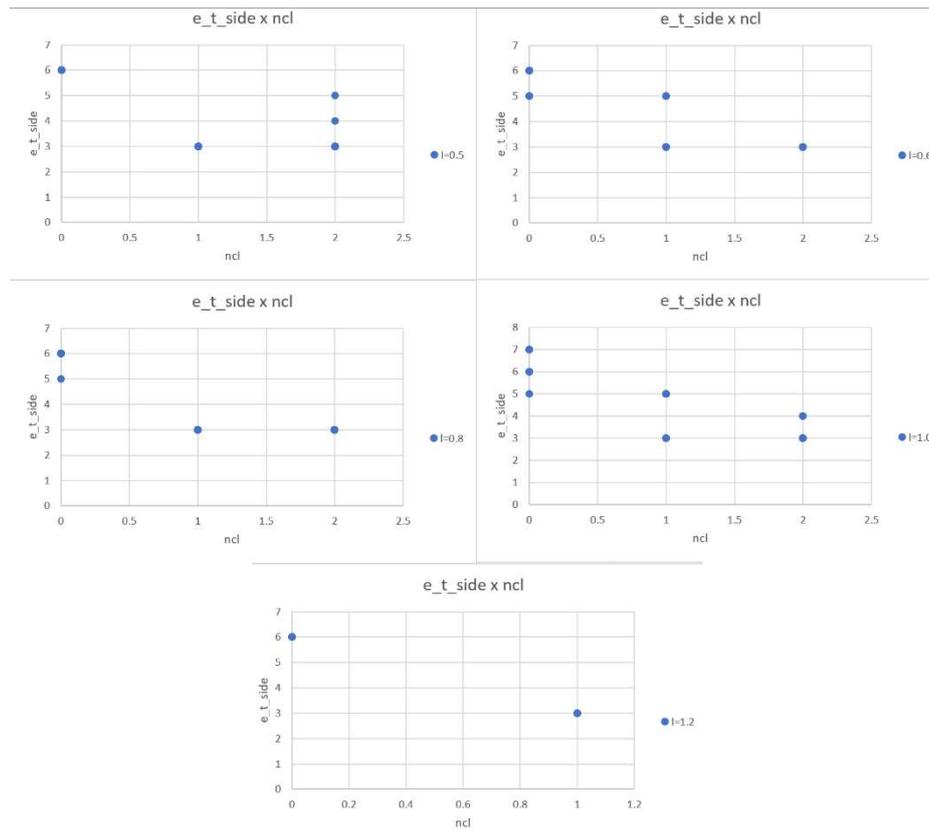


Figura 54 - Gráfico de correlação das variáveis l , ncl e e_t_side (fonte: autor)

Pela comparação das Figura 53 e Figura 54 pode-se enfatizar os seguintes pontos:

- **Figura 53:** a variável “ e_t_side ” é mais influenciada pela variável “ l ” do que no caso anterior, tendo em vista que em cada gráfico a variável “ e_t_side ” oscila entre no máximo 3 valores.

- **Figura 54:** a variável “ e_t_side ” é bem influenciada pela variável “ ncl ” tendo em vista que a variável “ e_t_side ” oscila em até 5 valores, dependendo do espaçamento das hastilhas (l). As variáveis apresentam robustez nos seus conceitos, uma vez que a espessura do costado (e_t_side) diminui com o aumento no número de reforços no costado (ncl), embora pouca diferença exista entre a espessura quando compara-se o valor de $ncl = 1$ e $ncl = 2$.

- A variável “ e_t_side ” embora tenha diminuído com o aumento de “ ncl ”, percebe-se que seu valor sempre fica em 3 na maioria das vezes, que é a menor espessura da regra (4mm), que depende do espaçamento de longitudinais do costado (ncl). Quando o valor de “ ncl ” fica 0, percebe-se um aumento significativo no valor da espessura do costado, tendo em vista que o valor mínimo de espessura sobe pois não há nenhum reforçador no costado.

4.3 Usando os DOEs para se obter o resultado final da otimização

Para cumprir a etapa final da metodologia proposta, após rodar os DOE julgados necessários (60 simulações), rodou-se os algoritmos mais eficientes (MOGA2 e Evolucionário) seguindo as seguintes premissas:

- Todas as variáveis livres.
- Uso dos resultados DOEs da etapa passada.
- Retirada dos limites das variáveis “l”, “ncl” e “nl” usados para construção dos DOEs.
- Algoritmos usando o modo automática da ferramenta modeFrontier, onde o algoritmo não fica limitado conforme o número de gerações, ficando livre para parar quando não há evolução significativa no valor das funções objetivo.

As variáveis de entrada ficaram com os seguintes limites:

Tabela 27 - limites máximos e mínimos das variáveis de entrada (fonte: autor)

	Mínimo	Passo	Máximo
l(m)	0.1	0.1	1.2
l_bar_keel (mm)	5	5	100
l_bar_keel_flange (mm)	0	5	100
l_bottom_long_flange(mm)	0	5	100
l_bottom_long_web(mm)	5	5	100
l_bottom_transverse_flange(mm)	0	5	100
l_bulk_flange(mm)	0	5	100
l_bulk_web(mm)	5	5	100
l_deck_long_flange(mm)	0	5	100
l_deck_long_web(mm)	5	5	100
l_side_long_flange (mm)	0	5	100
l_side_long_web (mm)	5	5	100
l_side_tranverse_flange (mm)	0	5	100
ncl	0	1	4
nl	1	1	6
t_bar_keel (mm)	1	1	11
t_bar_keel_flange (mm)	1	1	11
t_bottom(mm)	1	1	11
t_bottom_long (mm)	1	1	11
t_bottom_transverse (mm)	1	1	11
t_bottom_transverse_flange(mm)	1	1	11
t_bulk_long(mm)	1	1	11
t_bulkhead(mm)	1	1	11
t_deck (mm)	1	1	11
t_deck_long(mm)	1	1	11
t_flate_plate_keel (mm)	1	1	11
t_sheer_bar (mm)	1	1	11
t_side (mm)	1	1	11
t_side_long (mm)	1	1	11
t_side_transverse_flange (mm)	1	1	11
t_side_transverse_web (mm)	1	1	11

Dessa forma, o algoritmo evolucionário (EVO) obteve o seguinte resultado:

Tabela 28 – Primeiro, segundo e terceiro resultado Pareto para o EVO (fonte: autor)

Peso (Kg)	857.33	Peso (Kg)	845.29	Peso (Kg)	886.81
Volume de Solda (Centilitros)	462.92	Volume de Solda (Centilitros)	507.91	Volume de Solda (Centilitros)	454.57
Aprovado (sim = 0, não = 1)	0	Aprovado (sim = 0, não = 1)	0	Aprovado (sim = 0, não = 1)	0
Varição de Posição do CG (m)	0.009	Varição de Posição do CG (m)	0.039	Varição de Posição do CG (m)	0.019
Variáveis dependentes		Variáveis dependentes		Variáveis dependentes	
s(m)	0.3900	s(m)	0.3900	s(m)	0.5200
s_cost(m)	0.333	s_cost(m)	0.333	s_cost(m)	0.333
Dados de Entrada Variável		Dados de Entrada Variável		Dados de Entrada Variável	
l(m)	0.8	l(m)	1	l(m)	0.8
l_bar_keel (mm)	90	l_bar_keel (mm)	100	l_bar_keel (mm)	100
l_bar_keel_flange (mm)	30	l_bar_keel_flange (mm)	55	l_bar_keel_flange (mm)	65
l_bottom_long_flange(mm)	25	l_bottom_long_flange(mm)	15	l_bottom_long_flange(mm)	35
l_bottom_long_web(mm)	70	l_bottom_long_web(mm)	85	l_bottom_long_web(mm)	75
l_bottom_transverse_flange(mm)	65	l_bottom_transverse_flange(mm)	55	l_bottom_transverse_flange(mm)	80
l_bulk_flange(mm)	25	l_bulk_flange(mm)	5	l_bulk_flange(mm)	0
l_bulk_web(mm)	65	l_bulk_web(mm)	85	l_bulk_web(mm)	80
l_deck_long_flange(mm)	25	l_deck_long_flange(mm)	20	l_deck_long_flange(mm)	20
l_deck_long_web(mm)	55	l_deck_long_web(mm)	65	l_deck_long_web(mm)	35
l_side_long_flange (mm)	30	l_side_long_flange (mm)	60	l_side_long_flange (mm)	45
l_side_long_web (mm)	45	l_side_long_web (mm)	40	l_side_long_web (mm)	45
l_side_transverse_flange (mm)	25	l_side_transverse_flange (mm)	35	l_side_transverse_flange (mm)	25
ncl	1	ncl	1	ncl	1
nl	3	nl	3	nl	2
t_bar_keel (mm)	5	t_bar_keel (mm)	6.35	t_bar_keel (mm)	5
t_bar_keel_flange (mm)	5	t_bar_keel_flange (mm)	4.76	t_bar_keel_flange (mm)	5
t_bottom(mm)	4.76	t_bottom(mm)	5	t_bottom(mm)	5
t_bottom_long (mm)	4	t_bottom_long (mm)	4	t_bottom_long (mm)	4
t_bottom_transverse (mm)	4.76	t_bottom_transverse (mm)	6	t_bottom_transverse (mm)	4.76
t_bottom_transverse_flange(mm)	6	t_bottom_transverse_flange(mm)	6.35	t_bottom_transverse_flange(mm)	6.35
t_bulk_long(mm)	4	t_bulk_long(mm)	4.76	t_bulk_long(mm)	4.76
t_bulkhead(mm)	4	t_bulkhead(mm)	4	t_bulkhead(mm)	4
t_deck (mm)	3	t_deck (mm)	3	t_deck (mm)	4
t_deck_long(mm)	4	t_deck_long(mm)	5	t_deck_long(mm)	6
t_flate_plate_keel (mm)	6	t_flate_plate_keel (mm)	6	t_flate_plate_keel (mm)	5
t_shear_bar (mm)	7.94	t_shear_bar (mm)	4.76	t_shear_bar (mm)	6
t_side (mm)	4	t_side (mm)	4	t_side (mm)	4
t_side_long (mm)	4	t_side_long (mm)	4	t_side_long (mm)	4.76
t_side_transverse_flange (mm)	6	t_side_transverse_flange (mm)	6	t_side_transverse_flange (mm)	5
t_side_transverse_web (mm)	4	t_side_transverse_web (mm)	5	t_side_transverse_web (mm)	4

Tabela 29 - Quarto, quinto e sexto resultado Pareto para o EVO (fonte: autor)

Peso (Kg)	851.16	Peso (Kg)	841.46	Peso (Kg)	864.42
Volume de Solda (Centilitros)	470.52	Volume de Solda (Centilitros)	516.50	Volume de Solda (Centilitros)	461.73
Aprovado (sim = 0, não = 1)	0	Aprovado (sim = 0, não = 1)	0	Aprovado (sim = 0, não = 1)	0
Varição de Posição do CG (m)	0.006	Varição de Posição do CG (m)	0.038	Varição de Posição do CG (m)	0.015
Variáveis dependentes		Variáveis dependentes		Variáveis dependentes	
s(m)	0.3900	s(m)	0.3900	s(m)	0.3900
s_cost(m)	0.333	s_cost(m)	0.333	s_cost(m)	0.333
Dados de Entrada Variável		Dados de Entrada Variável		Dados de Entrada Variável	
l(m)	0.8	l(m)	1	l(m)	0.8
l_bar_keel (mm)	90	l_bar_keel (mm)	100	l_bar_keel (mm)	85
l_bar_keel_flange (mm)	45	l_bar_keel_flange (mm)	25	l_bar_keel_flange (mm)	40
l_bottom_long_flange(mm)	30	l_bottom_long_flange(mm)	35	l_bottom_long_flange(mm)	15
l_bottom_long_web(mm)	65	l_bottom_long_web(mm)	75	l_bottom_long_web(mm)	85
l_bottom_transverse_flange(mm)	55	l_bottom_transverse_flange(mm)	65	l_bottom_transverse_flange(mm)	70
l_bulk_flange(mm)	15	l_bulk_flange(mm)	15	l_bulk_flange(mm)	30
l_bulk_web(mm)	65	l_bulk_web(mm)	75	l_bulk_web(mm)	75
l_deck_long_flange(mm)	20	l_deck_long_flange(mm)	30	l_deck_long_flange(mm)	15
l_deck_long_web(mm)	50	l_deck_long_web(mm)	50	l_deck_long_web(mm)	60
l_side_long_flange (mm)	35	l_side_long_flange (mm)	50	l_side_long_flange (mm)	60
l_side_long_web (mm)	60	l_side_long_web (mm)	55	l_side_long_web (mm)	45
l_side_transverse_flange (mm)	20	l_side_transverse_flange (mm)	40	l_side_transverse_flange (mm)	10
ncl	1	ncl	1	ncl	1
nl	3	nl	3	nl	3
t_bar_keel (mm)	4.76	t_bar_keel (mm)	7.94	t_bar_keel (mm)	5
t_bar_keel_flange (mm)	5	t_bar_keel_flange (mm)	5	t_bar_keel_flange (mm)	6
t_bottom(mm)	4.76	t_bottom(mm)	4.76	t_bottom(mm)	4.76
t_bottom_long (mm)	4	t_bottom_long (mm)	4	t_bottom_long (mm)	4
t_bottom_transverse (mm)	4.76	t_bottom_transverse (mm)	6	t_bottom_transverse (mm)	4.76
t_bottom_transverse_flange(mm)	6	t_bottom_transverse_flange(mm)	6	t_bottom_transverse_flange(mm)	6.35
t_bulk_long(mm)	4	t_bulk_long(mm)	4	t_bulk_long(mm)	4
t_bulkhead(mm)	4	t_bulkhead(mm)	4	t_bulkhead(mm)	4
t_deck (mm)	3	t_deck (mm)	3	t_deck (mm)	3
t_deck_long(mm)	5	t_deck_long(mm)	4.76	t_deck_long(mm)	4
t_flate_plate_keel (mm)	6	t_flate_plate_keel (mm)	6	t_flate_plate_keel (mm)	6.35
t_shear_bar (mm)	6	t_shear_bar (mm)	7.94	t_shear_bar (mm)	6
t_side (mm)	4	t_side (mm)	4	t_side (mm)	4
t_side_long (mm)	4	t_side_long (mm)	6	t_side_long (mm)	4
t_side_transverse_flange (mm)	5	t_side_transverse_flange (mm)	6.35	t_side_transverse_flange (mm)	5
t_side_transverse_web (mm)	4	t_side_transverse_web (mm)	4	t_side_transverse_web (mm)	4

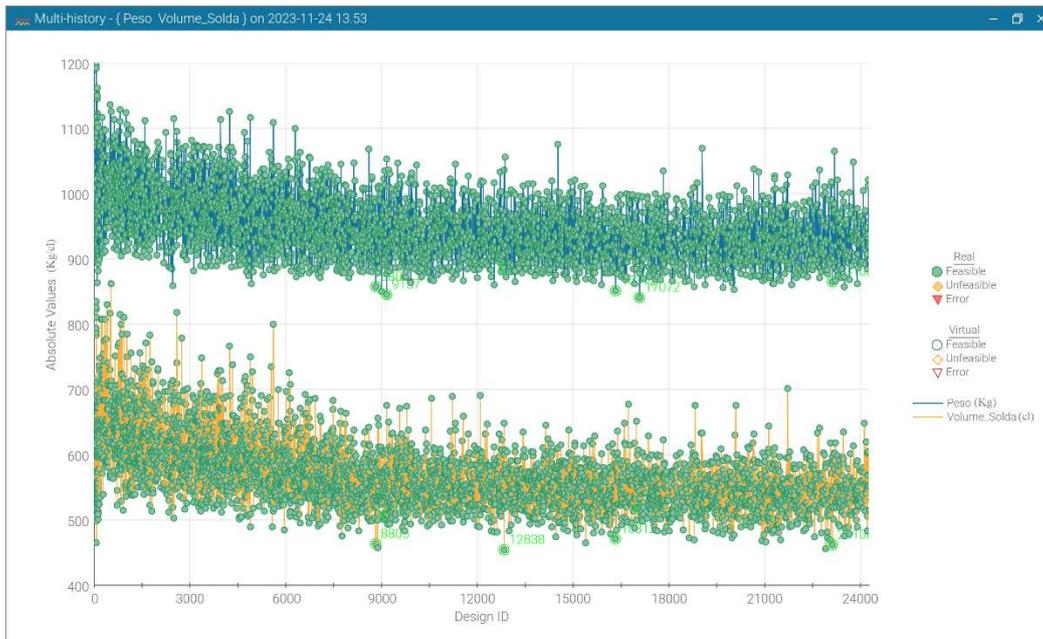


Figura 55 - Gráfico de convergência das funções objetivo do algoritmo evolucionário com uso de DOE (fonte: autor)

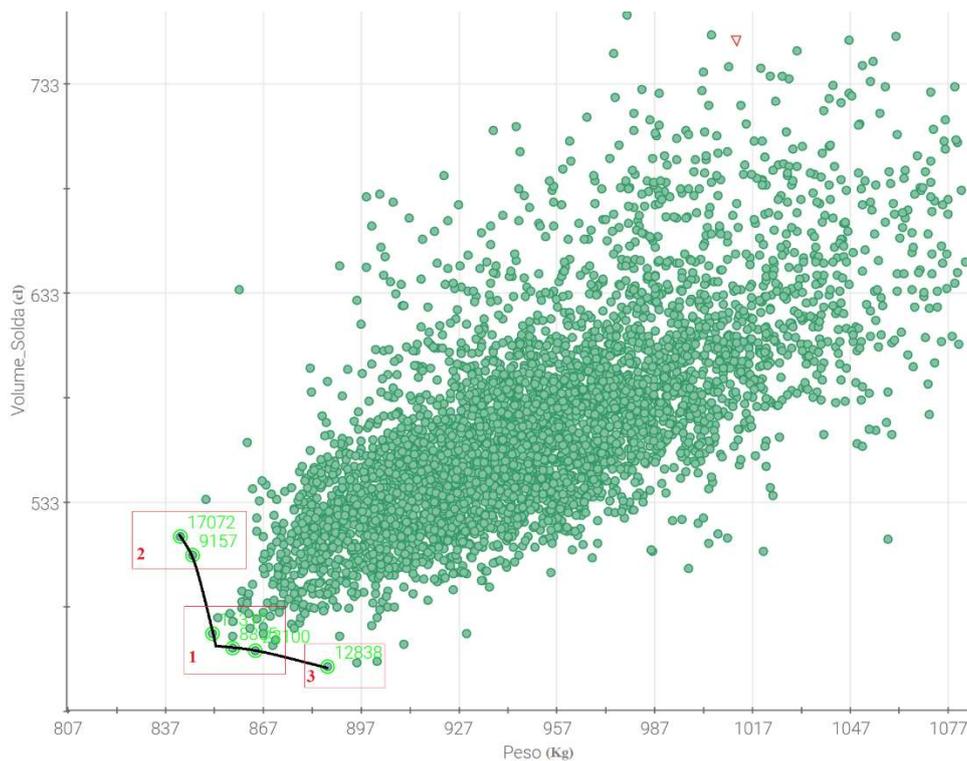


Figura 56 - Fronteira de Pareto para o Algoritmo Evolucionário (lancha original em triângulo vermelho, pontos do pareto destacados em verde claro) (fonte: autor)

A partir dos resultados da Tabela 28 e Tabela 29 é possível observar os seguintes aspectos em relação a convergência das funções objetivo e variáveis:

- As 6 soluções apresentam soluções com diferentes valores de Peso e Volume de Solda, formando assim uma fronteira Pareto.
- Apenas a variável comprimento da quilha (`l_bar_keel`) alcançou seu valor limite de 100mm, porém essa limitação foi imposta de forma a não ter estruturas com comprimento elevado.
- Minimização do Peso da solução Pareto 1: -154.5 Kg (-15%)
- Minimização do Volume de Solda de solução Pareto 1: -291.4 centilitros (-39%)
- Minimização do Peso da solução Pareto 2: -166.6 Kg (-16%)
- Minimização do Volume de Solda de solução Pareto 2: -246.4 centilitros (-33%)
- Minimização do Peso da solução Pareto 3: -125.3 Kg (-12 %)
- Minimização do Volume de Solda de solução Pareto 3: -299.72 centilitros (-40%)
- Minimização do Peso da solução Pareto 4: -161Kg (-16%)
- Minimização do Volume de Solda de solução Pareto 4: -284 centilitros (-38%)
- Minimização do Peso da solução Pareto 5: -170 Kg (-17%)
- Minimização do Volume de Solda de solução Pareto 5: -238 centilitros (-32%)
- Minimização do Peso da solução Pareto 6: -147 Kg (-15%)
- Minimização do Volume de Solda de solução Pareto 6: -293 centilitros (-39%)

Em relação a Figura 55 foi feita a seguinte análise:

- O tempo de processamento foi de 682 min
- 24269 Gerações não repetidas avaliadas

A respeito dos resultados obtidos da Figura 56 pode-se destacar os seguintes aspectos:

- O gráfico de Peso por Volume de Solda apresenta 6 soluções Pareto, o algoritmo, obteve resultados de Peso e Volume de solda menores que do projeto original.
- O gráfico foi dividido em 3 regiões:

Primeira região: representa os 3IDs centrais, nessa região não existe tendência para mais peso ou mais volume de solda, assim sendo mais próximos ao teórico utópico.

Segunda região: representa os 2 IDs localizados mais acima, nessa região há uma predominância maior na minimização do peso em detrimento ao volume de solda.

Terceira região: representa o único ID localizados mais abaixo, nessa região há uma predominância maior na minimização do volume de solda em detrimento do peso.

O algoritmo MOGA-2 obteve o seguinte resultado:

Tabela 30 - Resultado único de Pareto para o algoritmo MOGA2 (amarelo = limites inferior ou superior) (fonte: autor)

Peso (Kg)	816.08
Volume de Solda (Centilitros)	373.28
Aprovado (sim = 0, não = 1)	0
Variação de Posição do CG (m)	0.007
Variáveis dependentes	
s(m)	0.3900
s_cost(m)	0.333
Dados de Entrada Variável	
l(m)	0.8
l_bar_keel (mm)	90
l_bar_keel_flange (mm)	30
l_bottom_long_flange(mm)	0
l_bottom_long_web(mm)	75
l_bottom_transverse_flange(mm)	50
l_bulk_flange(mm)	0
l_bulk_web(mm)	75
l_deck_long_flange(mm)	15
l_deck_long_web(mm)	30
l_side_long_flange (mm)	0
l_side_long_web (mm)	40
l_side_transverse_flange (mm)	0
ncl	1
nl	3
t_bar_keel (mm)	4.76
t_bar_keel_flange (mm)	6
t_bottom(mm)	4.76
t_bottom_long (mm)	4
t_bottom_transverse (mm)	4.76
t_bottom_transverse_flange(mm)	6
t_bulk_long(mm)	4
t_bulkhead(mm)	4
t_deck (mm)	3
t_deck_long(mm)	4
t_flat_plate_keel (mm)	4.76
t_shear_bar (mm)	4
t_side (mm)	4
t_side_long (mm)	4
t_side_transverse_flange (mm)	0
t_side_transverse_web (mm)	4

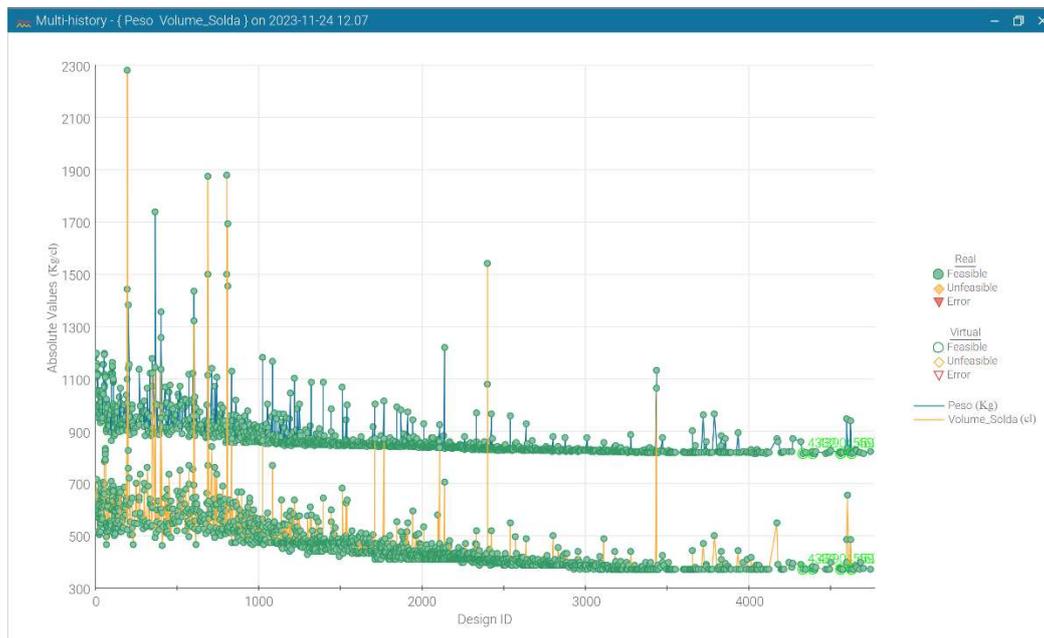


Figura 57 - Gráfico de convergência do algoritmo MOGA2 com o uso de DOE (fonte: autor)



Figura 58 - Gráfico do único ponto Pareto para o algoritmo MOGA2 (lança original em vermelho, ponto pareto em verde claro) (fonte: autor)

A partir dos resultados da Tabela 30 é possível observar os seguintes aspectos em relação a convergência das funções objetivo e variáveis:

- O algoritmo MOGA-2 apresentou apenas uma solução ótima para o Peso e Volume de Solda, assim, não formando uma fronteira Pareto.

- As seguintes variáveis tiveram seus valores igual a zero: “l_bottom_long_flange”, “l_bulk_flange”, “l_side_long_flange”, “l_side_transverse_flange” e “t_side_transverse_flange”. Esses valores representam uma solução ótima com 4 barras chatas e consequentemente um volume de solda menor. Aqui é importante esclarecer que a variável “t_side_transverse_flange” teve seu valor automaticamente mudado para zero pela planilha de cálculo, uma vez que foi escolhido o valor zero para a variável “l_side_transverse_flange”.

- Minimização do Peso da solução Pareto 1: -196 Kg (-19%)

- Minimização do Volume de Solda de solução Pareto 1: -381 centilitros (-51%)

Em relação a Figura 57 foi feita a seguinte análise:

- O tempo de processamento foi de 97 min

- 3296 Gerações não repetidas avaliadas

A respeito dos resultados obtidos da Figura 58 pode-se destacar os seguintes aspectos:

- O gráfico de Peso por Volume de Solda apresenta apenas uma solução, o algoritmo obteve resultados de Peso e Volume de solda menores que do projeto original.

- O algoritmo não procura soluções que tendem mais para minimização de volume de solda ou para a minimização do peso, focando apenas na minimização de ambas as variáveis ao mesmo tempo, assim não abrindo o leque de soluções globais possíveis a serem investigadas.

Tendo analisado os 2 algoritmos foi construída a seguinte tabela comparativa para análise:

Tabela 31 - Resultado final dos algoritmos MOGA2 e Evolucionário (fonte: autor)

	EVO										MOGA-2			
Min Peso (kg / %)	-154.5	-15%	-166.6	-16%	-125.03	-12%	-161	-16%	-170	-17%	-147	-15%	-196	-19%
Min Vol Solda (centilitros / %)	-291.4	-39%	-246.4	-33%	-299.72	-40%	-284	-38%	-238	-32%	-293	-39%	-381	-51%
Gerações	24269		24269		24269		24269		24269		24269		3296	
Tempo(min)	682		682		682		682		682		682		97	

A partir dos resultados obtidos, pode-se enfatizar os seguintes pontos:

- O algoritmo Evolucionário obteve uma minimização de Peso máxima (solução 5) de -170kg (-17%) em relação ao projeto original, já em relação ao Volume de Solda, obteve uma minimização máxima (solução 3) de -299.72 cl (-40%). É importante observar que esses resultados pertencem a diferentes soluções Pareto. Comparando-se o resultado obtido sem o uso dos DOEs (Tabela 22), percebe-se que não houve melhora no resultado usando os DOEs, inclusive houve um resultado pior em todos os casos, sendo a única exceção a solução 3 que obteve o mesmo resultado da minimização de volume de solda.

- O algoritmo MOGA-2 obteve uma minimização de Peso de -196 kg (-19%) em relação ao projeto original, já em relação ao Volume de Solda, obteve uma minimização de -381 cl (-51%). Comparando o resultado obtido sem o uso dos DOEs (Tabela 22), percebe-se uma minimização de peso de -11% a mais. Em relação ao volume de solda percebe-se uma minimização de -7% a mais. Portanto conclui-se que os DOEs foram fundamentais para a melhora do resultado desse algoritmo.

- Comparando-se os 2 resultados obtidos pelos algoritmos, percebe-se que o algoritmo MOGA-2 possui tanto valores de Peso como Volume de Solda menores, por isso foi escolhido como solução única final.

- Comparando-se o melhor resultado do algoritmo Evolucionário sem uso do DOE (Tabela 22), com o melhor resultado do algoritmo MOGA-2 com o uso do DOE (Tabela 31), percebe-se que o Evolucionário (EVO) obteve uma menor redução de peso (-18%) e uma menor redução de volume de solda (-40%) quando comparado ao resultado obtido pelo MOGA-2 (Peso, -19% e Volume de Solda, - 51%). Entretanto, o resultado inicial do Evolucionário (EVO) já pode ser considerado suficiente bom quando se não tem tempo nem mão de obra necessária para se fazer um estudo aprofundado como o que foi feito nesse trabalho, tendo em vista o alto tempo necessário para executar os 60 modelos.

4.4 Análise das variáveis e restrições da solução final ótima

As variações dos limites das variáveis usadas na solução final ótima obtida pelo algoritmo MOGA-2 precisam ser estudadas de forma a compreender se esses limites restringiram a solução ótima obtida. Para atingir esse objetivo, foram feitos gráficos mostrando o valor das variáveis ao longo da simulação e também sua distribuição percentual, também foram traçados os limites máximos e mínimos das variáveis. Os resultados podem ser observados abaixo:

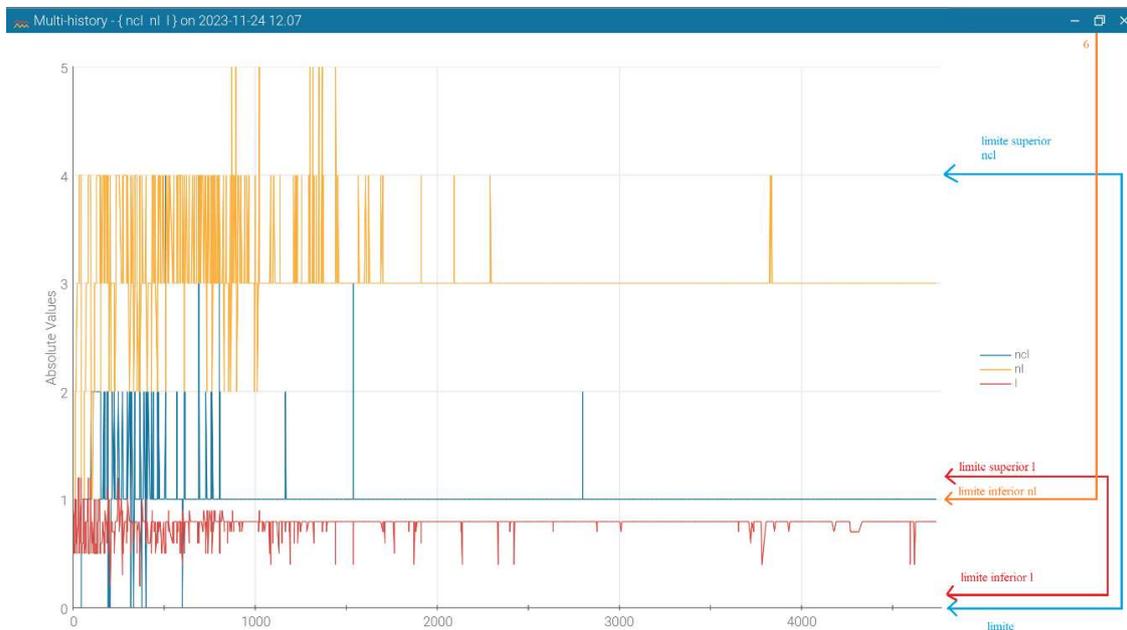


Figura 59 - gráfico com a convergência das variáveis ncl, nl e l (fonte: autor)

	0	1	2	3	4	5	6					
ncl	3.4%	91.1%	5.3%	0.1%	0.2%	-	-					
nl	-	2.3%	3.1%	83.5%	10.6%	0.5%	0.0%					
	0.1m	0.2m	0.3m	0.4m	0.5m	0.6m	0.7m	0.8m	0.9m	1.0m	1.1m	1.2m
l(m)	0.0%	0.1%	0.1%	0.7%	4.0%	4.1%	3.4%	83.7%	1.2%	2.1%	0.1%	0.5%

Figura 60 - Distribuição percentual das variáveis ncl, nl e l (fonte: autor)

A respeito dos resultados obtidos na Figura 59 e Figura 60, pode-se destacar os seguintes aspectos:

- Variável **ncl**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 1 e 2 (96.4%), que são valores que não são limites máximos (4) ou mínimos (0). Existem poucas soluções iniciais (todas antes da geração 1000) que alcançam valores mínimos e máximos (3.6%), porém são valores iniciais onde a minimização do peso e volume de solda são menores.

- Variável **nl**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 2 e 4 (97.2%), que são valores que não são limites máximos (6) ou mínimos (1). Existem poucas soluções iniciais (antes da geração 500) que alcançam valores mínimos (2.3%), porém são valores iniciais onde a minimização do peso e volume de solda são menores.

- Variável **l**: tem distribuição mais concentrada entre valores de 0.5m até 0.8m (95.2%), que são valores que não são limites máximos (1.2m) ou mínimos (0.1m). O valor mínimo não é alcançado nas soluções e o valor máximo é apenas atingido em 0.5% das soluções (antes da geração 500), porém são valores iniciais onde a minimização do peso e volume de solda são menores.

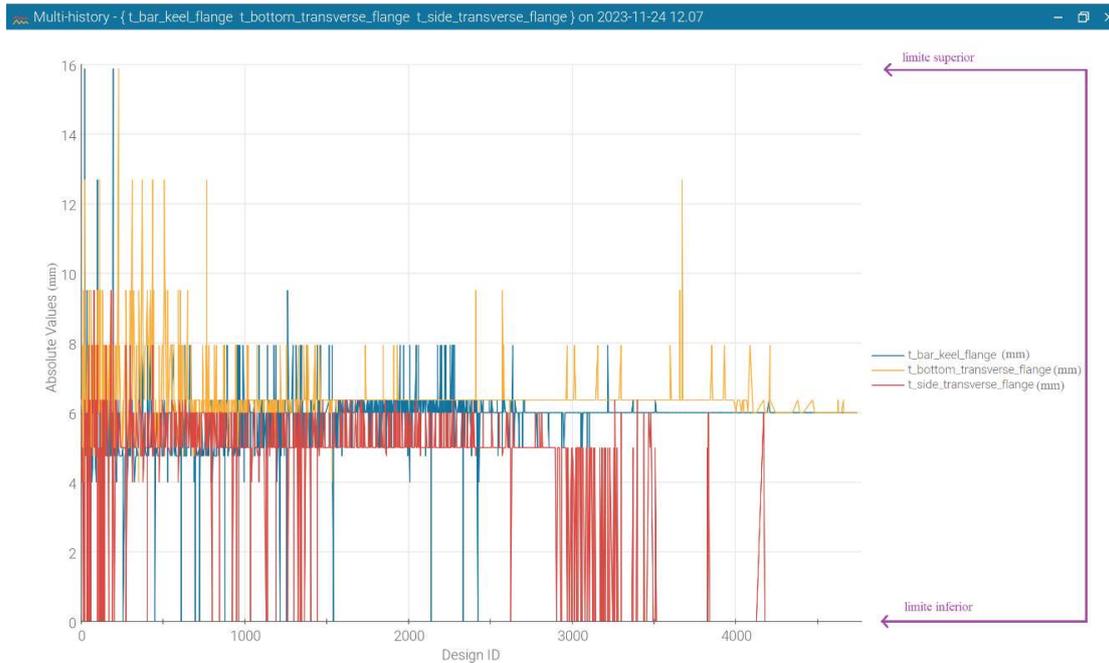


Figura 61 - gráfico com a convergência da espessura dos flanges (fonte: autor)

	0mm	2.5mm	3.0mm	4.0mm	4.76mm	5.0mm	6.0mm	6.35mm	7.94mm	9.53mm	12.7mm	15.87mm
t_bar_keel_flange(mm)	0.9%	0.0%	0.0%	1.8%	8.2%	15.9%	49.3%	19.5%	4.0%	0.2%	0.1%	0.1%
t_bottom_transverse_flange(mm)	0.2%	0.0%	0.0%	0.3%	0.5%	3.7%	12.1%	73.4%	7.1%	2.2%	0.5%	0.1%
t_side_transverse_flange(mm)	16.0%	0.0%	0.0%	1.3%	2.8%	59.4%	16.8%	3.1%	0.5%	0.2%	0.0%	0.0%

Figura 62 - Distribuição percentual dos das espessuras dos flanges (fonte: autor)

A respeito dos resultados obtidos na Figura 61 e Figura 62, pode-se destacar os seguintes aspectos:

- Variável **t_bar_keel_flange**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.76mm e 7.94mm (96.9 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm). O limite mínimo é alcançado por 0.9% das soluções, e ele representa as barras chatas nesse caso. Percebe-se que mesmo depois da geração 1000, o algoritmo ainda tenta soluções bem variadas.

- Variável **t_bottom_transverse_flange**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 5.0mm e 7.94mm (96.3 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm). O limite mínimo é alcançado por 0.2% das soluções, e ele representa as barras chatas nesse caso. Percebe-se que mesmo depois da geração 1000, o algoritmo ainda tenta soluções bem variadas.

- Variável **t_side_transverse_flange**: O limite mínimo é alcançado por 16.0% das soluções, e ele representa as barras chatas nesse caso. Percebe-se que não existe nesse caso uma concentração de resultados em uma faixa de valores. Também é importante

ressaltar que mesmo depois da geração 1000, o algoritmo ainda tenta soluções bem variadas.

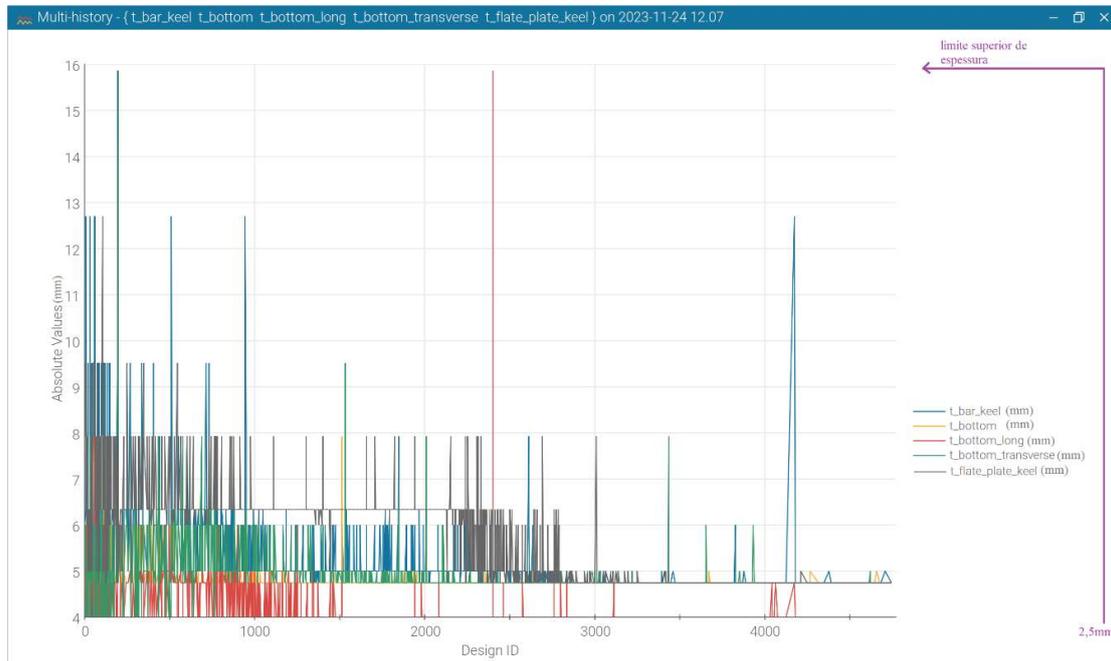


Figura 63 - Gráfico de convergência da espessura de elementos estruturais do fundo (fonte: autor)

	2.5mm	3.0mm	4.0mm	4.76mm	5.0mm	6.0mm	6.35mm	7.94mm	9.53mm	12.7mm	15.87mm
t_bar_keel (mm)	0.0%	0.0%	0.7%	24.1%	54.5%	11.3%	4.8%	1.9%	1.7%	0.9%	0.1%
t_bottom (mm)	0.0%	0.0%	0.0%	87.6%	7.5%	2.4%	0.1%	2.5%	0.0%	0.0%	0.0%
t_bottom_long (mm)	0.0%	0.0%	78.6%	12.4%	7.1%	1.0%	0.4%	0.4%	0.0%	0.0%	0.1%
t_bottom_transverse(mm)	0.0%	0.0%	4.7%	57.2%	26.6%	7.6%	2.9%	0.7%	0.1%	0.0%	0.1%
t_flate_plate_keel(mm)	0.0%	0.0%	0.0%	22.1%	9.2%	5.0%	55.2%	7.0%	1.3%	0.2%	0.0%

Figura 64 - Distribuição percentual dos das espessuras de elementos estruturais do fundo (fonte: autor)

A respeito dos resultados obtidos na Figura 63 e Figura 64, pode-se destacar os seguintes aspectos:

- Variável **t_bar_keel**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.76mm e 7.94mm (96.6 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm) ou mínimos (2.5mm). O limite mínimo não foi alcançado. O limite máximo é alcançado por apenas 0.1% das soluções, o que pode ser considerado irrelevante.

- Variável **t_bottom**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.76mm e 6.00mm (97.5 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm) ou mínimos (2.5mm). Nem o limite mínimo nem o máximo é alcançado nesse caso.

- Variável **t_bottom_long**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.0mm e 5.0mm (98.1 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm)

ou mínimos (2.5mm). O limite mínimo não é alcançado. O limite máximo é alcançado por apenas 0.1% das soluções, o que pode ser considerado irrelevante.

- Variável **t_bottom_transverse**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.0mm e 6.0mm (96.1 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm) ou mínimos (2.5mm). O limite mínimo não foi alcançado. O limite máximo é alcançado por apenas 0.1% das soluções, o que pode ser considerado irrelevante.

- Variável **t_flat_plate_keel**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.76mm e 7.94mm (98.5 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm) ou mínimos (2.5mm). Nem o limite mínimo nem o máximo é alcançado nesse caso.

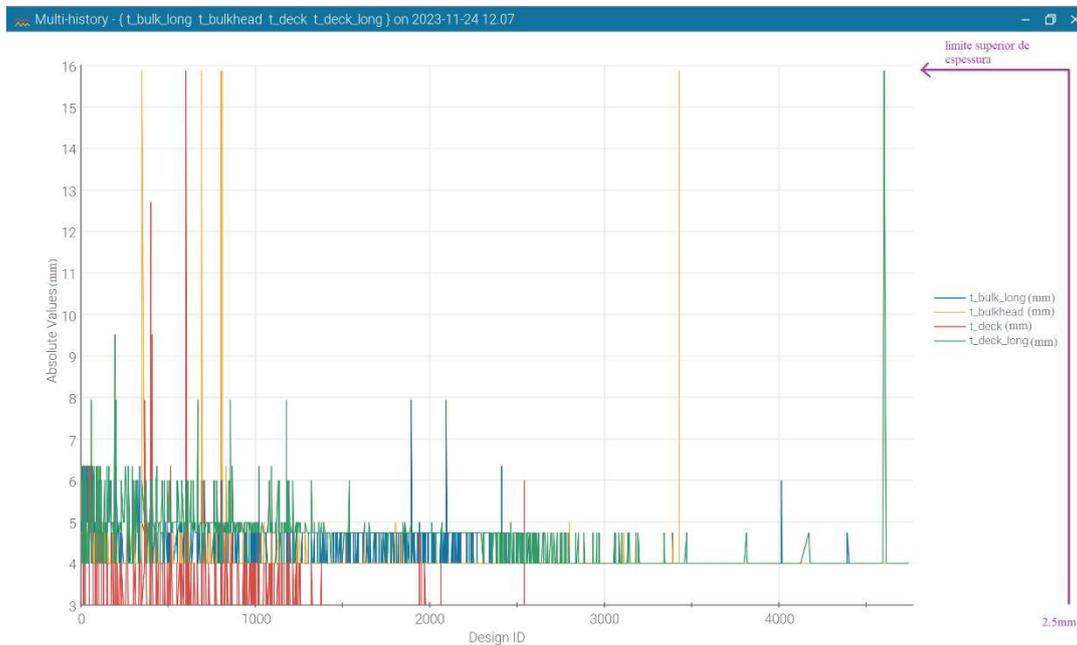


Figura 65 - Gráfico de convergência da espessura de elementos estruturais do convés e das anteparas (fonte: autor)

	2.5mm	3.0mm	4.0mm	4.76mm	5.0mm	6.0mm	6.35mm	7.94mm	9.53mm	12.7mm	15.87mm
t_bulk_long (mm)	0.0%	0.0%	75.7%	15.1%	5.6%	0.8%	2.4%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%
t_bulkhead (mm)	0.0%	0.0%	93.0%	4.4%	2.2%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%
t_deck (mm)	0.0%	89.3%	6.5%	2.3%	0.8%	0.4%	0.4%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
t_deck_long (mm)	0.0%	0.0%	27.9%	52.0%	14.2%	3.8%	1.6%	0.3%	0.1%	0.0%	0.1%

Figura 66 - Distribuição percentual dos das espessuras de elementos estruturais do convés e das anteparas (fonte: autor)

A respeito dos resultados obtidos na Figura 65 e Figura 66, pode-se destacar os seguintes aspectos:

- Variável **t_bulk_long**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.00mm e 5.00mm (96.4%), que são valores que não são limites máximos (15.87mm) ou mínimos (2.5mm). O limite mínimo e o limite máximo não foram alcançados.

- Variável **t_bulkhead**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.00mm e 4.76mm (97.4 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm) ou mínimos (2.5mm). O limite mínimo não foi alcançado. O limite máximo é alcançado por apenas 0.3% das soluções, o que pode ser considerado irrelevante.

- Variável **t_deck**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 3.0mm e 4.0mm (95.8 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm) ou mínimos (2.5mm). O limite mínimo não foi alcançado. O limite máximo é alcançado por apenas 0.1% das soluções, o que pode ser considerado irrelevante.

- Variável **t_deck_long**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.0mm e 6.0mm (97.9 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm) ou mínimos (2.5mm). O limite mínimo não foi alcançado. O limite máximo é alcançado por apenas 0.1% das soluções, o que pode ser considerado irrelevante.

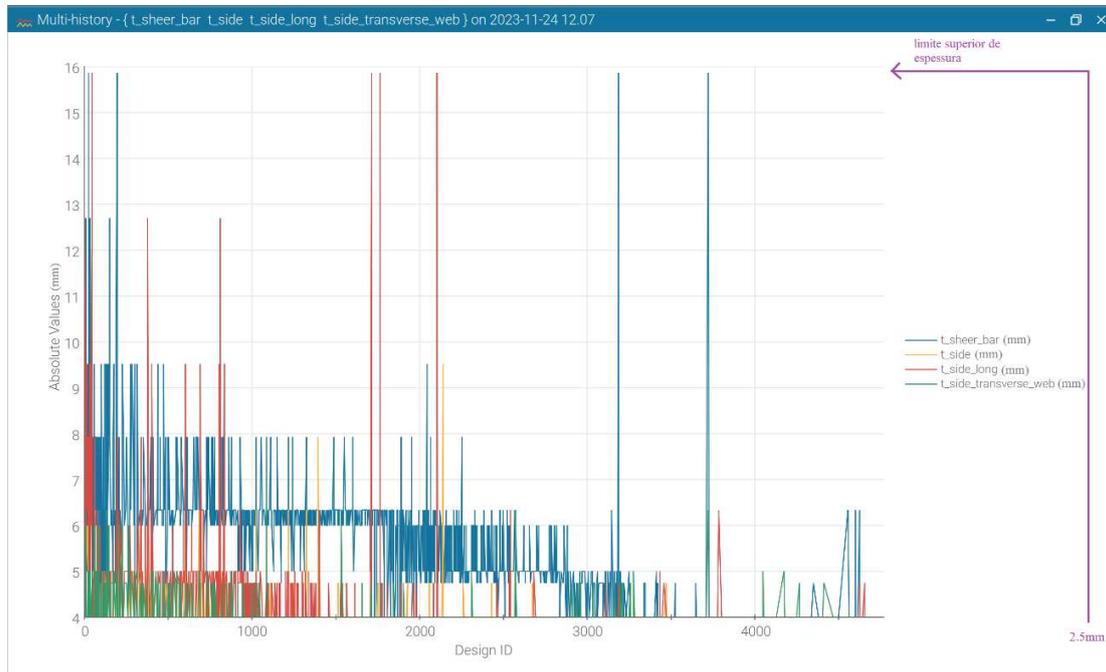


Figura 67 - Gráfico de convergência da espessura de elementos estruturais do costado (fonte: autor)

	2.5mm	3.0mm	4.0mm	4.76mm	5.0mm	6.0mm	6.35mm	7.94mm	9.53mm	12.7mm	15.87mm
t_sheer_bar (mm)	0.0%	0.0%	14.1%	8.6%	20.7%	20.6%	27.4%	5.6%	2.3%	0.4%	0.4%
t_side (mm)	0.0%	0.0%	92.2%	2.6%	1.7%	3.0%	0.4%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%
t_side_long (mm)	0.0%	0.0%	75.2%	9.6%	10.1%	1.5%	1.3%	1.0%	0.7%	0.4%	0.3%
t_side_transverse_web(mm)	0.0%	0.0%	90.8%	5.3%	2.5%	1.0%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%

Figura 68 - Distribuição percentual das espessuras de elementos estruturais do costado (fonte: autor)

A respeito dos resultados obtidos na Figura 67 e Figura 68, pode-se destacar os seguintes aspectos:

- Variável **t_sheer_bar**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.00mm e 7.94mm (97%), que são valores que não são limites máximos (15.87mm) ou mínimos (2.5mm). O limite mínimo não foi alcançado. O limite máximo é alcançado por apenas 0.4% das soluções, o que pode ser considerado irrelevante.

- Variável **t_side**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.00mm e 5.00mm (96.5 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm) ou mínimos (2.5mm). O limite mínimo e o limite máximo não foram alcançados.

- Variável **t_side_long**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.0mm e 6.0mm (96.4 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm) ou mínimos (2.5mm). O limite mínimo não foi alcançado. O limite máximo é alcançado por apenas 0.3% das soluções, o que pode ser considerado irrelevante.

- Variável **t_side_transverse_web**: a maior parte das soluções ficam restritas a valores entre 4.0mm e 4.76mm (96.1 %), que são valores que não são limites máximos (15.87mm) ou mínimos (2.5mm). O limite mínimo e o limite máximo não foram alcançados.

Tendo avaliado os limites máximos e mínimos das variáveis usadas na solução final ótima obtida pelo algoritmo MOGA-2, concluiu-se que os limites não restringiram a obtenção da solução final da otimização.

A seguir foi proposto um estudo para avaliar qual restrição de projeto alcançou o seu limite na solução ótima final, as seguintes restrições foram usadas no otimizador:

- Espessura mínima da chapa do deque (t_min_deck_plating)
- Espessura mínima da chapa do costado (t_min_side_plating)
- Espessura mínima da chapa do fundo (t_min_bottom_plating)
- Espessura mínima da chapa da quilha (t_min_flate_plate_keel)
- Espessura mínima da chapa da antepara (t_min_bulkhead)

- Espessura mínima devido à pressão lateral na chapa do deque
($t_{min_lat_pres_deck_plating}$)
- Espessura mínima devido à pressão lateral na chapa do costado
($t_{min_lat_pres_side_plating}$)
- Espessura mínima devido à pressão lateral na chapa da antepara
($t_{min_lat_pres_bulkhead}$)
- Espessura mínima devido à pressão do slamming na chapa do fundo
($t_{min_slam_bottom}$)
- Espessura mínima devido à pressão do slamming na chapa da quilha
($t_{min_slam_flange_plate_keel}$)
- Espessura mínima do reforçador do costado ($t_{min_side_long}$)
- Espessura mínima do reforçador do fundo ($t_{min_bottom_long}$)
- Espessura mínima na alma da quilha ($t_{min_bar_keel}$)
- Espessura mínima no flange da quilha ($t_{min_bar_keel_flange}$)
- Espessura mínima da alma da hastilha ($t_{min_bottom_transverse}$)
- Espessura mínima do flange da hastilha ($t_{min_bottom_transverse_flange}$)
- Espessura mínima da alma da caverna ($t_{min_side_transverse_web}$)
- Espessura mínima do flange da caverna ($t_{min_side_transverse_flange}$)
- Espessura mínima da barra de reforço do deque ($t_{min_sheer_bar}$)
- Espessura mínima do reforçador da antepara ($t_{min_bulk_long}$)
- Espessura mínima do reforçador do deque ($t_{min_deck_long}$)
- Módulo de seção mínimo do reforçador do costado devido à pressão lateral
($Z_{min_lat_pres_side_long}$)
- Módulo de seção mínimo da caverna devido à pressão lateral
($Z_{min_lat_pres_side_transverse}$)
- Módulo de seção mínimo do reforçador da antepara devido à pressão lateral
($Z_{min_lat_pres_bulk_long}$)
- Módulo de seção mínimo do reforçador do deque devido à pressão lateral
($Z_{min_lat_pres_deck_long}$)
- Módulo de seção mínimo do reforçador do fundo devido à pressão de slamming ($Z_{min_slam_bottom_long}$)
- Módulo de seção mínimo da quilha devido à pressão de slamming
($Z_{min_slam_bar_keel}$)

- Módulo de seção mínimo da hastilha devido à pressão de slamming
($Z_{min_slam_bottom_transverse}$)
- Módulo de seção mínimo do reforçador da antepara devido à pressão de slamming ($Z_{min_slam_bulkhead_long}$)
- Módulo de seção mínimo da caverna devido à pressão de slamming
($Z_{min_slam_side_transverse}$)
- Tensão limite de flambagem do deque ($\sigma_{buck_Deck_Plating}$)
- Tensão limite de flambagem do costado ($\sigma_{buck_Side_Plating}$)
- Tensão limite de flambagem do fundo ($\sigma_{buck_Bottom_Plating}$)
- Tensão limite de flambagem da chapa da quilha ($\sigma_{buck_Flat_Plate_Keel}$)
- Tensão limite de flambagem da antepara ($\sigma_{buck_bulkhead}$)
- Tensão limite de flambagem da longitudinal do costado ($\sigma_{buck_Side_Long}$)
- Tensão limite de flambagem da caverna ($\sigma_{buck_Side_Transverse}$)
- Tensão limite de flambagem do reforçador do fundo ($\sigma_{buck_bottom_long}$)
- Tensão limite de flambagem do reforço do deque ($\sigma_{buck_sheer_bar}$)
- Tensão limite de flambagem da quilha ($\sigma_{buck_bar_keel}$)
- Tensão limite de flambagem da hastilha ($\sigma_{buck_bottom_transverse}$)
- Tensão limite de flambagem do reforçador do deque ($\sigma_{buck_deck_long}$)
- Tensão limite de flambagem do reforçador da antepara ($\sigma_{buck_bulk_long}$)
- Tensão de cisalhamento da viga navio devido ao máximo momento fletor de projeto (Tensão de cisalhamento)
- Tensão axial máxima devido ao recuo ou avanço da embarcação ou *Surge*
(Tensão Axial)
- Módulo de seção requerido devido ao momento fletor máximo (Módulo de seção)

Para se estabelecer quando o limite da restrição é alcançado, foi estabelecido uma margem de 10 % do valor limite da restrição, tanto para baixo (no caso de limites superiores ficando $\%req < 90\%$) quanto para cima (quando no caso de limites inferiores ficando $\%req > 110\%$), os valores que atingiram essa margem foram marcados em amarelo, os outros valores que não alcançaram essa margem foram marcados em verde, o resultado é apresentado na Tabela 32:

Restrições				
Restrição	Valor Restrição	Valor otimizado	% (otim/rest)	%req
t_min_deck_plating (mm)	2.9	3	103.45%	>110%
t_min_side_plating (mm)	4.0	4	100.00%	>110%
t_min_bottom_plating(mm)	4.7	4.76	101.28%	>110%
t_min_flate_plate_keel (mm)	4.7	4.76	101.28%	>110%
t_min_bulkhead (mm)	3.5	4	114.29%	>110%
t_min_lat_pres_deck_plating (mm)	1.63	3	184.29%	>110%
t_min_lat_pres_side_plating (mm)	1.58	4	252.40%	>110%
t_min_lat_pres_bulkhead (mm)	1.68	4	238.26%	>110%
t_min_slam_bottom (mm)	3.85	4.76	123.74%	>110%
t_min_slam_flate_plate_keel (mm)	3.85	4.76	123.74%	>110%
t_min_side_long (mm)	3.13	4.00	127.64%	>110%
t_min_bottom_long (mm)	3.20	4.00	124.98%	>110%
t_min_bar_keel (mm)	3.33	4.76	142.76%	>110%
t_min_bar_keel_flange (mm)	3.33	6.00	179.95%	>110%
t_min_bottom_transverse(mm)	3.33	4.76	142.76%	>110%
t_min_bottom_transverse_flange(mm)	3.33	6.00	179.95%	>110%
t_min_side_transverse_web(mm)	3.13	4.00	127.64%	>110%
t_min_side_transverse_flange(mm)	0.00	0.00	127.64%	>110%
t_min_sheer_bar(mm)	3.13	4.00	127.64%	>110%
t_min_bulk_long(mm)	3.13	4.00	127.64%	>110%
t_min_deck_long(mm)	3.13	4.00	127.64%	>110%
Z_min_lat_pres_side_long (cm^3)	1.04	1.07	102.91%	>110%
Z_min_lat_pres_side_transverse (cm^3)	2.44	24.07	986.61%	>110%
Z_min_lat_pres_bulk_long (cm^3)	1.79	3.75	210.06%	>110%
Z_min_lat_pres_deck_long (cm^3)	0.93	1.00	106.95%	>110%
Z_min_slam_bottom_long (cm^3)	3.68	3.75	101.80%	>110%
Z_min_slam_bar_keel (cm^3)	9.62	9.83	102.11%	>110%
Z_min_slam_bottom_transverse (cm^3)	59.73	60.03	100.50%	>110%
Z_min_slam_bulkhead_long (cm^3)	3.68	3.75	101.80%	>110%
Z_min_slam_side_transverse (cm^3)	8.01	26.67	332.88%	>110%
Módulo de seção (cm^3)	433.22	5754.461731	1328.29%	>110%
σ buck_Deck_Plating (MPa)	14.70	9.99	67.96%	<90%
σ buck_Side_Plating (MPa)	35.84	8.93	24.92%	<90%
σ buck_Bottom_Plating (MPa)	37.00	5.70	15.40%	<90%
σ buck_Flat_Plate_Keel (MPa)	9.25	5.13	55.43%	<90%
σ buck_bulkhead (MPa)	26.13	11.10	42.47%	<90%
σ buck_Side_Long (MPa)	361.92	9.99	2.76%	<90%
σ buck_Side_Transverse (MPa)	469.58	9.99	2.13%	<90%
σ buck_bottom_long (MPa)	326.36	5.70	1.75%	<90%
σ buck_sheer_bar (MPa)	185.96	5.70	3.06%	<90%
σ buck_bar_keel (MPa)	1143.90	5.13	0.45%	<90%
σ buck_bottom_transverse (MPa)	98.17	5.13	5.22%	<90%
σ buck_deck_long (MPa)	92.28	9.99	10.82%	<90%
σ buck_bulk_long (MPa)	13.06	11.10	85.00%	<90%
Tensão de cisalhamento (MPa)	195	1.19	0.61%	<90%
Tensão Axial (MPa)	195	0.46	0.24%	<90%

Tabela 32 – Restrições do projeto otimizado (fonte: autor)

A respeito dos limites alcançados na Tabela 32, pode-se destacar os seguintes aspectos:

- **t_min_deck_plating:** o valor mínimo de espessura de chapa de 3mm é alcançado na solução final. O valor da restrição no caso é 2.9mm. É importante lembrar que a outra variável “Tensão limite de flambagem do deque” ($\sigma_{\text{buck_Deck_Plating}}$) tem seu valor de 9.99Mpa, que é perto do valor limite de 14.70MPa, portanto a limitação da espessura de 3mm é suficiente para resistir a essa tensão.

- **t_min_side_plating:** o valor mínimo de espessura de chapa de 4mm é alcançado na solução final. Esse limite também foi alcançado pelo projeto original, não tendo mudança nessa espessura no projeto otimizado. Vale mencionar que a outra variável “Tensão limite de flambagem do chapa do costado” ($\sigma_{\text{buck_Side_Plating}}$) tem seu valor de 8.93Mpa, que é longe do valor limite de 35.84MPa, portanto a espessura mínima da regra é o único limitante a espessura do costado, uma vez que os esforços na viga navio permanecem bem distantes dos limites.

- **t_min_bottom_plating:** o valor mínimo de espessura de chapa de 4.76mm é alcançado na solução final. O valor da restrição no caso é 4.7mm. É importante lembrar que a outra variável “Tensão limite de flambagem do fundo” ($\sigma_{\text{buck_Bottom_Plating}}$) tem seu valor de 5.7Mpa, que é longe do valor limite de 37MPa, portanto a limitação da espessura de 4.76mm é suficiente para resistir a essa tensão.

- **t_min_flate_plate_keel:** o valor mínimo de espessura de chapa de 4.76mm é alcançado na solução final. O valor da restrição no caso é 4.7mm. É importante lembrar que a outra variável “Tensão limite de flambagem do fundo” ($\sigma_{\text{buck_Bottom_Plating}}$) tem seu valor de 5.13Mpa, que é perto do valor limite de 9.25MPa, portanto a limitação da espessura de 4.76mm é suficiente para resistir a essa tensão.

- **Z_min_lat_pres_side_long:** o valor mínimo do módulo de seção de 1.07 cm³ é alcançado na solução final. O valor da restrição para esse reforçador de costado é 1.04 cm³. É importante lembrar que a outra variável relacionada chamada “Espessura mínima do reforçador do costado” ($t_{\text{min_side_long}}$) obtém o valor de 4mm, que é perto do valor limite de 3.13mm. Assim, módulo de seção mínima da regra é o único limitante das dimensões do reforçador de costado em formato de barra chata.

- **Z_min_lat_pres_deck_long:** o valor mínimo do módulo de seção de 1.00 cm³ é alcançado na solução final. O valor da restrição para esse reforçador de costado é 0.93 cm³. É importante lembrar que a outra variável relacionada chamada “Espessura mínima do reforçador do deque” ($t_{\text{min_deck_long}}$) obtém o valor de 4mm, que é perto do valor

limite de 3.13mm. Assim, módulo de seção mínima da regra é o único limitante das dimensões do reforçador de deque.

- **Z_min_slam_bottom_long:** o valor mínimo do módulo de seção de 3.75 cm³ é alcançado na solução final. O valor da restrição para esse reforçador de costado é 3.68 cm³. É importante lembrar que a outra variável relacionada chamada “Espessura mínima do reforçador do fundo” (t_min_bottom_long) obtém o valor de 4mm, que é perto do valor limite de 3.20mm. Assim, módulo de seção mínima da regra é o único limitante das dimensões do reforçador de fundo em formato de barra chata.

- **Z_min_slam_bar_keel:** o valor mínimo do módulo de seção de 9.83 cm³ é alcançado na solução final. O valor da restrição para esse reforçador de costado é 9.62 cm³. É importante lembrar que duas outras variáveis relacionadas chamadas de “Espessura mínima na alma da quilha” (t_min_bar_keel) e Espessura mínima no flange da quilha (t_min_bar_keel_flange) obtém valores de 4.76mm e 6.00mm respectivamente, que tem certa distância do valor mínimo de 3.33mm. Assim, módulo de seção mínima da regra é o único limitante das dimensões da quilha.

- **Z_min_slam_bottom_transverse:** o valor mínimo do módulo de seção de 60.03 cm³ é alcançado na solução final. O valor da restrição para esse reforçador de costado é 59.73 cm³. É importante lembrar que duas outras variáveis relacionadas chamadas de “Espessura mínima da alma da hastilha” (t_min_bottom_transverse) e Espessura mínima do flange da hastilha (t_min_bottom_transverse_flange) obtém valores de 4.76mm e 6.00 respectivamente, que tem certa distância do valor mínimo de 3.33mm. Assim, módulo de seção mínima da regra é o único limitante das dimensões da hastilha.

- **Z_min_slam_bulkhead_long:** o valor mínimo do módulo de seção de 3.75 cm³ é alcançado na solução final. O valor da restrição para esse reforçador da antepara é 3.68 cm³. É importante lembrar que a outra variável relacionada chamada “Espessura mínima do reforçador da antepara” (t_min_bulk_long) obtém o valor de 4mm, que é perto do valor limite de 3.13mm. Assim, o módulo de seção mínima da regra é o único limitante das dimensões do reforçador da antepara.

4.5 Comparativo da seção mestra da lancha original e otimizada

Para uma melhor visualização da otimização, foi proposta uma comparação dos valores dos elementos estruturais mostrados na seção mestra da embarcação original com a dos mesmos na seção mestra otimizada pelo MOGA-2 usando DOEs (Figura 69).

A metodologia utilizada possui as seguintes limitações já anteriormente citadas:

- Os modelos existentes de otimização são: paramétrico, de forma e topológica, o trabalho proposto usa apenas a paramétrica.

- A otimização leva apenas em conta regra de sociedade classificadora que é bem conservador, portanto, não seria a solução mais leve e barata para resistir a realidade. Porém, é comum na engenharia usar regras de sociedades classificadoras.

- O método usa avaliação determinística da regra, não levando em consideração incerteza da carga ou espessura.

- Não foi incluído custos de imperfeições na fabricação.

- O método não limita espessuras que seriam difíceis de soldar como a de 3mm, deixando por conta da espessura mínima da regra a avaliação desse valor.

- O método não considera as dificuldades inerentes de cada tipo e região de solda.

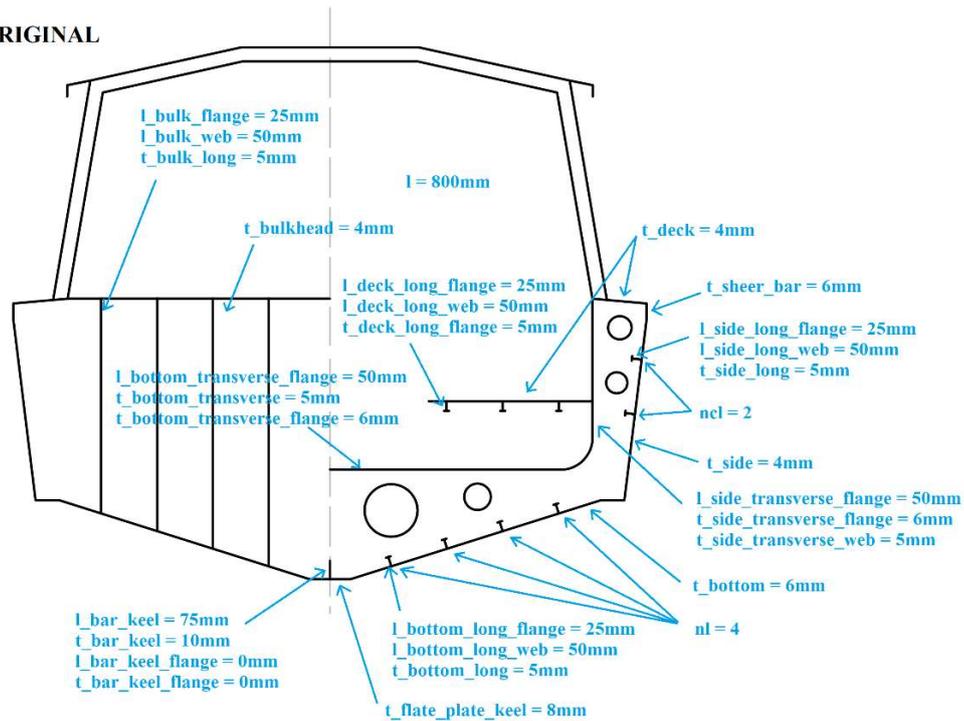
- Elementos estruturais da seção mestra (ou da região que possui maior carregamento da regra) são usados para representar elementos estruturais de toda a embarcação, essa foi uma simplificação necessária para reduzir o grande número de variáveis, porém foi contrário a melhor otimização estrutural.

- Não é testado a resistência última do modelo otimizado nem da lancha original usando o método dos elementos finitos.

- Foi usado um *bracket* de 75mm na longitudinal do fundo e na longitudinal da antepara para que a lancha original fosse aprovada pelos requisitos estruturais da regra, esses *bracket* foram mantidos no modelo de otimização.

Os valores das variáveis na Figura 69 foram destacadas em três cores diferentes para facilitar a visualização das alterações dos valores do projeto original: as variáveis que não sofreram mudanças ficaram na cor azul, as variáveis que tiveram seus valores reduzidos foram destacadas em verde e as variáveis que tiveram seus valores aumentados foram destacados em vermelho.

ORIGINAL



OTIMIZADA

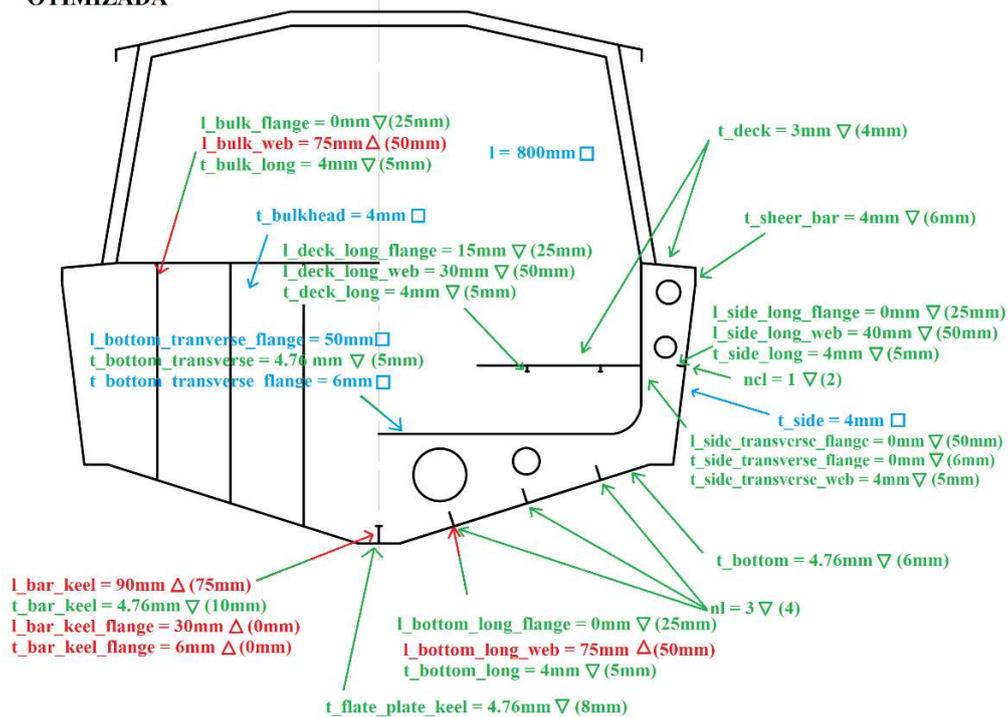


Figura 69 - medidas dos elementos estruturais na seção mestra original e otimizada (fonte: autor)

Em relação aos valores das variáveis apresentados na Figura 69, pode-se destacar os seguintes aspectos:

- **l_bottom_long_flange:** obteve um valor final de 0 mm (-100% em relação ao original). Existe a preferência de usar a barra chata nesse caso, de forma a minimizar o volume de solda.

- **l_side_long_flange:** obteve um valor final de 0 mm (-100% em relação ao original).

- **l_side_transverse_flange:** obteve um valor final de 0 mm (-100% em relação ao original).

- **t_side_transverse_flange:** obteve um valor final de 0 mm (-100% em relação ao original).

- **l_bulk_flange:** obteve um valor final de 0 mm (-100% em relação ao original).

- **l_bar_keel:** obteve um valor final de 90mm (+20% em relação ao original).

- **t_bar_keel:** obteve um valor final de 4.76mm (-52.4% em relação ao original).

Em relação as variáveis relacionadas com a quilha, todas elas aumentaram de tamanho em relação ao projeto original, com exceção apenas do “t_bar_keel”. Essa solução otimiza esse elemento estrutural dando menos peso e menos volume de solda.

- **l_bar_keel_flange:** obteve um valor final de 30mm (valor original 0mm).

- **t_bar_keel_flange:** obteve um valor final de 6mm (valor original 0mm).

- **t_flate_plate_keel:** obteve um valor final de 4.76mm (-40.5% em relação ao original). Valor da restrição da espessura mínima como discutido anteriormente.

- **t_bottom:** obteve um valor final de 4.76mm (-20.6% em relação ao original). Valor da restrição da espessura mínima como discutido anteriormente.

- **l_bottom_long_web:** obteve um valor final de 75 mm (+50% em relação ao original). Essa foi a única variável relacionada aos reforçadores do fundo que teve aumento do valor, neste caso foi para compensar a diminuição da espessura (t_bottom_long) e a diminuição dos reforços no fundo (nl).

- **t_bottom_long:** obteve um valor final de 4mm (-20% em relação ao original).

- **nl:** obteve um valor final de 3 (-25% em relação ao original).

- **l_bottom_transverse_flange:** obteve um valor final de 50 mm (igual ao original).

- **t_bottom_transverse:** obteve um valor final de 4.76 mm (-4.8% em relação ao original). Essa foi a única variável da hastilha que obteve um valor diferente em relação ao original, porém a redução foi pouca tendo em vista que o espaçamento entre hastilhas (l) permaneceu igual.

- **t_bottom_transverse_flange:** obteve um valor final de 6 mm (igual ao original).

- **t_side:** obteve um valor final de 4.00mm (igual ao original).

- **l_side_long_web:** obteve um valor final de 40 mm (-20% em relação ao original).

- **t_side_long:** obteve um valor final de 4 mm (-20% em relação ao original).
Percebe-se que todas as variáveis relacionadas aos reforçadores de costado tiveram seus valores diminuídos. O modelo proposto conseguiu isso devido a separação dos reforçadores do costado em relação aos do fundo. O projeto original usou os mesmos reforçadores do fundo no costado, talvez para ter certo padrão ou para facilitar a construção.

- **ncl:** obteve um valor final de 1 (-50% em relação ao original).

- **t_side_transverse_web:** obteve um valor final de 4 mm (-20% em relação ao original).

- **t_sheer_bar:** obteve um valor final de 4 mm (-33.3% em relação ao original).

- **t_deck:** obteve um valor final de 3 mm (-25% em relação ao original). Essa medida se soldada pode ocasionar distorções, porém decidiu se manter essa solução ótima pois obteve a espessura mínima exigida na regra.

- **l_deck_long_flange:** obteve um valor final de 15 mm (-40% em relação ao original).

- **l_deck_long_web:** obteve um valor final de 30 mm (-40% em relação ao original).

- **t_deck_long:** obteve um valor final de 4 mm (-20% em relação ao original).
Percebe-se que todas as variáveis relacionadas aos reforçadores de convés tiveram seus valores diminuídos. O modelo proposto conseguiu isso devido a separação dos reforçadores do convés em relação aos do fundo. O projeto original usou os mesmos reforçadores do fundo no convés, talvez para ter certo padrão ou para facilitar a construção.

- **l:** obteve um valor final de 0.8m (igual ao original).

- **t_bulkhead:** obteve um valor final de 4 mm (igual ao original).

- **l_bulk_web**: obteve um valor final de 75 mm (+50% em relação ao original). Essa foi a única variável relacionada aos reforçadores da antepara que obteve aumento do valor, neste caso foi para compensar a diminuição da espessura (t_bulk_long) e a diminuição dos reforços na antepara (representada pela variável “nl”, a mesma usada para reforços no fundo devido a continuidade estrutural).
- **t_bulk_longe**: obteve um valor final de 4 mm (-20% em relação ao original).

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

O presente trabalho teve como objetivo oferecer um método de otimização estrutural para projetos de lanchas de alumínio na fase de projeto básico. Assim ajudar uma equipe de projeto estrutural escolher a melhor configuração de arranjo estrutural, visto haver muitas soluções diferentes que atendem a função estrutural. Objetivou também testar a eficiência de diversos algoritmos disponíveis para o problema, assim determinando o mais adequado para o tipo de otimização estrutural proposta.

A partir da revisão bibliográfica foram determinados os elementos básicos de um problema de otimização que são as funções objetivo, as restrições e as variáveis de projeto, assim como foram abordados os tipos de algoritmos existentes, destacando suas vantagens e desvantagens de forma a se determinar o que melhor se adequava ao problema, também foram adquiridos conhecimentos sobre projeto estrutural, assim como se estudou os tipos de falhas comuns em embarcações que são tração excessiva, flambagem e fadiga, dando os dados e embasamento necessário para a elaboração da abordagem técnica da metodologia escolhida.

A partir da necessidade de se escolher uma variável para servir de função objetivo a ser minimizada no otimização da estrutura, foi escolhido inicialmente a variável peso, pois esta variável é tradicionalmente escolhida para esse tipo de otimização e ter dado excelentes resultados no início dos estudos de otimização, porém com a evolução das técnicas de otimização, assim como os algoritmos disponíveis para uso, viu-se que o problema de otimização não era bem representado por apenas uma única variável, normalmente a segunda variável a ser otimizada nos problemas estruturais é o custo de produção, então como forma de representar essa variável foi escolhido o volume de solda, por ser de mais simples descrição e ser uma variável que representa um dos custos de mão de obra mais relevante na construção naval. Essas variáveis foram representadas unicamente baseadas na lancha original a ser otimizada, portanto a ferramenta precisa de ajustes caso queira se otimizar outro modelo de lancha.

Foram escolhidas restrições estruturais definidas pela regra de sociedade classificadora DNV, por ser esta, uma que definia especificamente restrições necessárias ao projeto estrutural de embarcações patrulha de alumínio: restrições de espessuras mínimas de projeto, resistência da viga navio ao cisalhamento e tensão normal, módulo de seção mínimo requerido da seção mestra, módulos de seção mínimo de elementos estruturais e tensão limite de flambagem para diversos componentes estruturais e também

um limite máximo de deslocamento do centro de gravidade, tendo em vista não se fazer análise de estabilidade no modelo.

Uma vez determinada a estrutura do critério técnico e sua metodologia, foi realizada a análise de eficiência de cada algoritmo a ser testado, esses algoritmos foram: MOGA-2, Evolucionário, NSGA-2, ARMOGA e *Many-Objectives*, como as variáveis peso e volume de solda são de importância igual, não há diferenciação de importância entre as duas variáveis. Para analisar a eficiência dos algoritmos se usou dois critérios necessários: o tempo de processamento e a eficiência na minimização das variáveis. O tempo mais eficiente seria o menor, assim como a maior minimização das variáveis, seria quando a diminuição das variáveis dava o maior valor possível, tendo em vista que não há diferenciação de importância das mesmas. Assim pode-se fazer um ranqueamento dos algoritmos, e os melhores algoritmos foram o MOGA-2 e o Evolucionário. O MOGA-2 obteve uma minimização de peso de -80.8 kg (-8%) em relação ao projeto original, assim como uma minimização de volume de solda de -333.7 cl (-44%), tudo isso em 111 min. Já o algoritmo Evolucionário obteve uma minimização de peso de -181.2 kg (-18%) em relação ao projeto original, assim como uma minimização de volume de solda de -299.2 cl (-40%), no tempo de 513min. Assim, o algoritmo MOGA-2 foi melhor no quesito tempo, porém o algoritmo evolucionário foi um pouco melhor no quesito minimização (embora a minimização de volume de solda seja 4% pior, a minimização de peso é 10% melhor). A partir da análise constatou-se a ineficiência de diversos algoritmos na resolução do problema, como o ARMOGA e *Many-Objectives*, pois ao se comparar as soluções, observou-se uma grande discrepância nas soluções por eles apresentadas em relação aos dois mais eficientes, chegando a soluções ótimas piores que o projeto original da lancha.

A partir das análises anteriores dos algoritmos, foi possível observar a robustez do modelo produzido uma vez que variáveis de áreas específicas da lancha influenciavam diretamente no valor de outra variável dessa mesma região, mostrando que a metodologia é de fato capaz de incorporar mudanças de valor de variáveis que influenciam em outras para chegar no resultado final otimizado.

Tendo eleito os dois algoritmos mais eficientes (MOGA-2 e Evolucionário) o estudo se propôs a verificar mais assiduamente os resultados obtidos pelos mesmos. Por isso se optou pelo uso de DOEs, que são uma base de dados de resultados anteriores com o objetivo de dar ao algoritmo um ponto de partida melhor para se obter o resultado final. Por isso se elegeu três variáveis (espaçamento entre hastilhas, número de longitudinais

no fundo e número de longitudinais no costado) que possuíam maior influência no final dos resultados, visto que mudavam a quantidade de reforços e assim rodou-se alguns modelos deixando apenas essas três variáveis fixas em cada simulação e após isto a próxima simulação se alterava o valor de apenas uma das três variáveis, até o ponto de simular todas as faixas selecionadas para essas três variáveis. A faixa de valores selecionados para as variáveis foram escolhidos tendo como base os resultados ótimos anteriormente obtidos, deixando uma margem a mais. Para o espaçamento entre hastilhas, a faixa de valores foi entre 0.5m e 1.2m, já para o número de longitudinais no fundo, a faixa de valores foi entre 1 e 4, e para o número de longitudinais no costado a faixa de valores foi entre 0 e 2.

Assim, o trabalho usou os DOEs para servir como base para rodar os dois algoritmos melhores e chegar no resultado final. Nesse resultado final o MOGA-2 se saiu melhor. De fato, os DOEs ajudaram a melhorar as soluções anteriores do algoritmo MOGA-2, pois a solução final usando o DOE conseguiu reduzir o peso em -196 kg (-19 %) em relação ao projeto original, enquanto que o volume de solda foi reduzido em -381 cl (-51%). No final se provou que o MOGA2 foi mais eficiente quando já se possui DOEs, enquanto o algoritmo evolucionário é mais eficaz sem o uso de DOE. Vale salientar que o algoritmo Evolucionário não melhorou a solução original pelo uso dos DOEs, porém a solução sem uso dos DOEs já apresentou uma solução ótima muito boa quando comparada com a do MOGA-2 usando os DOEs, apresentando uma diferença percentual menor de redução de peso de 1% e de volume de solda de 11%. Assim, devido ao grande esforço empregado na construção dos DOEs, a solução do algoritmo Evolucionário sem DOEs já é suficientemente boa quando não se tem tempo e mão de obra disponível para executar estudos como foi feito nesse trabalho, tendo em vista que pouco se evoluiu quando se fez uso de DOEs.

Aqui é interessante salientar algumas limitações da metodologia proposta, o modelo proposto e estudado possui 31 variáveis para serem otimizados, porém eles são representativos da seção mestra, e são calculados sempre nas piores condições de carregamento. De fato, essa aproximação foi necessária para não haver uma quantidade maior de variáveis, porém limita a ferramenta no quesito de achar soluções mais otimizadas em relação ao peso e volume de solda. Por se basear na regra da DNV o modelo sempre é avaliado com o conservadorismo inerente a norma. Entretanto, por não ter sido feita uma análise em elementos finitos, a real resistência última do modelo

otimizado quando comparada ao projeto original da lancha não foi avaliada. Também não foram avaliadas as incertezas das medidas de cada uma das espessuras das chapas usadas.

O trabalho consegue servir de ferramenta para otimizar novos projetos de lancha patrulha de pequeno porte da área da engenharia, assim ajudando na redução de custos de produção e peso final do projeto, assim contribuindo para redução de emissões poluentes pela redução da capacidade de motorização da lancha que teria relação potência por peso menor. É importante lembrar que embarcações maiores requerem otimização acoplada ao método de elementos finitos.

Por fim, conclui-se que esse trabalho cumpriu seu objetivo ao endereçar um assunto de grande relevância no cenário de otimização de projetos de lancha de alumínio. As análises desenvolvidas mostram a robustez do critério proposto e sua possibilidade de aplicação em outros projetos de outros modelos de lancha, executando apenas algumas alterações no modelo.

5.1 Trabalhos futuros

Este estudo pode suscitar o desenvolvimento de trabalhos futuros uma vez que as análises aqui apresentadas se restringem à apenas um modelo de lancha. Um refinamento deste trabalho seria testar a metodologia em outros tipos de lanchas de tamanho diferentes existentes. Outra sugestão seria testar a resistência última do modelo otimizada e a lancha original e comparar a alteração dessa resistência em relação as duas, tanto no algoritmo MOGA-2 usando os DOEs quanto no Evolucionário sem o uso dos DOEs. Seria interessante também testar as funções objetivo colocando um peso diferente para cada função objetivo. O modelo se restringiu a uma lancha de alumínio, seria também motivo de outros estudos testar a metodologia em lanchas de materiais compósitos.

REFERÊNCIAS

- ANDRIC, J. The global structural response model for multi-deck ships in concept design phase. **Ocean Engineering**, v. 37, p. 688-704, 2010.
- AUGUSTO, P. D. O. B. **Especialização em Engenharia Naval Módulo 4: Análise Estrutural de Navios**. Universidade de Pernambuco – UPE. 2007.
- BAPTISTA, M. T. P. **ANÁLISE DE COMPLEXIDADE EM NAVIOS – COMPLEXIDADE DE SOLDAGEM**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.
- CAPRACE, J. D. **Cost Effectiveness and Complexity Assessment in Ship Design within Concurrent Engineering and Design for X framework**. University of Liège. 2010.
- CAPRACE, J. D. Optimisation of ship structures. **Research Gate**, p. 21, 2011.
- ENGINEER, T. E. Understanding Buckling. **Youtube**, 2021. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=21G7LA2DcGQ>>. Acesso em: 22 Maio 2023.
- ESTECO. **Manual ModeFrontier**, 2023.
- ESTECO. **Software ModeFrontier**, 2023. Acesso em: 2023.
- EVANS, J.; KHOUSHY, D. Optimized Design of Midship Section Structure. **Trans**, 71. 144-191.
- EYRES, D. J. **Ship Construction**. Butterworth and Heinemann.
- GOLBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**: Addison-Wesley Publishing Co., 1989.
- HAFTKA, R. T. **Elements of Structural Optimization**: Springer-Science+Business media, B. V., v. Third Revised and Expanded Edition, 1992.
- HARLANDER, L. Optimum Plate-Stiffener Arrangement for Various Types of Loading, 4, n. 20, 1960. 49-65.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. Pearson, 2009.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. The MIT Press, 1992.
- HUGHES, O. F. **Ship Structural Design: A Rationally-based, Computer-aided Optimization Approach**. Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988. 609 p.
- KITAMURA, M. Application of a genetic algorithm to the optimal structural design of a ship's engine room taking dynamic constraints into consideration. **Marine Science and Technology**, v. 5, p. 131-146, 2000.
- KOPAVNICK, T. M. **COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE CASCOS RESISTENTES DE SUBMARINOS UMA ANÁLISE DE FADIGA**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 315. 2006.
- KUMAR, M. S. Ultimate Strength of Orthogonal Stiffened Plates Subjected to Axial and Lateral Loads. **KSCE Journal of Civil Engineering**, p. 197-206, 2010.

- KUMAR, Y. V. S. Finite element analysis of ship structures using a new stiffened plate element. **Applied Ocean Research**, v. 22, p. 361-374, May 2000.
- LEWIS, E. V. **Principles of Naval Architecture**. Second Revision. ed. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, v. 1 - Stability and Strength, 1988.
- NOWACKI, H.; BRUSIS, F.; SWIFT, P. Tanker Preliminary design - An Optimization Problem with Constraints. **Trans**, n. 78, 1970. 357-390.
- OROZCO, J. C. G. **Contribuição ao estudo de painéis reforçados: Comparação entre o método chapa ortotrópica e o método dos elementos finitos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 194. 2009.
- PENG, G. A comparison of approximation methods for multidisciplinary design optimization of ship structures. **Journal of Ship Mechanics**, v. 11, p. 913-923, 2007.
- RAHMAN, M. K. Optimization of panel forms for improvement in ship structures. **Springer-Verlag**, v. Structural Optimization, n. 11, p. 195-212, 1996.
- RAHMAN, M. K. Automated optimization of transverse frame layouts for ships by elastic-plastic finite element analysis. **Structural Optimization Springer-Verlag**, v. 15, p. 187-200, 1998.
- RAJU, M. A STUDY ON COMMON SHIP STRUCTURAL FAILURES. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, v. 9, n. 7, p. 746-754, 2018. ISSN 0976-6359.
- RIGO, P. An Integrated Software for Scantling Optimization and Least Production Cost. **Ship Technology Research Schiffstechnik**, Hamburg, v. 50, n. 3, p. 125-140, July 2003.
- SEKULSKI, Z. Least-weight topology and size optimization of high speed vehicle-passenger catamaran structure by genetic algorithm. **Marine Structures**, v. 4, n. 22, p. 691-711, 2009.
- SUN, H. Procedure for calculating hull girder ultimate strength of ship structures. **Marine Systems & Ocean Technology**, v. 1, p. 127-136, December 2005.
- VANDERPLAATS, G. N. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: With Applications**. Third. ed. McGraw-Hill Education, 1999.
- VERITAS, D. D. N. **DNV Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft**. 2015.
- VERITAS, D. N. **CORROSION PROTECTION OF SHIPS**, 2000.
- ZUBALY, R. B. **Applied Naval Architecture**. Cornell Maritime Press, 1996.

ANEXO 1 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE PESO DA LANCHA

EXEMPLO DE CÁLCULO DO PESO DO ESPELHO DE POPA DA AREA 1:

1:

Para ilustrar o cálculo, foi escolhido o espelho de popa da Area 1:

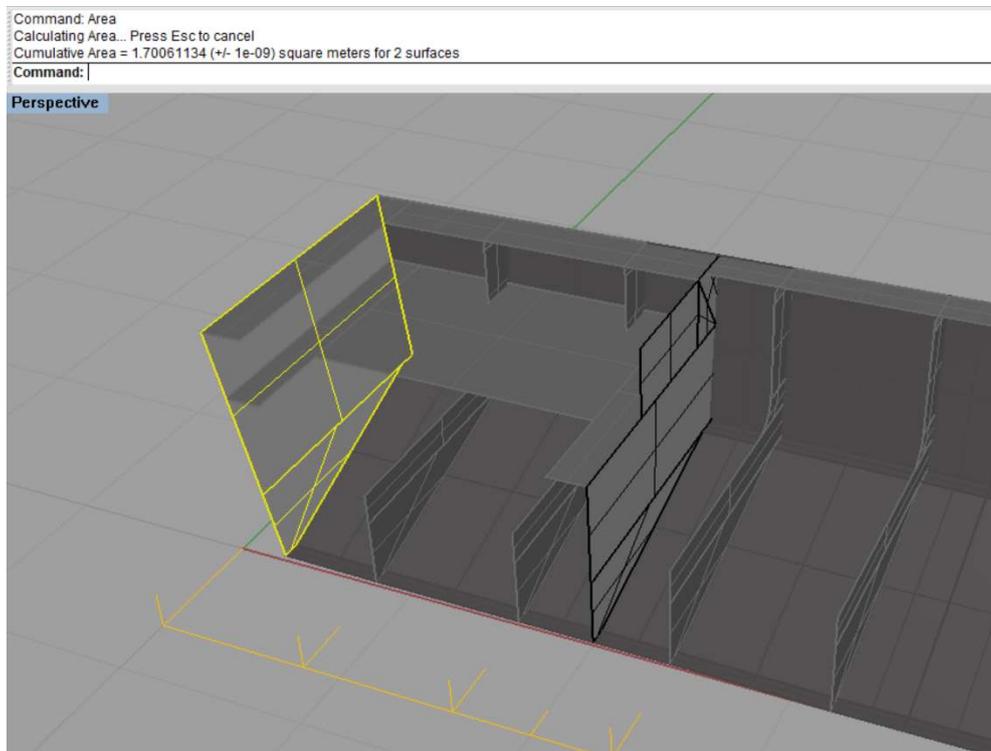


Figura 70 - Área do espelho de popa (fonte: autor)

Pela Figura 70 tem-se que:

$$Area_{chapa} = 1.7 \text{ m}^2$$

Sendo:

$$\rho_{chap} = 2666 \text{ kg/m}^3$$

E escolhendo:

$$t_{chapa} = 4 \text{ mm}$$

Obtêm-se usando (46) :

$$Peso_{chapa} = Area_{chapa} * t_{cha} * \rho_{chapa} * 10^{-6} = 0.018 \text{ ton}$$

EXEMPLO DE CÁLCULO DO PESO DOS REFORÇADORES LONGITUDINAIS DO FUNDO DA AREA 1:

Para ilustrar o cálculo do peso dos reforçadores longitudinais do fundo na Part 1, foram escolhidos os seguintes valores:

N	- 4
t_{alma}	- 5 mm
l_{alma}	- 50 mm
t_{flange}	- 5 mm
l_{flange}	- 25 mm
L_{parte}	- 1.73 m (esse valor é sempre o mesmo para qualquer elemento

na parte1)

ρ_{ref}	- 2710 Kg/m ³
--------------	--------------------------

Obtêm-se usando a equação (47):

$$Peso_{ref} = N * (t_{alma} * l_{alma} + t_{flange} * l_{flange}) * L_{parte} * \rho_{ref} * 10^{-9} = 0.007 \text{ ton}$$

EXEMPLO DE CÁLCULO DE ÁREA DA ALMA DE UMA CAVERNA, ASSIM COMO SEU COMPRIMENTO:

Para exemplificar o cálculo, foi escolhido calcular a área e comprimento da caverna na posição $X=6$ m quando o espaçamento entre transversais é $l=0.4$ m.

Pela informação da interpolação feita na Figura 28, a área de cavernas entre as posições $4 < X < 6.8$ deveriam ter a seguinte equação:

$$Área_{alma} (4 < x < 6.8) = 0.2405 * x^2 - 2.5309 * x + 6.7468 \quad (108)$$

Portanto:

$$Área_{alma}(x = 6m) = 0.2194 \text{ m}^2$$

De forma semelhante, através da Figura 28, percebe-se que a interpolação para o comprimento da caverna entre as posições $4 < X < 6.8$ deve ser:

$$Comp_{cav} (4 < x < 6.8) = 0.8984 * x^2 - 9.4812 * x + 25.51 \quad (109)$$

Portanto:

$$Comp_{cav}(x = 6) = 0.9652 m$$

PLANILHA DE EXEMPLO DE CÁLCULO DE PESO TOTAL DA LANCHA:

Na Tabela 34, é mostrado um exemplo de cálculo de peso total da seguinte lancha de exemplo:

Tabela 33 - lancha de exemplo para cálculo do peso total (fonte: autor)

Peso (Kg)	857.33
Volume de Solda (Centilitros)	462.92
Aprovado (sim = 0, não = 1)	0
Variação de Posição do CG	0.009
s(m)	0.3900
s_cost(m)	0.333
Dados de Entrada Variável	
l(m)	0.8
l_bar_keel (mm)	90
l_bar_keel_flange (mm)	30
l_bottom_long_flange(mm)	25
l_bottom_long_web(mm)	70
l_bottom_transverse_flange(mm)	65
l_bulk_flange(mm)	25
l_bulk_web(mm)	65
l_deck_long_flange(mm)	25
l_deck_long_web(mm)	55
l_side_long_flange (mm)	30
l_side_long_web (mm)	45
l_side_transverse_flange (mm)	25
ncl	1
nl	3
t_bar_keel (mm)	5
t_bar_keel_flange (mm)	5
t_bottom(mm)	4.76
t_bottom_long (mm)	4
t_bottom_transverse (mm)	4.76
t_bottom_transverse_flange(mm)	6
t_bulk_long(mm)	4
t_bulkhead(mm)	4
t_deck (mm)	3
t_deck_long(mm)	4
t_flate_plate_keel (mm)	6
t_sheer_bar (mm)	7.94
t_side (mm)	4
t_side_long (mm)	4
t_side_transverse_flange (mm)	6
t_side_transverse_web (mm)	4

Tabela 34 - Calculo do Peso Total da lancha (fonte: autor)

PESO						
PART 1 (fundo 1,73m)	Area (m ²)	XG (m)	YG (m)	ZG (m)	Volume(m ³)	Peso (t)
Chapa Espelho	1.701	0.113	0.723	0.761	0.007	0.018
Chapa Convés	3.091	0.949	1.029	1.045	0.009	0.025
Chapa Costado	1.664	1.057	1.555	0.829	0.007	0.018
Chapa Fundo	2.597	1.116	0.801	0.222	0.012	0.033
Chapa da quilha	0.157	1.128	0.045	0.026	0.001	0.003
Longitudinais do fundo	0.00114	1.117	0.743	0.252	0.002	0.005
Longitudinais do costado	0.0003	1.057	1.555	0.829	0.001	0.001
Reforço do sheer bar	0.000397	1.006	1.606	1.287	0.001	0.002
Reforço do convés	0.00064	1.028	1.035	0.907	0.001	0.003
Reforço da antepara	0.00036	0.1138	0.723	0.79	0.002	0.004
Bar keel	0.00030	1.128	0	0.082675	0.001	0.001

PART 2 (2m)	Area (m ²)	XG (m)	YG (m)	ZG (m)	Volume(m ³)	Peso (t)
Chapa da antepara	1.522	2	0.782	0.699	0.006	0.016
Chapa Convés	0.414	2.997	1.502	1.349	0.001	0.003
Chapa Costado	1.814	3.002	1.552	0.84	0.007	0.019
Chapa Fundo	2.928	2.994	0.793	0.214	0.014	0.037
Chapa da Quilha	0.182	3	0.045	0.007	0.001	0.003
Longitudinais do fundo	0.00114	2.994	0.736	0.243	0.00228	0.006
Longitudinais do costado	0.0003	3.002	1.553	0.840	0.0006	0.002
Reforço do Sheer bar	0.000397	2.999	1.60582	1.3206	0.000794	0.002
Reforço da antepara	0.00036	2.000	0.802	0.719	0.0013	0.004
Bar keel	0.00030	3.01071457	0	0.064031	0.001	0.002

PART 3 (2,80m)	Area (m ²)	XG (m)	YG (m)	ZG (m)	Volume(m ³)	Peso (t)
Chapa da antepara	1.518	4	0.801	0.764	0.006	0.016
Chapa Convés	1.405	5.864	0.98	1.413	0.004	0.011
Chapa Costado	2.398	5.367	1.295	0.959	0.010	0.026
Chapa Fundo	3.509	5.304	0.595	0.348	0.017	0.045
Chapa da Quilha	0.105	5	0.029	0.021	0.001	0.002
Longitudinais do fundo	0.00114	5.29607988	0.54613	0.368117842	0.003192	0.009
Longitudinais do costado	0.0003	5.36712	1.29592	0.95961	0.00084	0.002
Reforço do Sheer Bar	0.000397	5.4208	1.44555	1.36996	0.0011116	0.003
Reforço do convés	0.00112	6.477098	0.6538	1.3953	0.0005936	0.002
Reforço da antepara	0.00036	4	0.801254	0.7717	0.0014382	0.004
Bar keel	0.00030	4.80025982	0	0.078675	0.001	0.002

PART 4 (1,35m)	Area (m ²)	XG (m)	YG (m)	ZG (m)	Volume(m ³)	Peso (t)
Chapa da antepara	0.638	6.8	0.393	1.086	0.003	0.007
Chapa Convés	0.816	7.272	0.384	1.475	0.002	0.007
Chapa Costado	0.848	7.355	0.481	1.208	0.003	0.009
Chapa Fundo	0.431	7	0.192	0.775	0.002	0.005
Reforço da antepara	0.0004	6.8	0	1.0588	0.0006	0.002

	Area (m ²)	XG (m)	YG (m)	ZG (m)	Volume(m ³)	Peso (t)
Hastilhas alma	3.226912	3.13979631	0	0.4010304	0.015	0.042
Hastilhas Flange	0.49168704	3.25118703	0	0.580243597	0.00295012	0.008
Cavernas alma	1.6868	4.36883092	0	1.082457786	0.0067472	0.018
Caverna Flange	0.1809316	4.25688559	0	1.029799417	0.00108559	0.003

Peso Total Ot	0.857
XG(m)	3.367
YG(m)	0.000
ZG(m)	0.659

ANEXO 2 – EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE VOLUME DE SOLDA DA LANCHA

CÁLCULO DO VOLUME DE SOLDA (PARA APENAS UM BORDO) DE REFORÇADORES OU VIGAS NO FUNDO DA PART 1:

Como exemplo de cálculo, será calculado os reforçadores do fundo da part 1, com os seguintes dados abaixo que são o do projeto inicial:

n_r	- 4
t_{ref}	- 0.005 m
n_{flange}	- 4
L_{parte}	- 1.73 m (retirado do modelo 3D mostrado na Figura 29)

Obtêm-se:

$$\begin{aligned} Volume_{solda_{ref}} &= L_{parte} \left(n_r * (0.75t_{ref})^2 + n_{flange}(0.75t_{ref})^2 \right) \\ &= 1.94625 * 10^{-4} m^3 \end{aligned}$$

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DE VOLUME DE SOLDA (PARA APENAS UM BORDO) DE UMA CAVERNA:

Como exemplo de cálculo, será calculado o volume de solda da caverna na posição $x = 6m$:

Usando a equação (109) chega-se ao seguinte valor:

$$Comp_{cav}(x = 6) = 0.715 m$$

Escolhendo um flange maior que “0”, ou seja, perfil T, e escolhendo

$t_{cav} = 0.005m$, tem-se:

$$f_{flange} = 1$$

$$Volume_{solda_{cav}} = Comp_{cav} \left((0.75t_{cav})^2 + f_{flange} (0.75t_{cav})^2 \right) = 0.000020109 m^3$$

EXEMPLO DE CÁLCULO DO VOLUME DE SOLDA DE CHAPAS (PARA APENAS UM BORDO):

Para exemplificar o cálculo do volume de solda de chapas, será calculado o volume de soldas das chapas do fundo da “Part 1” conforme a figura abaixo:

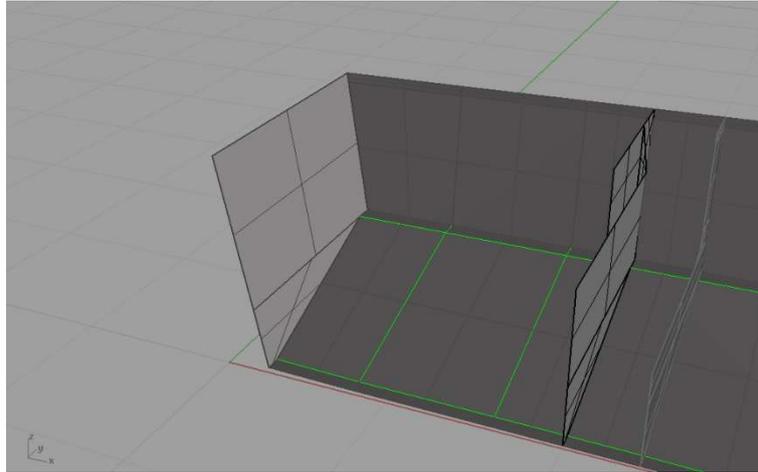


Figura 71 - Modelo 3D com linhas de solda no fundo (fonte: autor)

O L_{solda} é medido diretamente do modelo 3D, portanto seu valor para a Parte 1 será:

$$L_{solda} = 0.53 + 0.8 + 0.4 + 1.35 + 1.34 + 0.61 + 0.8 + 0.4 + 0.12 + 0.12 = 6.47m$$

A $\text{Área}V$ será para $t_{bottom} = e = 0.006m$:

$$\text{Área}V = \left(\frac{\sqrt{3}}{3} * (e - 2)^2 \right) + 2e = 0,00002124 m^2$$

Portanto, o volume de solda será:

$$\text{Volume}_{solda_chapa} = \text{Área}V(\text{ou } X) * L_{solda} = 0.00014 m^3$$

EXEMPLO DE CÁLCULO DE VOLUME DE SOLDA TOTAL DA LANCHAS:

Na Tabela 35 é mostrado um exemplo de cálculo do volume total de solda da lancha de exemplo da Tabela 33:

Tabela 35 - Cálculo do Volume de Solda Total da lancha (fonte: autor)

VOLUME DE SOLDA						
PART 1 (fundo 1,73m)	Area (m ²)	XG (m)	YG (m)	ZG (m)	Volume(m ³)	Volume (litros)
Chapa Espelho	0.00001031				0.00006	0.063
Chapa Convés	0.00000658				0.00006	0.064
Chapa Costado	0.00001031				0.00005	0.049
Chapa Fundo	0.00001392				0.00009	0.090
Chapa da quilha	0.00002124				0.00000	0.004
Longitudinais do fundo	0.000054				0.00009	0.093
Longitudinais do costado	0.000018				0.00003	0.031
Reforço do sheer bar	0.000036				0.000004	0.004
Reforço do convés	0.000036				0.00006	0.062
Reforço da antepara	0.000018				7.9241E-05	0.079
Bar keel	0.00003				0.00005	0.024
PART 2 (2m)	Area (m ²)	XG (m)	YG (m)	ZG (m)	Volume(m ³)	Volume (litros)
Chapa da antepara	0.00001031				0.00007	0.072
Chapa Convés	0.00000658				0.00003	0.026
Chapa Costado	0.00001031				0.00006	0.060
Chapa Fundo	0.00001392				0.00010	0.097
Chapa da Quilha	0.00002124				0.00000	0.004
Longitudinais do fundo	0.000054				0.000108	0.108
Longitudinais do costado	0.000018				0.000036	0.036
Reforço do sheer bar	0.000036				0.000004	0.004
Reforço da antepara	0.00002				6.5079E-05	0.065
Bar keel	0.00003				0.00006	0.028
PART 3 (2,80m)	Area (m ²)	XG (m)	YG (m)	ZG (m)	Volume(m ³)	Volume (litros)
Chapa da antepara	0.00001031				0.00007	0.071
Chapa Convés	0.00000658				0.00005	0.053
Chapa Costado	0.00001031				0.00010	0.095
Chapa Fundo	0.00001392				0.00015	0.151
Chapa da Quilha	0.00002124				0.000004	0.004
Longitudinais do fundo	0.000054				0.0001512	0.151
Longitudinais do costado	0.000018				0.0000504	0.050
Reforço do sheer bar	0.000036				0.000009	0.009
Reforço do convés	0.000018				0.00003	0.033
Reforço da antepara	0.000018				0.00007191	0.072
Bar keel	0.00003				0.00008	0.039
PART 4 (1,35m)	Area (m ²)	XG (m)	YG (m)	ZG (m)	Volume(m ³)	Volume (litros)
Chapa da antepara	0.00001031				0.00004	0.038
Chapa Convés	0.00000658				0.00003	0.027
Chapa Costado	0.00001031				0.00005	0.053
Chapa Fundo	0.00001392				0.00005	0.049
Reforço da antepara	0.000018				0.00003	0.030
	Area (m ²)	XG (m)	YG (m)	ZG (m)	Volume(m ³)	Volume (litros)
Hastilhas	2.54898E-05				0.0001928	0.193
Cavernas	0.000018				0.00013027	0.130

Volume total de Solda(litros) 4.629

**ANEXO 3 - EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS
RELACIONADOS A VARIAÇÃO DE PESO, CALADO, LW, CB E Z DA
LANCHA**

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DO DESLOCAMENTO:

Para exemplificar o cálculo do deslocamento, foi usada a tabela de meia área transversal alagada para T=0.34m:

Tabela 36 – Meia área submersa por posição X no calado 0.34m (fonte: autor)

X	Area (T=0.34)
0.2	0
0.27	0.20295
0.8	0.20295
1.6	0.21115
2.4	0.2163
3.2	0.22241
4	0.20629
4.8	0.15468
5.6	0.08596
6.4	0.01319
6.75	0

Então usando equação (59), o valor do deslocamento será:

$$\Delta(0.34) = 2 * 1.025 * \left(\frac{(0 + 0.20295) * (0.27 - 0.2)}{2} + \frac{(0.20295 + 0.20295) * (0.8 - 0.27)}{2} + \dots + \frac{(0.1319 + 0) * (6.75 - 6.4)}{2} \right) = 2.215 \text{ ton} \quad (110)$$

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DO COEFICIENTE DE BLOCO (CB):

Para exemplificar o cálculo do Coeficiente de bloco (Cb), foi usado um calado de T=0.34m. Portanto para o cálculo de “Cb”, são usadas as equações (60), (61) e (62) e Tabela 36:

$$Cb = \frac{2 * \left(\frac{(0 + 0.20295) * (0.27 - 0.2)}{2} + \frac{(0.20295 + 0.20295) * (0.8 - 0.27)}{2} + \dots + \frac{(0.1319 + 0) * (6.75 - 6.4)}{2} \right)}{2 * 1.21 * (6.55) * 0.34} = 0.40 \quad (111)$$

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DO $\Delta_{otimizado}$, CB E T USANDO AS INTERPOLAÇÕES DOS GRÁFICOS DA Figura 34 E Figura 35:

Para exemplificar o cálculo, serão usados os seguintes dados:

$$Peso_{otimizado} = 857.33 \text{ kg} \quad (112)$$

Usando a equação (65) obtém-se:

$$\Delta_{otimizado} = \frac{(857.33 - 1011.84)}{1000} + 3.39 = 3.23 \text{ ton} \quad (113)$$

Usando as equações da Figura 34 obtém-se Cb e T:

$$Cb(3.23\text{ton}) = 0.0212 * (3.23)^3 - 0.232 * (3.23)^2 + 0.8871 * (3.23) - 0.7765 = 0.38 \quad (114)$$

$$T(3.23\text{ton}) = 0.0027 * (3.23)^3 - 0.03 * (3.23)^2 + 0.1724 * (3.23) + 0.0762 = 0.41\text{m} \quad (115)$$

Pode-se usar a equação de interpolação da Figura 35 para se obter o Lw:

$$Lw(3.23\text{ton}) = 0.0053 * (3.23)^3 - 0.074 * (3.23)^2 + 0.4228 * (3.23) + 5.9181 = 6.69\text{m} \quad (116)$$

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DO MÓDULO DE SEÇÃO

Para se fazer o cálculo do módulo de seção, serão usadas como exemplo os dados de embarcação contidos na Tabela 33.

Como alguns elementos estruturais da seção mestra se encontram inclinados, foi usada a seguinte figura para representar os elementos de forma genérica:

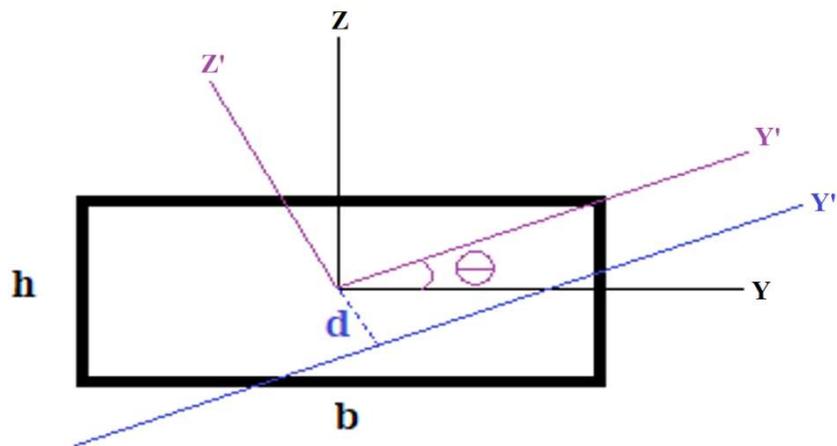


Figura 72 - figura usada para cálculo do momento de inércia (fonte: autor)

Usando a Figura 72, as seguintes expressões (HIBBELER, 2009) serão usadas para o cálculo da inércia de um retângulo em relação a um eixo inclinado:

$$I_y = \frac{b * h^3}{12} \quad (117)$$

$$I_z = \frac{h * b^3}{12} \quad (118)$$

$$I_{y'} = \frac{(I_x + I_y)}{2} + \frac{(I_x - I_y)}{2} * \cos(2\theta) \quad (119)$$

$$I_{y''} = I_{x'} + b * h * d^2 \quad (120)$$

Para exemplificar o cálculo do momento de inércia e módulo de seção, será usada a chapa do deque que possui as seguintes características:

$b = 27.55$ cm (comprimento da chapa)

$h = 0.3$ cm (espessura da chapa)

$\theta = 5^\circ$ (ângulo de inclinação em relação a linha neutra sendo positivo no sentido horário)

$d = 92.8405$ cm (distância entre o centro da chapa do deque e a linha neutra da seção mestra)

$y = 87.6405$ cm (distância da linha neutra e o ponto mais distante da embarcação, que no caso é o convés)

obs: a linha neutra da embarcação é calculada obtendo o centro de área da seção mestra.

Portanto, usando as equações (117), (118), (119) e (120):

$$I_y = \frac{27.55 * 0.3^3}{12} = 0.06198 \text{ cm}^4 \quad (121)$$

$$I_z = \frac{0.3 * 27.55^3}{12} = 522.76 \text{ cm}^4 \quad (122)$$

$$I_{y'} = \frac{(0.06198 + 522.76)}{2} + \frac{(0.06198 - 522.76)}{2} * \cos(2 * 5) = 4.0324 \text{ cm}^4 \quad (123)$$

$$I_{y''} = ILN = 4.0324 + 27.55 * 0.3 * 92.8405^2 = 71243 \text{ cm}^4 \quad (124)$$

Obs: ILN é igual a $I_{y''}$.

O mesmo procedimento de cálculo é feito com todos os elementos estruturais da seção gerando as seguintes tabelas:

Tabela 37 – tabela de boreste usada para cálculo do módulo de seção (fonte: autor)

BORESTE												
Nome do elemento	Posição Y(r)	Posição Z(m)	comp(m)	t(m)	Area(m ²)	MomentoY	MomentoZ	θ (graus)	Iy(cm ⁴)	Iz(cm ⁴)	Iy'(cm ⁴)	ILN(cm ⁴)
Deck Plating BE	1.4679	1.422	0.2755	0.003	0.000827	0.0012	0.0012	5.0000	0.061987500	522.76	4.03	71243.10
Sheer Bar BE	1.6051	1.3679	0.05	0.0079	0.000397	0.0006	0.0005	-90.0000	0.208569243	8.27	8.27	30355.35
Side Plating BE	1.549	0.865	0.9292	0.004	0.003717	0.0058	0.0032	-83.0000	0.495573333	26742.77	26345.59	77615.87
Bottom Plating Shine BE	1.4331	0.4038	0.1195	0.0048	0.000569	0.0008	0.0002	0.0000	0.107400800	67.69	0.11	458.75
Bottom Plating BE	0.7388	0.2019	1.3318	0.0048	0.006339	0.0047	0.0013	-18.0000	1.196957203	93700.68	8948.70	62887.67
Flat Plate Keel BE	0.0521	0	0.1042	0.006	0.000625	0.0000	0.0000	0.0000	0.187560000	56.57	0.19	15232.28
Side Long 1 Web BE	1.531668	0.9088421	0.045	0.004	0.000180	0.0003	0.0002	7.0000	0.024000000	3.04	0.07	3103.82
Side Long 1 Flange BE	1.509335	0.9115841	0.03	0.004	0.000120	0.0002	0.0001	-83.0000	0.016000000	0.90	0.89	2097.47
Side Long 2 Web BE	0	0	0.045	0	0	0.0000	0.0000	7.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Side Long 2 Flange BE	0	0	0.03	0	0	0.0000	0.0000	-83.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Side Long 3 Web BE	0	0	0.045	0	0	0.0000	0.0000	7.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Side Long 3 Flange BE	0	0	0.03	0	0	0.0000	0.0000	-83.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Side Long 4 Web BE	0	0	0.045	0	0	0.0000	0.0000	7.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Side Long 4 Flange BE	0	0	0.03	0	0	0.0000	0.0000	-83.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bottom Long 1 Web BE	1.113084	0.357687	0.07	0.004	0.00028	0.0003	0.0001	-108.0000	0.037333333	11.43	10.35	527.53
Bottom Long 1 Flange BE	1.102269	0.390974	0.025	0.004	0.0001	0.0001	0.0000	-18.0000	0.013333333	0.52	0.06	105.37
Bottom Long 2 Web BE	0.741384	0.239487	0.07	0.004	0.00028	0.0002	0.0001	-108.0000	0.037333333	11.43	10.35	1818.32
Bottom Long 2 Flange BE	0.730569	0.272774	0.025	0.004	0.0001	0.0001	0.0000	-18.0000	0.013333333	0.52	0.06	487.68
Bottom Long 3 Web BE	0.369784	0.121187	0.07	0.004	0.00028	0.0001	0.0000	-108.0000	0.037333333	11.43	10.35	3893.59
Bottom Long 3 Flange BE	0.358969	0.154474	0.025	0.004	0.0001	0.0000	0.0000	-18.0000	0.013333333	0.52	0.06	1150.09
Bottom Long 4 Web BE	0	0	0.07	0	0	0.0000	0.0000	-108.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bottom Long 4 Flange BE	0	0	0.025	0	0	0.0000	0.0000	-18.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bottom Long 5 Web BE	0	0	0.07	0	0	0.0000	0.0000	-108.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bottom Long 5 Flange BE	0	0	0.025	0	0	0.0000	0.0000	-18.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bottom Long 6 Web BE	0	0	0.07	0	0	0.0000	0.0000	-108.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bottom Long 6 Flange BE	0	0	0.025	0	0	0.0000	0.0000	-18.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bar keel web	0	0.045	0.09	0.005	0.00045	0.0000	0.0000	90.0000	0.093750000	30.38	30.38	9086.04
Bar keel flange	0	0.09	0.03	0.005	0.00015	0.0000	0.0000	0.0000	0.031250000	1.13	0.03	2443.36

Tabela 38 - tabela de bombordo usada para cálculo do módulo de seção (fonte: autor)

BOMBORDO												
Nome do elemento	Posição Y(r)	Posição Z(m)	comp(m)	t(m)	Area(m ²)	MomentoY	MomentoZ	θ (graus)	Iy(cm ⁴)	Iz(cm ⁴)	Iy'(cm ⁴)	ILN(cm ⁴)
Deck Plating BE	-1.4679	1.422	0.2755	0.003	0.000883	-0.0012	0.0012	-5.0000	0.061987500	522.76	4.03	71243.10
Sheer Bar BE	-1.6051	1.3679	0.05	0.0079	0.0004	-0.0006	0.0005	90.0000	0.208569243	8.27	8.27	30355.35
Side Plating BE	-1.549	0.865	0.9292	0.004	0.00372	-0.0058	0.0032	83.0000	0.495573333	26742.77	26345.59	77615.87
Bottom Plating Shine BE	-1.4331	0.4038	0.1195	0.0048	0.00057	-0.0008	0.0002	0.0000	0.107400800	67.69	0.11	458.75
Bottom Plating BE	-0.7388	0.2019	1.3318	0.0048	0.00634	-0.0047	0.0013	18.0000	1.196957203	93700.68	8948.70	62887.67
Flat Plate Keel BE	-0.0521	0	0.1042	0.006	0.00063	0.0000	0.0000	0.0000	0.187560000	56.57	0.19	15232.28
Side Long 1 Web BE	-1.53167	0.9088421	0.045	0.004	0.00018	-0.0003	0.0002	-7.0000	0.024000000	3.04	0.07	3103.82
Side Long 1 Flange BE	-1.50934	0.9115841	0.03	0.004	0.00012	-0.0002	0.0001	83.0000	0.016000000	0.90	0.89	2097.47
Side Long 2 Web BE	0	0	0.045	0	0	0.0000	0.0000	-7.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Side Long 2 Flange BE	0	0	0.03	0	0	0.0000	0.0000	83.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Side Long 3 Web BE	0	0	0.045	0	0	0.0000	0.0000	-7.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Side Long 3 Flange BE	0	0	0.03	0	0	0.0000	0.0000	83.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Side Long 4 Web BE	0	0	0.045	0	0	0.0000	0.0000	-7.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Side Long 4 Flange BE	0	0	0.03	0	0	0.0000	0.0000	83.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bottom Long 1 Web BE	-1.11308	0.357687	0.07	0.004	0.00028	-0.0003	0.0001	108.0000	0.037333333	11.43	10.35	527.53
Bottom Long 1 Flange BE	-1.10227	0.390974	0.025	0.004	0.0001	-0.0001	0.0000	18.0000	0.013333333	0.52	0.06	105.37
Bottom Long 2 Web BE	-0.74138	0.239487	0.07	0.004	0.00028	-0.0002	0.0001	108.0000	0.037333333	11.43	10.35	1818.32
Bottom Long 2 Flange BE	-0.73057	0.272774	0.025	0.004	0.0001	-0.0001	0.0000	18.0000	0.013333333	0.52	0.06	487.68
Bottom Long 3 Web BE	-0.36978	0.121187	0.07	0.004	0.00028	-0.0001	0.0000	108.0000	0.037333333	11.43	10.35	3893.59
Bottom Long 3 Flange BE	-0.35897	0.154474	0.025	0.004	0.0001	0.0000	0.0000	18.0000	0.013333333	0.52	0.06	1150.09
Bottom Long 4 Web BE	0	0	0.07	0	0	0.0000	0.0000	108.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bottom Long 4 Flange BE	0	0	0.025	0	0	0.0000	0.0000	18.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bottom Long 5 Web BE	0	0	0.07	0	0	0.0000	0.0000	108.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bottom Long 5 Flange BE	0	0	0.025	0	0	0.0000	0.0000	18.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bottom Long 6 Web BE	0	0	0.07	0	0	0.0000	0.0000	108.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00
Bottom Long 6 Flange BE	0	0	0.025	0	0	0.0000	0.0000	18.0000	0.000000000	0.00	0.00	0.00

Somando os valores das colunas “ILN” (Iy’’) da Tabela 38 obtêm-se o seguinte valor:

$$\sum I_{y''} = 553483.2 \text{ cm}^4 \quad (125)$$

Usando a equação (66):

$$Z = \frac{\sum I_i}{y} = \frac{553483.2}{87.6405} = 6315.38 \text{ cm}^3 \quad (126)$$

ANEXO 4 - EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS RELACIONADOS A PRINCÍPIOS DE PROJETO E CARREGAMENTOS DE PROJETO

Todos os cálculos executados nesse anexo, usarão como exemplo o seguinte modelo otimizado:

Tabela 39 - Dados de exemplo de embarcação otimizada (fonte: autor)

l(m)	0.8
l_bar_keel (mm)	90
l_bar_keel_flange (mm)	30
l_bottom_long_flange(mm)	25
l_bottom_long_web(mm)	70
l_bottom_transverse_flange(mm)	65
l_bulk_flange(mm)	25
l_bulk_web(mm)	65
l_deck_long_flange(mm)	25
l_deck_long_web(mm)	55
l_side_long_flange (mm)	30
l_side_long_web (mm)	45
l_side_transverse_flange (mm)	25
ncl	1
nl	3
t_bar_keel (mm)	5
t_bar_keel_flange (mm)	5
t_bottom(mm)	4.76
t_bottom_long (mm)	4
t_bottom_transverse (mm)	4.76
t_bottom_transverse_flange(mm)	6
t_bulk_long(mm)	4
t_bulkhead(mm)	4
t_deck (mm)	3
t_deck_long(mm)	4
t_flate_plate_keel (mm)	6
t_sheer_bar (mm)	7.94
t_side (mm)	4
t_side_long (mm)	4
t_side_transverse_flange (mm)	6
t_side_transverse_web (mm)	4

Nesse modelo, usando as expressões já demonstradas anteriormente, chega-se a seguinte configuração de embarcação:

Tabela 40 - Tabela do resultado das variáveis dependentes e funções objetivo de embarcação otimizada (fonte: autor)

Abreviação	Valor	Variável	Descrição
D(m)	1.37	D_	Altura do convés
L(m)	6.69	L_	Comprimento de linha d'água no calado de projeto
B(m)	3.21	B_	Boca
Cb	0.38	CB	Coefficiente de Bloco
T(m)	0.41	T_	Calado de Projeto
V(nós)	30	V_	Velocidade máxima da lancha
Δ(ton)	3.24	Δ	Deslocamento no calado de projeto
l_bottom_transverse_web (mm)	235	l_bottom_transverse_web	Comprimento da alma da hastilha
l_side_transverse_web (mm)	200	l_side_transverse_web	Comprimento da alma da caverna
l_sheer_bar(mm)	50	l_sheer_bar	Comprimento da Sheer Bar
Peso (Kg)	864.42	Peso	Peso da estrutura a ser otimizada
Volume de Solda (Centilitros)	461.73	V_Solda	Volume de solda
Aprovado (sim = 0, não = 1)	0	Aprovado	sim = 0, não = 1,2,3 ...
Varição de Posição do CG	0.015	Var_CG	Varição de posição do centro de gravidade (m)
s(m)	0.3900	s_	Espaçamento entre longitudinais
s_cost(m)	0.333	s_cost	Espaçamento longitudinais do costado

EXEMPLO DE CÁLCULO DA POSIÇÃO DA ANTEPARA DE COLISÃO:

Sendo $L = 6.69\text{m}$ (comprimento de linha d'água) no calado de projeto (extraído da Tabela 40) dessa embarcação otimizada (usando equações (67) e (68)), obtém-se:

$$x_c(\text{minimum}) = 0.05 * (6.69) = 0.3345\text{m} \quad (127)$$

$$x_c(\text{maximum}) = 3 + 0.05 * (6.69) = 3.3345\text{m} \quad (128)$$

A posição da antepara é de 1.35m da perpendicular de vante, portanto passa no teste.

EXEMPLO DE CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ONDA:

Sendo $L = 6.69\text{m}$ no calado de projeto dessa embarcação otimizada (usando equação (69)), obtém-se:

$$C_w = 0.08 * L = 0.08 * 6.69 = 0.5352 \quad (129)$$

Porém a Tabela 4 fornece uma redução de C_w de acordo com o tipo de serviço operado pela lancha, foi escolhido o serviço R3 (operando em forma costeira), que fornece uma redução de 20% do coeficiente de onda:

$$C_w = 0.5352 * (1 - 0.2) = 0.4282 \quad (130)$$

EXEMPLO DE CÁLCULO DA ACELERAÇÃO VERTICAL DE PROJETO:

Para o cálculo da aceleração vertical de projeto usa-se a seguinte expressão extraída da equação (70):

$$a_{cg} = \frac{V}{\sqrt{L}} * \frac{3.2}{L^{0.76}} * f_g * g_0 \quad (131)$$

Para o projeto, foi escolhido a restrição de serviço de área R3 (costeiro), portanto:

$f_g = 1$ (obtido da Tabela 5 usando a restrição de serviço R3 para lancha “Patrol”)

$V = 30$ nós (extraído do projeto original)

$L = 6.69\text{m}$ (extraído da Tabela 40)

$g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2$

Porém, $\frac{V}{\sqrt{L}}$ não pode ser tomado sendo maior que 3, sendo:

$$\frac{V}{\sqrt{L}} = \frac{30}{\sqrt{6.69}} = 11.59 \quad (132)$$

Então:

$$a_{cg} = \frac{V}{\sqrt{L}} * \frac{3.2}{L^{0.76}} * f_g * g_0 = 3 * \frac{3.2}{6.69^{0.76}} * 1 * 9.81 = 22.21\text{m/s}^2 \quad (133)$$

EXEMPLO DE CÁLCULO DA ACELERAÇÃO HORIZONTAL DE PROJETO:

Para o projeto de exemplo foi escolhido os seguintes valores das variáveis:

$V = 30$ nós (extraído do projeto original)

$L = 6.69\text{m}$ (Tabela 40)

$g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2$

$C_w = 0.4282$ (obtido na equação (129))

Porém, $\frac{V}{\sqrt{L}}$ não pode ser tomado sendo maior que 4, então o valor ficará 4, portanto usando também equação (130) e (71), tem-se:

$$\begin{aligned} a_l &= 2.5 * \frac{C_w}{L} * \left(0.85 + 0.25 * \frac{V}{\sqrt{L}}\right)^2 * g_0 \\ &= 2.5 * \frac{0.4282}{6.69} * (0.85 + 0.25 * 4)^2 * 9.81 \\ &= 5.37\text{m/s}^2 \end{aligned} \quad (134)$$

EXEMPLO DE CÁLCULO DE PRESSÃO DE SLAMMING NO FUNDO:

A seguinte equação é obtida da equação (72) para o cálculo de pressão de *slamming* no fundo:

$$P_{sl} = 1.3 * k_l * \left(\frac{\Delta}{nA}\right)^{0.3} * T_0^{0.7} * \frac{50 - \beta_x}{50 - \beta_{cg}} * a_{cg} \quad (135)$$

Na figura abaixo, é mostrado como foi medido o β_{cg} :

Portanto usando o valor de calado da Tabela 40 ($T=0.4117m$) e a equação (137), obtêm-se:

$$\begin{aligned} \beta_{cg}(0.41) &= -17.22 * (0.4117)^2 + 23.868 * (0.4117) \\ &+ 4.7837 = 11.69 \text{ graus} \end{aligned} \quad (138)$$

Para achar o valor de β_x , foi usado o mesmo valor de β_{cg} de forma a simplificar o cálculo, e de forma a obter o maior valor de pressão para seções a vante, visto que o ângulo β_x aumentaria e conseqüentemente a pressão iria diminuir nessas seções. Portanto $\beta_x = 11.69$ graus.

Também é necessário o cálculo da variável A (Área de carga de projeto do elemento considerado), porém essa área terá variação de acordo com o elemento estrutural considerado. Portanto a variável A foi dividida em 5:

A_bottom = chapas do fundo

A_bottom_long = reforços longitudinais do fundo

A_bottom_transv = reforços transversais do fundo (hastilha)

A_bulk_long = reforços das anteparas

A_side_transverse = reforço transversal do costado (caverna)

Para se obter A_bottom, usa-se expressões da Figura 36:

- A_bottom não deve ser maior do que $2.5s^2 = 2.5 * (0.39)^2 = 0.38 \text{ m}^2$

- Para $l/s < 2.5$. A_bottom deve ser espaçamento x span. $l/s = 2.05$, então

$$A_{\text{bottom}} = 1 * s = 0.312\text{m}^2$$

- Para qualquer estrutura A_bottom não pode ser menor que:

$$0.002 * \frac{\Delta}{T} = 0.002 * \frac{3.24}{0.41} = 0.0158\text{m}^2$$

Portanto $A_{\text{bottom}} = 0.312\text{m}^2$.

Para se obter A_bottom_long, usa-se expressões da Figura 36:

- Para qualquer estrutura A_bottom não pode ser menor que:

$$0.002 * \frac{\Delta}{T} = 0.002 * \frac{3.24}{0.41} = 0.0158\text{m}^2$$

- Para reforçador ou viga A_bottom_long deve ser: $sl = 0.39 * 0.8 = 0.312\text{m}^2$

Portanto $A_{\text{bottom_long}} = 0.312\text{m}^2$

De forma semelhante, se obtêm os valores de A_bottom_transv, A_bulk_long e A_side_transverse, porém em:

- A_{bottom_transv} : $s = 0.8\text{m}$ e $l = \text{span da hastilha} = 2.38\text{m}$; resultando em $A_{bottom_transv} = 1.904\text{m}^2$

- A_{bulk_long} : $s = 0.39\text{ m}$ e $l = \text{span bulk} = 0.8\text{ m}$; resultando em $A_{bulk_long} = 0.312\text{ m}^2$

- $A_{side_tranverse}$: $s = 0.8\text{ m}$ e $l = \text{span caverna} = 0.73\text{ m}$; resultando em $A_{bulk_long} = 0.584\text{ m}^2$

Usando a equações (135), (133), Tabela 40 e as áreas obtidas anteriormente chega-se à pressão de slamming para cada elemento:

$$Psl_{bottom} = 1.3 * 1 * \left(\frac{3.24}{1 * 0.312} \right)^{0.3} * 0.41^{0.7} * \frac{50 - 11.69}{50 - 11.69} * 22.21 = 31.308 \text{ Kn/m}^2 \quad (139)$$

$$Psl_{bottom_long} = 1.3 * 1 * \left(\frac{3.24}{1 * 0.312} \right)^{0.3} * 0.41^{0.7} * \frac{50 - 11.69}{50 - 11.69} * 22.21 = 31.308 \text{ Kn/m}^2 \quad (140)$$

$$Psl_{bottom_tranv} = 1.3 * 1 * \left(\frac{3.24}{1 * 1.904} \right)^{0.3} * 0.41^{0.7} * \frac{50 - 11.69}{50 - 11.69} * 22.21 = 18.197 \text{ Kn/m}^2 \quad (141)$$

$$Psl_{bulk_long} = 1.3 * 1 * \left(\frac{3.24}{1 * 0.312} \right)^{0.3} * 0.41^{0.7} * \frac{50 - 11.69}{50 - 11.69} * 22.21 = 31.308 \text{ Kn/m}^2 \quad (142)$$

$$Psl_{side_tranv} = 1.3 * 1 * \left(\frac{3.24}{1 * 0.584} \right)^{0.3} * 0.41^{0.7} * \frac{50 - 11.69}{50 - 11.69} * 22.21 = 25.941 \text{ Kn/m}^2 \quad (143)$$

EXEMPLO DE CÁLCULO DA PRESSÃO DO MAR:

Para calcular a pressão no mar, foi escolhido ser conservador no projeto, foi adotado o pior “ks” possível, ou seja, o “ks” na posição de FP, por isso foi plotado o seguinte gráfico correlacionando o Cb com o “ks” para esse pior caso:

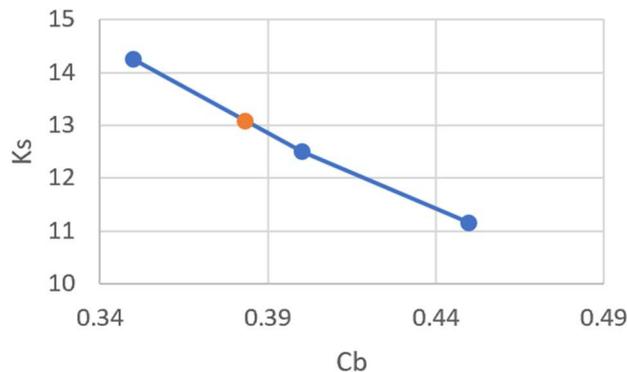


Figura 75 - gráfico correlacionando Cb e Ks (fonte: autor)

Valores intermediários de Cb seriam obtidos através de interpolação linear.

Para o Cb = 0.38 do exemplo, o ks é 13.08.

Foram escolhidas as seguintes alturas para o cálculo da pressão lateral:

- H0_deck (altura do deck) = 1.01m
- H0_sheer_bar (altura do sheer bar) = 0.95m
- H0_side_plating_bellow (altura com maior pressão do costado abaixo da linha d'água) = 0.0079m
- H0_side_plating_above (altura com maior pressão do costado acima da linha d'água) = 1.01 m
- H0_side_long_1 (altura do reforçador longitudinal do costado) = 0.49 m
- H0_side_transverse_below (altura com maior pressão da caverna abaixo da linha d'água = 0.0079 m
- H0_side_transverse_above (altura com maior pressão da caverna acima da linha d'água = 1.01 m

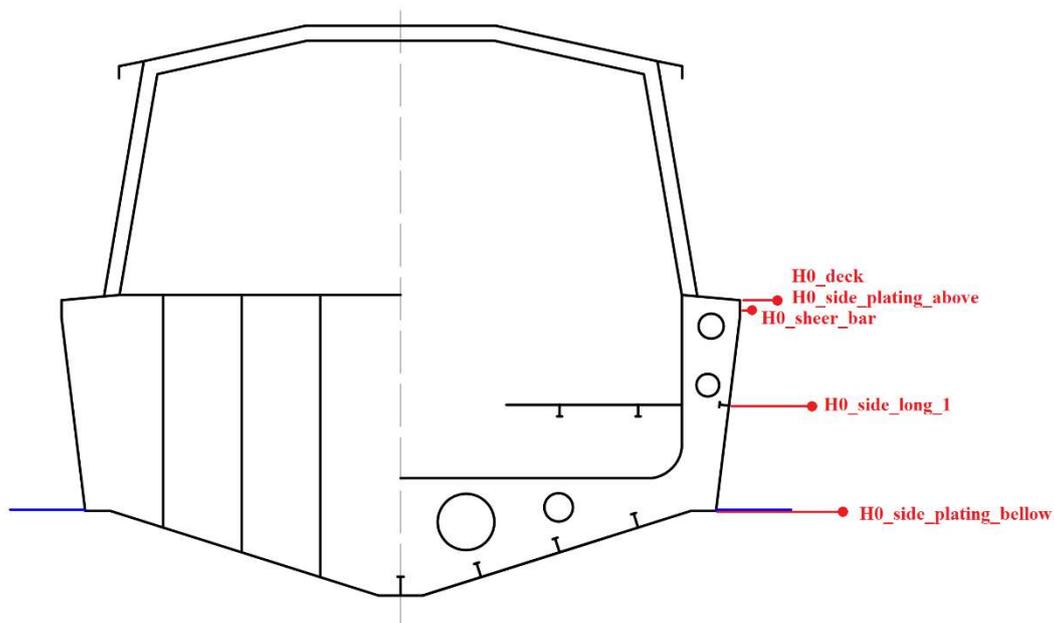


Figura 76 - Figura representando as alturas escolhidas para medir as pressões na lancha de exemplo (fonte: autor)

Importante observar que a lancha usada como exemplo, só possui um único reforçador no costado, porém a planilha de cálculo, calcula também as alturas dos outros reforçadores do costado, caso o ncl (número de reforçadores no costado) seja maior que 1. Também vale mencionar que o H0 sempre mede a distância até a linha d'água, sendo acima ou abaixo dela, dependendo do ponto de pressão.

Para elementos estruturais abaixo da linha d'água a equação (73) fornece a seguinte equação:

$$p = 10 * h0 + \left(k_s - 1.5 \frac{h0}{T} \right) * C_w \quad (144)$$

Então pode-se calcular $p_{side_plating_bellow}$ e $p_{side_transverse_below}$ (maior pressão do mar do costado e caverna abaixo da linha d'água) e usando H0, ks obtido, Cw obtido e equação (144):

$$\begin{aligned} p_{side_plating_bellow} &= 10 * 0.0079 + \left(13.08 - 1.5 \frac{0.0079}{0.41} \right) * 0.428 = 3.25 \text{ kN/m}^2 \end{aligned} \quad (145)$$

$$\begin{aligned}
p_{\text{side_transverse_below}} &= 10 * 0.0079 + \left(13.08 - 1.5 \frac{0.0079}{0.41} \right) \\
&* 0.428 = 3.25 \text{ kN/m}^2
\end{aligned} \tag{146}$$

Porém a Tabela 6 estipula que a pressão mínima para a condição de serviço escolhida (R3) é $p = 6.5 \text{ KN/m}^2$. Portanto:

$$p_{\text{side_plating_bellow}} = 6.5 \text{ kN/m}^2 \tag{147}$$

$$p_{\text{side_transverse_below}} = 6.5 \text{ kN/m}^2 \tag{148}$$

As pressões dos elementos estruturais acima da linha d'água podem ser também calculadas usando a seguinte equação retirada da equação (74):

$$p = a * k_s * (C_w - 0.67 * h_0) \tag{149}$$

Onde,

$a = 1$ (valor usado para costado e deque de borda livre aberta)

$C_w = 0.4282$ (retirado da equação (130))

$K_s = 13.08$ (retirado de interpolação dos valores da Figura 75)

Portanto usando (149) e os H_0 obtidos anteriormente:

$$\begin{aligned}
p_{\text{deck}} &= 1 * 13.08 * (0.4282 - 0.67 * 1.01) \\
&= -3.358 \text{ kN/m}^2
\end{aligned} \tag{150}$$

$$\begin{aligned}
p_{\text{sheer_bar}} &= 1 * 13.08 * (0.4282 - 0.67 * 0.95) \\
&= -2.832 \text{ kN/m}^2
\end{aligned} \tag{151}$$

$$\begin{aligned}
p_{\text{side_plate_above}} &= 1 * 13.08 * (0.4282 - 0.67 * 1.01) \\
&= -3.358 \text{ kN/m}^2
\end{aligned} \tag{152}$$

$$\begin{aligned}
p_{\text{side_long}_1} &= 1 * 13.08 * (0.4282 - 0.67 * 0.49) \\
&= -1.307 \text{ kN/m}^2
\end{aligned} \tag{153}$$

$$\begin{aligned}
 p_{\text{side_transverse_above}} &= 1 * 13.08 * (0.4282 - 0.67 * 1.01) \\
 &= -3.358 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}
 \tag{154}$$

Porém na Tabela 6 se estipula que a pressão mínima para a condição de serviço escolhida (R3) é $p = 5 \text{ KN/m}^2$ para o deque e $p = 6.5 \text{ KN/m}^2$ para o restante dos elementos estruturais. Portanto:

$$p_{\text{deck}} = 5 \text{ kN/m}^2 \tag{155}$$

$$p_{\text{sheer_bar}} = 6.5 \text{ kN/m}^2 \tag{156}$$

$$p_{\text{side_plate_above}} = 6.5 \text{ kN/m}^2 \tag{157}$$

$$p_{\text{side_long_1}} = 6.5 \text{ kN/m}^2 \tag{158}$$

$$p_{\text{side_transverse_above}} = 6.5 \text{ kN/m}^2 \tag{159}$$

EXEMPLO DE CÁLCULO DA ÁREA DE REFERÊNCIA:

Para o cálculo da área de referência, as seguintes variáveis foram usadas no modelo de exemplo:

$$k = 0.7 \text{ (usado o pior caso)}$$

$$\Delta = 3.24 \text{ ton (deslocamento retirado da Tabela 40)}$$

$$acg = 22.21 \text{ m/s}^2 \text{ (aceleração vertical do centro de gravidade retirado da equação (133))}$$

$$g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2 \text{ (aceleração da gravidade)}$$

$$T = 0.4111 \text{ m (calado retirado da Tabela 40)}$$

Assim, a área de referência pode ser calculada usando a equação (75) :

$$A_R = 0.7 * 3.2408 * \frac{\left(1 + 0.2 * \frac{22.21}{9.81}\right)}{0.4111} = 8.004 \text{ m}^2
 \tag{160}$$

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DE EW:

Usando $L = 6.69\text{m}$ da Tabela 40 e equação (77), obtém-se:

$$e_w = 0.25 * 6.69 = 1.6725 \quad (161)$$

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DA EXTENSÃO LONGITUDINAL DA ÁREA DE REFERÊNCIA DE SLAMMING:

Para o caso do exemplo de lancha usado, as variáveis tem o seguinte valor:

$$A_R = 8.004 \text{ m}^2 \text{ (retirado da equação (160))}$$

$$B_s = 3.21 \text{ m (boca retirado da Tabela 40)}$$

Portanto usando equação (78):

$$l_s = \frac{8.004}{3.21} = 2.49 \quad (162)$$

EXEMPLO NUMÉRICO DO CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR LONGITUDINAL NO MEIO DO NAVIO:

Para o caso do exemplo de lancha usado, as variáveis tem o seguinte valor:

$$\Delta = 3.24 \text{ ton (deslocamento retirado da Tabela 40)}$$

$$ac_g = 22.21 \text{ m/s}^2 \text{ (aceleração vertical do centro de gravidade retirado da equação (133))}$$

$$g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2 \text{ (aceleração da gravidade)}$$

$$e_w = 1.6725 \text{ (equação (161))}$$

$$l_s = 2.49 \text{ (equação (162))}$$

Com esses valores calculados, já se pode calcular o valor do momento fletor longitudinal no meio do navio (crest) usando equação (76):

$$\begin{aligned} M_{B_CREST} &= \frac{3.24}{2} * (9.81 + 22.21) * \left(1.6725 - \frac{2.49}{4} \right) \\ &= 54.4 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (163)$$

EXEMPLO NUMÉRICO DE CALCULO DO MOMENTO FLETOR LONGITUDINAL NO MEIO DO NAVIO NO CAVADO (HOLLOW):

Portanto para o exemplo da lancha usado, usando equação (80) e Tabela 40 tem-se:

$$(e_r - e_w) = 0.04 * 6.69 = 0.2676 \quad (164)$$

Para o caso do exemplo de lancha usado, as variáveis tem o seguinte valor:

$$\Delta = 3.24 \text{ ton (deslocamento retirado da Tabela 40)}$$

$$acg = 22.21 \text{ m/s}^2 \text{ (aceleração vertical do centro de gravidade retirado da equação (133))}$$

$$g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2 \text{ (aceleração da gravidade)}$$

$$e_r - e_w = 0.2676 \text{ (equação (164))}$$

Com esses valores calculados, já se pode calcular o valor do momento fletor longitudinal no meio do navio (crest) usando equação (79):

$$\begin{aligned} M_{B_HOLLOW} &= \frac{3.24}{2} * (9.81 + 22.21) * (0.2676) \\ &= 13.88 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (165)$$

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DOS MOMENTOS FLETORES DE ALQUEBRAMENTO E TOSAMENTO:

Para o modelo de exemplo de lancha utilizado, pode se calcular o momento fletor de água parada de alquebramento usando as equações (81), (130) e Tabela 40:

$$\begin{aligned} M_{SW_hog} &= 0.11 * 0.4282 * 6.69^2 * 3.21 * 0.3834 \\ &= 2.59 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (166)$$

Para o modelo de exemplo de lancha utilizado, pode se calcular o momento fletor de alquebramento (*Hog*) usando as equações (130), (166), (82) e Tabela 40:

$$\begin{aligned} M_{tot_hog} &= 2.59 + 0.19 * 0.4282 * 6.69^2 * 3.21 * 0.3834 \\ &= 7.07 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (167)$$

Para o tosamento, sabendo que $M_{SW_sag} = 0$ como já dito anteriormente, e usando a equação (83) e a Tabela 40, pode se calcular o momento fletor longitudinal de tosamento (*Sag*) para o modelo de exemplo de lancha utilizado:

$$M_{tot_sag} = 0 + 0.14 * 0.4282 * 6.69^2 * 3.21 * (0.3834 + 0.7) = 9.33kNm \quad (168)$$

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DAS FORÇAS DE CISALHAMENTO DEVIDO AOS MOMENTOS FLETORES:

Usando a equação (84) no modelo de exemplo de lancha utilizado, pode-se calcular as forças de cisalhamento dos momentos M_{B_CREST} , M_{B_HOLLOW} , M_{tot_ho} e M_{tot_sag} , usando as equações (163), (165), (167), (168) e a Tabela 40:

$$Q_{b_MB_crest} = \frac{M_{B_CREST}}{0.25 * L} = \frac{54.45}{0.25 * 6.69} = 32.55kN \quad (169)$$

$$Q_{b_MB_hollow} = \frac{M_{B_HOLLOW}}{0.25 * L} = \frac{13.88}{0.25 * 6.69} = 8.3kN \quad (170)$$

$$Q_{b_Mtot_hog} = \frac{M_{tot_hog}}{0.25 * L} = \frac{7.07}{0.25 * 6.69} = 4.23kN \quad (171)$$

$$Q_{b_Mtot_sag} = \frac{M_{tot_sag}}{0.25 * L} = \frac{9.33}{0.25 * 6.69} = 5.58kN \quad (172)$$

EXEMPLO DE CÁLCULO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA SEÇÃO MESTRA:

Das informações da Tabela 40, e usando a equação (85) pode-se calcular a área da seção mestra da lancha do exemplo, que será:

$$A_{mestra} = 0.0287m^2 \quad (173)$$

Usando as equações (169), (170), (171), (172), (173) e (86) pode-se calcular a tensão de cisalhamento para cada um dos momentos já calculados:

$$\tau_{Qb_MB_crest}(MPA) = \frac{32.55}{0.0287} * 10^{-3} = 1.13 MPA \quad (174)$$

$$\tau_{Qb_MB_hollow}(MPA) = \frac{8.3}{0.0287} * 10^{-3} = 0.289MPA \quad (175)$$

$$\tau_{Qb_Mtot_hog}(MPA) = \frac{4.23}{0.0287} * 10^{-3} = 0.147MPA \quad (176)$$

$$\tau_{Qb_Mtot_sag}(MPA) = \frac{5.58}{0.0287} * 10^{-3} = 0.194MPA \quad (177)$$

A tensão de escoamento de chapas de alumínio é 195MPa enquanto para perfis extrudados do alumínio é 240MPa, portanto a lancha de exemplo passa no teste de tensão de cisalhamento.

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DAS CARGAS AXIAIS DEVIDO AO AVANÇO DA EMBARCAÇÃO (*SURGE*):

Sendo:

Δ = deslocamento = 3.23t

al = 0.4g0 (escolhido o pior caso) em m/s²

g0 = aceleração da gravidade de 9,81 m/s²

Para o modelo de exemplo de lancha utilizado, pode se calcular o esforço axial devido ao avanço da embarcação (*Surge*) usando a equação (87) e Tabela 40:

$$surge(KN) = 3.23 * 0.4 * 9.81 = 12.68 KN \quad (178)$$

Usando as equações (173), (87) e (88) pode-se calcular a tensão devido ao avanço da embarcação (*Surge*) para o modelo de exemplo de lancha utilizado:

$$\sigma_{surge}(MPa) = \frac{12.68}{0.0287} * 10^{-3} = 0.44MPa$$

A tensão de escoamento de chapas de alumínio é 195MPa enquanto para perfis extrudados do alumínio é 240MPa, portanto a lancha de exemplo passa no teste de tensão de axial.

ANEXO 5 - EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS RELACIONADOS AO PROJETO ESTRUTURAL DO CASCO DE ALUMÍNIO

Os exemplos numéricos desse anexo, usarão os dados de exemplo da lancha da Tabela 33.

EXEMPLO DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA A FLEXÃO VERTICAL

Para o cálculo de resistência a flexão vertical se usará os seguintes dados:

$$M = 54.4 \text{ kNm (retirado da equação (163))}$$

$f_1 = 0.71$ (menor valor entre chapas ou perfis extrudados obtido comparando Tabela 7 e Tabela 8)

$$\sigma = 175 * 0.71 = 124.25 \text{ N/mm}^2$$

Usando os valores acima e a equação (89):

$$Z = \frac{54.4}{124.25} * 10^3 = 437.8 \text{ cm}^3 \quad (179)$$

Comparando esse valor com o módulo de seção da embarcação calculado na equação (126), observe-se que o valor requerido na equação (179) é menor, portanto, a embarcação resiste a flexão vertical.

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DE ESPESSURA MÍNIMA DE CHAPA

Da equação (90) se obtém a seguinte expressão usada para o cálculo da espessura mínima:

$$t = \frac{t_0 + kL}{\sqrt{f}} * \frac{s}{S_R} \quad (180)$$

Para o exemplo, será calculado a espessura mínima de uma chapa no deque, então:

$t_0 = 2.5$ (retirado da Tabela 10)

$k = 0.02$ (retirado da Tabela 10)

$f = \sigma_f / 240$ (onde $\sigma_f = 195 \text{ N/mm}^2$ = tensão de escoamento para chapa de alumínio)

$s = 0.39 \text{ m}$ (retirado da Tabela 40)

$s_R = \frac{2 \cdot (100 + L)}{1000} = 0.213$ (onde $L = 6.69 \text{ m}$ retirado da Tabela 40)

$$\frac{s}{s_R} = 1.83$$

Porém s/s_R não pode ser menor que 0.5 nem maior que 1, portanto:

$$\frac{s}{s_R} = 1$$

Portanto usando os dados acima e a equação (180):

$$t_{\min_deque} = \frac{2.5 + 0.02 \cdot 6.69}{\sqrt{0.8125}} \cdot 1 = 2.92 \text{ mm} \quad (181)$$

Portanto, a espessura de fundo ($t_{deck} = 3.00 \text{ mm}$) escolhida na Tabela 39 é suficiente para esse critério.

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DE ESPESSURA MÍNIMA DE CHAPA SUJEITA A PRESSÃO LATERAL

Da equação (91), se obtém a seguinte expressão usada para o cálculo da espessura mínima de chapas sujeitas a pressão lateral:

$$t = \frac{22.4 \cdot s \cdot \sqrt{p}}{\sqrt{\sigma}} \quad (182)$$

Para o exemplo, será calculado a espessura mínima de uma chapa no deque, então:

$s = 0.39 \text{ m}$ (retirado da Tabela 40)

$p = 5 \text{ kN/m}^2$ (retirado da equação (155))

$\sigma = 180 \text{ fl} = 144 \text{ N/mm}^2$ (fl = 0.8 retirado da Tabela 7 e Tabela 11)

Portanto usando os dados acima e a equação (182):

$$t_{\min_deque_P_lateral} = \frac{22.4 * 0.39 * \sqrt{5}}{\sqrt{144}} = 1.62mm \quad (183)$$

Portanto, a espessura de fundo ($t_{deck} = 3.00mm$) escolhida na Tabela 39 é suficiente para esse critério.

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DE ESPESSURAS MÍNIMAS DE CHAPA SUJEITA A PRESSÃO DE *SLAMMING*

Da equação (92), se obtém a seguinte expressão usada para o cálculo da espessura mínima de chapas sujeitas a pressão de *slamming*:

$$t = \frac{22.4 * k_r * k_a * s * \sqrt{P_{sl}}}{\sqrt{\sigma_{sl}}} \quad (184)$$

Para o exemplo, será calculado a espessura mínima de uma chapa no fundo, então:

$k_a = 1$ (foi escolhido o máximo valor para ser mais conservador e simples)

$k_r = 1$ (foi escolhido o máximo valor para ser mais conservador e simples)

$s = 0.39m$ (retirado da Tabela 40)

$P_{sl} = 31.308 \text{ kN/m}^2$ (retirado da equação (139))

$\sigma_{sl} = 200f_l = 160 \text{ N/mm}^2$ ($f_l = 0.8$ retirado da Tabela 7)

Portanto usando os dados acima e a equação (184):

$$t_{\min_bottom_Psl} = \frac{22.4 * 1 * 1 * 0.39 * \sqrt{31.308}}{\sqrt{160}} = 3.86mm \quad (185)$$

Portanto, a espessura de fundo ($t_{bottom} = 4.76mm$) escolhida na Tabela 39 é suficiente para esse critério.

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DE ESPESSURA MÍNIMA DE REFORÇADOR

Da equação (93), se obtém a seguinte expressão usada para o cálculo da espessura mínima de reforçadores:

$$t = \frac{t_0 + k * L}{\sqrt{f}} * \frac{s}{s_R} \quad (186)$$

Para o exemplo, será calculado a espessura mínima do reforçador do fundo, então:

$t_0 = 3$ (retirado da Tabela 12)

$k = 0.03$ (retirado da Tabela 12)

$f = \sigma_f / 240 = 1$ (onde $\sigma_f = 240 \text{ N/mm}^2$ =tensão de escoamento para perfis extrudados de alumínio)

$s = 0.39 \text{ m}$ (retirado da Tabela 40)

$s_R = \frac{2*(100+L)}{1000} = 0.213$ (onde $L = 6.69\text{m}$ retirado da Tabela 40)

$$\frac{s}{s_R} = 1.83$$

Porém s/s_R não pode ser menor que 0.5 nem maior que 1.0, portanto:

$$\frac{s}{s_R} = 1$$

Portanto usando os dados acima e a equação (186):

$$t_{bottom_long} = \frac{3 + 0.03 * 6.69}{\sqrt{1}} * 1 = 3.20 \text{ mm} \quad (187)$$

Portanto, a espessura da longitudinal do fundo ($t_{bottom_long} = 4.00\text{mm}$) escolhida na Tabela 39 é suficiente para esse critério.

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DO MÓDULO DE SEÇÃO MÍNIMO DE REFORÇADOR SUJEITO A PRESSÃO LATERAL

Da equação (94), se obtém a seguinte expressão usada para o cálculo do módulo de seção mínimo de reforçadores ou vigas sujeitos a pressão lateral:

$$Z = \frac{m * l^2 * s * p}{\sigma} \quad (188)$$

Para o exemplo, será calculado o módulo de seção mínimo do reforçador do costado, então:

$$m = 85 \text{ (obtido na Tabela 13)}$$

$$l = 0.8 \text{ m (retirado da Tabela 39)}$$

$$s = 0.333\text{m (retirado da Tabela 40)}$$

$$p = 6.5 \text{ kN/m}^2 \text{ (obtido na equação (158))}$$

$$\sigma = 160f_l = 160 * 0.71 = 113.6 \text{ N/mm}^2 \text{ (retirado da Tabela 11 usando } f_l \text{ da Tabela 9)}$$

Portanto usando os dados acima e a equação (188):

$$Z_{\min_lat_pres_side_long} = \frac{85 * 0.8^2 * 0.333 * 6.5}{113.6} = 1.036 \text{ cm}^3 \quad (189)$$

Usando a seguinte expressão, pode-se calcular o módulo de seção do reforçador de costado:

$$Z_{side_long} = \frac{I}{y} = 2.283 \text{ cm}^3 \quad (190)$$

Portanto, o módulo de seção do reforçador do costado (Z_{side_long}) é suficiente para esse critério.

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DO MÓDULO DE SEÇÃO MÍNIMO DE REFORÇADOR SUJEITO A PRESSÃO DE *SLAMMING*

Da equação (95), se obtém a seguinte expressão usada para o cálculo do módulo de seção mínimo de reforçadores ou vigas sujeitos a pressão de *slamming*:

$$Z = \frac{m * l^2 * s * p_{sl}}{\sigma_{sl}} \quad (191)$$

Para o exemplo, será calculado o módulo de seção mínimo do reforçador do fundo, então:

$m = 85$ (valor usado em reforçadores longitudinais)

$l = 0.7$ m (usado um spam menor que da Tabela 39, por se considerar com *bracket*)

$s = 0.39$ m (retirado da Tabela 40)

$p_{sl} = 31.308$ kN/m² (retirado da equação (140))

$\sigma_{sl} = 180f_l = 136.8$ N/mm² ($f_l = 0.76$ obtido da Tabela 8)

Portanto usando os dados acima e a equação (191):

$$\begin{aligned} Z_{\min_slam_bottom_long} &= \frac{85 * 0.7^2 * 0.39 * 31.308}{136.8} \\ &= 3.71 \text{ cm}^3 \end{aligned} \quad (192)$$

Usando a seguinte expressão, pode-se calcular o módulo de seção do reforçador do fundo:

$$Z_{bottom_long} = \frac{I}{y} = 4.81 \text{ cm}^3 \quad (193)$$

Portanto, o módulo de seção do reforçador do costado (Z_{bottom_long}) é suficiente para esse critério.

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DE FLAMBAGEM DE CHAPA SOB COMPRESSÃO

Da equação (97), se obtém a seguinte expressão usada para o cálculo da tensão de flambagem elástica de chapas:

$$\sigma_{el} = 0.9 * k * E * \left(\frac{t}{1000 * s} \right)^2 \quad (194)$$

Para o exemplo, será calculado tensão de flambagem elástica de uma chapa no fundo, então:

$$k = 8.4 / (\psi + 1.1) = 4, \text{ sendo } \psi = 1, \text{ por considerar os piores casos}$$

$$E = 69000 \text{ N/mm}^2 \text{ (módulo de elasticidade do alumínio)}$$

$$t = 4.76 \text{ mm (retirada da Tabela 39)}$$

$$s = 0.39 \text{ m (retirado da Tabela 40)}$$

$M_z = 54400000 \text{ Nmm}$ (retirado da equação (163) por ser o maior valor dos momentos fletores)

$$y = 493 \text{ mm (distância do fundo até a linha neutra)}$$

$$I = 553483.2 * 10^4 \text{ mm}^4 \text{ (retirado da equação (125))}$$

Portanto usando os dados acima e a equação (194) e equação (98):

$$\sigma_{el} = 0.9 * 4 * 69000 * \left(\frac{4.76}{1000 * 0.39} \right)^2 = 37.00 \text{ N/mm}^2 \quad (195)$$

$$\sigma_a = \frac{54400000 * 493}{553483.2 * 10^4} = 4.84 \text{ N/mm}^2 \quad (196)$$

Da equação (99) retira-se a seguinte equação:

$$\sigma_c \geq \frac{\sigma_a}{\eta} \quad (197)$$

Usando,

$$\sigma_c = \sigma_{el} = 37.00 \text{ N/mm}^2$$

$$\eta = 0.9 \text{ (usado para chapas do fundo e antepara de forma a ser mais conservador)}$$

Portanto usando os dados acima e a equações (197) e (196):

$$37.00 \geq 5.37 \quad (198)$$

Como a diferença acima mostrada é verdadeira, a tensão de compressão devido ao momento fletor não supera a tensão de flambagem. Dessa forma, a chapa não sofre flambagem.

EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DE FLAMBAGEM DE REFORÇADOR SOB COMPRESSÃO

Da equação (100), se obtém a seguinte expressão usada para o cálculo da tensão de flambagem de reforçadores e vigas:

$$\sigma_{el} = 10 * \frac{E}{\left(100 * \frac{l}{\sqrt{\frac{I_A}{A}}}\right)^2} \quad (199)$$

Para o exemplo, será calculado tensão de flambagem de um reforçador no fundo, então:

Onde,

E = módulo de elasticidade do alumínio (69000 N/mm²)

l = 0.8 m (retirado da Tabela 39)

I_A = 88.98 cm⁴ (momento de inércia do reforçador do fundo)

A = 18.65 cm² (área do reforçador do fundo)

Portanto usando os dados acima e a equação (199):

$$\sigma_{el} = 10 * \frac{69000}{\left(100 * \frac{0.8}{\sqrt{\frac{88.98}{18.65}}}\right)^2} = 514.38 N/mm^2 \quad (200)$$

Fazendo $\sigma_c = \sigma_{el}$, $\eta = 0.9$ e usando equações (196), (197) (por se tratar da mesma região de compressão do fundo):

$$514.38 \geq 5.37 \quad (201)$$

Como a diferença acima mostrada é verdadeira, a tensão de compressão devido ao momento fletor não supera a tensão de flambagem. Dessa forma, o reforçador não sofre flambagem.

ANEXO 6 - RESULTADOS DOS DOES

I (tu)	ncd	nl	l_bar_keel (mm)	l_bar_keel_flange (mm)	l_bottom_long_flange (mm)	l_bottom_long_web (mm)	l_bottom_transverse_flange (mm)	l_bulk_flange (mm)	l_bulk_web (mm)	l_deck_long_flange (mm)	l_deck_long_web (mm)	l_side_long_flange (mm)	l_side_long_web (mm)	l_side_transverse_flange (mm)	Approvado	t_bar_keel (mm)	t_bar_keel_flange (mm)	t_bottom (mm)	t_bottom_long (mm)	t_bottom_transverse (mm)	t_bottom_transverse_flange (mm)	t_bulk_long (mm)	t_bulkhead (mm)	t_deck (mm)	t_deck_long (mm)	t_flare_plate_keel (mm)	t_sheer_bar (mm)	t_side (mm)	t_side_long (mm)	t_side_transverse_flange (mm)	t_side_transverse_web (mm)	Peso (Kg)	Variacao_CG (m)	Volume_Solda (cl)
0.5	0	1	85	40	55	35	15	95	40	50	0	70	35	0	6	4.76	7.94	5	4	6.35	4.76	4.76	5	5	7.94	6.35	6	12.7	5	4	1193.0	0.03	652.2	
0.5	0	1	80	30	35	55	35	0	90	40	55	10	70	35	0	6	4	7.94	4.76	4	6.35	5	4.76	5	5	9.53	6.35	6	9.53	6	4	1193.4	0.03	635.9
0.5	0	1	80	10	0	60	35	50	75	30	55	45	65	45	0	6	4.76	7.94	5	4	6.35	5	4.76	5	5	9.53	6.35	6	9.53	4.76	4	1193.0	0.03	638.2
0.5	0	1	85	40	55	35	5	85	40	50	15	70	40	0	6	4.76	7.94	5	4	6.35	5	4.76	5	5	7.94	6.35	6	12.7	4	4	1189.6	0.03	655.4	
0.6	0	1	95	45	55	75	55	25	65	40	75	45	45	30	0	6.35	4	7.94	4	4	6	6.35	5	4.76	4	7.94	6	6	6	5	4	1198.3	0.01	659.7
0.6	0	1	95	35	55	75	55	25	85	55	75	45	50	30	0	6.35	4.76	7.94	4	4	6	5	5	4.76	5	7.94	6	6	6	4.76	4	1199.5	0.01	643.6
0.8	0	1	95	50	0	90	60	30	75	15	65	75	35	35	0	7.94	5	7.94	5	5	7.94	5	4.76	4.76	6	7.94	9.53	6	9.53	4	4	1151.3	0.01	642.5
0.8	0	1	95	85	0	95	60	35	90	0	65	80	35	45	0	7.94	5	7.94	4.76	5	7.94	5	4.76	4.76	6	7.94	9.53	6	4	4.76	4	1159.5	0.01	630.5
0.8	0	1	95	55	0	85	60	35	75	15	45	80	35	5	0	7.94	5	7.94	6	5	7.94	5	4.76	4.76	6	7.94	9.53	6	7.94	4	4	1148.4	0.01	650.6
1	0	1	90	70	85	90	80	70	85	25	80	55	40	50	0	12.7	6.35	7.94	4.76	6	6.35	6	4.76	4.76	4.76	9.53	12.7	5	6.35	5	6	1119.2	0.04	716.5
1.2	0	1																																
0.5	0	2	95	25	0	70	0	0	80	35	70	75	25	0	0	6.35	5	6.35	5	5	0	6.35	4	3	6	6	7.94	6	7.94	0	4	1058.7	0.01	515.3
0.5	0	2	85	60	0	60	10	20	70	30	75	75	15	0	0	6.35	5	6.35	4.76	4.76	7.94	6.35	4	3	6.35	6	7.94	6	6.35	0	4	1058.6	0.01	585.7
0.6	0	2	75	60	0	55	50	45	55	30	90	50	55	55	0	6	4	6	6	4	6.35	6.35	4	5	4.76	7.94	5	6	6.35	4	4	1110.6	0.04	623.5
0.6	0	2	75	60	0	55	50	55	55	35	95	40	50	60	0	5	4.76	6	6	4	7.94	6	4	5	5	7.94	6	6	9.53	4	4	1120.7	0.04	608.2
0.6	0	2	75	60	0	55	50	45	50	30	95	40	40	70	0	5	4	6	6.35	4	7.94	6.35	4	5	4	7.94	5	6	7.94	4	4	1116.6	0.04	617.2
0.6	0	2	75	60	0	55	55	40	55	30	85	50	75	45	0	6.35	4.76	6	6	4	7.94	6.35	4	5	4	7.94	6	6	7.94	4	4	1115.0	0.03	622.7
0.8	0	2	85	40	0	85	40	5	95	60	75	65	40	0	0	7.94	4	6	5	5	9.53	4	5	6	4	6.35	9.53	5	6	0	4	1054.8	0.04	567.6
1	0	2	100	80	50	90	45	35	80	25	80	60	40	30	0	7.94	5	5	4	6.35	7.94	6.35	5	3	6.35	6.35	7.94	6.35	6.35	6	5	973.4	0.04	589.4
1	0	2	85	80	45	85	30	50	55	25	80	50	55	0	0	9.53	5	5	4	6.35	12.7	6.35	5	3	6.35	5	6.35	6.35	7.94	0	4	951.8	0.03	590.3
1	0	2	90	80	45	90	45	30	60	25	80	60	40	5	0	9.53	5	5	4	6.35	6.35	6.35	5	3	6.35	6.35	6.35	6.35	7.94	6	4	950.7	0.03	599.4
1.2	0	1																																
0.5	0	3	95	55	45	40	25	30	50	55	55	45	65	25	0	5	6.35	4.76	4	4	6.35	6.35	4	3	4	6.35	4.76	6	6.35	5	5	1005.7	0.04	610.9
0.5	0	3	95	30	45	40	20	10	65	50	30	45	60	5	0	5	15.87	4.76	4	4	6.35	6.35	4	3	4.76	6.35	5	6	6.35	6.35	5	996.3	0.03	619.0
0.5	0	3	90	35	45	40	30	15	60	55	45	45	60	10	0	5	12.7	4.76	4	4	6.35	6.35	4	3	4.76	6.35	4.76	6	7.94	6.35	4.76	1000.2	0.03	612.7
0.6	0	3	100	55	0	70	40	25	60	30	80	85	45	45	0	6.35	6	4.76	4	4.76	7.94	5	4	4.76	4	5	15.87	5	6.35	5	4.76	1053.0	0.06	568.2
0.6	0	3	100	55	0	70	40	25	60	30	80	80	50	45	0	6.35	6	4.76	4	4.76	7.94	5	4	4.76	4	5	15.87	5	7.94	5	4	1036.7	0.05	585.8
0.6	0	3	80	50	10	65	35	20	60	30	80	85	45	45	0	6.35	6	4.76	4	4.76	7.94	5	4	4.76	4	5	15.87	5	7.94	5	4	1036.7	0.05	585.8
0.8	0	3	95	50	40	70	75	40	75	40	55	65	80	45	0	5	6	4.76	4	5	6.35	4	4	3	4.76	5	9.53	6	6	4.76	4	967.9	0.04	506.3
0.8	0	3	90	50	30	70	70	35	60	45	60	65	70	50	0	5	6	4.76	4	5	6.35	4	4	3	4	5	9.53	6	7.94	4.76	5	965.2	0.04	513.0
0.8	0	3	90	55	30	70	70	35	60	45	55	65	70	50	0	5	6.35	4.76	4	4.76	6.35	4	4	3	4.76	5	9.53	6	5	4.76	5	963.5	0.04	517.0
1	0	3	100	25	45	75	60	35	75	25	85	65	60	45	0	6.35	6.35	5	5	6	6	4	4	3	4	5	12.7	6	7.94	6	4	949.2	0.03	544.1
1	0	3	95	20	25	80	65	15	75	20	90	60	60	45	0	7.94	7.94	5	4	6	6	5	4	3	4	5	12.7	6	5	5	4	932.6	0.04	548.8
1.2	0	3	85	75	15	100	85	0	65	25	65	30	50	70	0	12.7	7.94	4.76	4.76	6.35	6.35	6.35	5	3	6	6.35	9.53	6	9.53	6	5	1009.3	0.02	700.4
1.2	0	3	95	95	35	90	95	0	65	25	60	30	25	60	0	9.53	9.53	4.76	5	7.94	6.35	6.35	5	3	5	6	12.7	6	9.53	5	5	1040.9	0.01	677.9
0.5	0	4	95	60	0	40	15	0	60	25	60	80	70	40	0	4.76	4.76	4.76	5	5	6	6	4	3	4.76	6	4.76	6	7.94	5	4	1007.1	0.03	574.9
0.5	0	4	95	55	0	40	35	0	65	40	60	80	70	40	0	4.76	4	4.76	5	5	5	6	4	3	4	6	4	6	7.94	5	4	1012.5	0.03	563.2
0.6	0	4	90	65	45	60	20	0	70	15	80	15	40	0	0	5	6	4.76	4.76	5	6.35	5	4	3	4	5	6.35	6	6.35	0	4	1037.9	0.03	581.9
0.6	0	4	90	65	40	60	45	0	70	15	80	15	40	0	0	5	6	4.76	4.76	4	7.94	6.35	4	3	4	6	6	6	6	0	4	1032.2	0.03	587.6
0.6	0	4	90	65	40	60	45	0	70	15	80	15	40	5	0	5	6.35	4.76	4.76	4	7.94	6.35	4	3	4	5	6.35	6	6	4	4	1032.1	0.03	608.4
0.6	0	4	90	65	40	60	40	0	75	15	65	20	40	5	0	5	6.35	4.76	4.76	4	7.94	6.35	4	3	4	6	6	6	6	4	4	1031.8	0.03	608.8
0.6	0	4	90	65	40	70	25	0	80	0	65	15	35	0	0	5	5	4.76	4	5	6	6.35	4	3	4	9.53	6	6	6	0	4	1049.1	0.04	560.9
0.6	0	4	95	65	40	65	40	0	70	15	80	30	40	0	0	5	6	4.76	4	4.76	6.35	6.35	4	3	4	6	6	6	6	0	4	1038.8	0.04	565.7
0.8	0	4	90	80	0	65	45	15	55	45	40	50	20	25	0	6	4	4.76	5	5	6.35	5	4	3	6	7.94	12.7	6	12.7	6	4.76	983.2	0.05	612.3
0.8	0	4	95	75	0	70	60	25	60	35	30	50	20	60	0	4	4.76	4.76	5	5	6.35	4.76	4	3	4.76	7.94	12.7	6	12.7	4.76	5	992.7	0.04	569.9
1	0	4	80	40	0	80	75	0	55	0	40	35	25	25	0	7.94	9.53	5	5	6.35	6.35	6.35	4	3	6.35	5	6.35	6	7.94	7.94	4.76	940.5	0.02	570.9
1	0	4	85	40	0	80	75	0	60	0	80	15	5	25	0	7.94	6.35	5	5	6.35	7.94	6.35	4	3	6.35</									

l (m)		ncd	nl	l_bar_keel (mm)	l_bar_keel_flange (mm)	l_bottom_long_flange (mm)	l_bottom_long_web (mm)	l_bottom_transverse_flange (mm)	l_bulk_flange (mm)	l_bulk_web (mm)	l_deck_long_flange (mm)	l_deck_long_web (mm)	l_side_long_flange (mm)	l_side_long_web (mm)	l_side_transverse_flange (mm)	Aprovado	t_bar_keel (mm)	t_bar_keel_flange (mm)	t_bottom (mm)	t_bottom_long (mm)	t_bottom_transverse (mm)	t_bottom_transverse_flange (mm)	t_bulk_long (mm)	t_bulkhead (mm)	t_deck (mm)	t_deck_long (mm)	t_flate_plate_keel (mm)	t_shear_bar (mm)	t_side (mm)	t_side_long (mm)	t_side_transverse_flange (mm)	t_side_transverse_web (mm)	Peso (Kg)	Variacao CG (m)	Volume Solda (cl)	
0.5	1	1	90	55	0	60	60	70	80	45	75	70	55	0	0	0	6	4	7.94	5	4	4.76	5	4.76	6.35	5	7.94	4.76	4	4	0	4	1156.6	0.03	627.8	
0.5	1	1	90	55	0	60	60	60	70	40	75	65	55	0	0	0	6	4	7.94	5	4	4.76	5	4.76	6.35	5	7.94	4.76	4	4.76	0	4	1155.5	0.03	637.6	
0.5	1	1	95	30	0	65	60	50	70	35	85	65	55	15	0	0	6	4	7.94	4	4	4	5	4.76	6.35	4.76	7.94	7.94	4	4	4.76	4	1155.1	0.04	643.1	
0.5	1	1	90	40	0	60	55	65	70	40	80	55	55	20	0	0	6	4	7.94	4.76	4	4	5	4.76	6.35	5	7.94	4.76	4	4.76	4	4	1154.3	0.03	657.0	
0.5	1	1	85	50	0	65	60	50	75	40	80	65	55	15	0	0	6	4	7.94	4.76	4	4.76	5	4.76	6.35	5	7.94	4	4	4	4.76	4	1154.4	0.03	646.9	
0.6	1	1	100	45	20	95	35	10	70	35	35	50	40	60	0	0	5	6	7.94	4	4.76	6	6.35	5	4.76	5	9.53	6	5	4.76	6	4	1192.7	0.03	675.2	
0.6	1	1	95	45	30	95	40	10	70	50	40	55	40	65	0	0	5	6.35	7.94	4	4.76	5	6.35	5	4.76	5	9.53	5	5	4.76	6.35	4	1192.2	0.03	674.6	
0.6	1	1	100	45	25	95	35	10	70	45	35	35	40	60	0	0	4.76	6.35	7.94	6	4.76	6	6.35	4.76	4.76	4.76	9.53	6.35	5	5	5	4	1192.4	0.03	699.1	
0.8	1	1	90	0	0	70	80	65	0	85	20	90	0	45	0	0	12.7	0	7.94	5	4.76	6.35	6	5	4.76	4.76	7.94	6.35	4	4.76	0	5	1078.2	0.03	612.7	
0.8	1	1	85	15	65	95	65	0	90	20	90	0	40	0	0	0	12.7	5	7.94	4.76	4.76	6	6.35	4.76	4.76	4	7.94	6	4	5	0	4.76	1070.7	0.03	661.3	
1	1	1	100	25	75	100	75	0	80	0	100	0	45	10	0	0	12.7	6.35	7.94	7.94	6	4.76	6.35	4.76	4.76	7.94	7.94	9.53	5	6.35	5	6	1118.3	0.05	784.0	
1	1	1	95	40	20	80	75	25	75	5	95	35	35	10	0	0	12.7	6.35	7.94	7.94	6	9.53	6.35	4.76	4.76	6	7.94	6.35	5	6	5	6	1107.2	0.05	835.4	
1	1	1	100	25	75	100	75	0	80	0	100	0	45	10	0	0	12.7	6.35	7.94	7.94	6	6.35	6.35	4.76	4.76	5	7.94	6.35	5	7.94	5	6	1114.0	0.05	787.6	
1	1	1	90	60	20	85	70	35	85	0	100	45	30	15	0	0	12.7	6.35	7.94	7.94	6	6.35	6.35	4.76	4.76	5	7.94	6.35	5	6	5	6	1107.6	0.04	822.0	
1	1	1	95	40	10	80	75	35	80	0	100	35	35	10	0	0	12.7	6.35	7.94	7.94	6	9.53	6.35	4.76	4.76	6	7.94	6.35	5	6	5	6	1107.5	0.04	825.2	
1	1	1	95	40	15	80	75	50	95	10	100	30	35	20	0	0	12.7	6.35	7.94	7.94	6	6	6.35	4.76	4.76	5	7.94	7.94	5	4.76	5	6	1108.2	0.04	810.8	
1	1	1	95	40	15	80	75	40	85	0	100	65	35	30	0	0	12.7	6.35	7.94	7.94	6	6.35	6.35	4.76	4.76	5	7.94	7.94	5	4	5	6	1108.4	0.05	793.9	
1.2	1	1																																		
0.5	1	2	80	20	30	55	55	60	75	35	60	45	70	45	0	0	5	5	6	4	4	5	4.76	4	4	4.76	7.94	7.94	4	4	5	4	1006.6	0.04	517.8	
0.5	1	2	80	25	0	50	50	50	75	50	60	45	75	20	0	0	5	5	6	5	5	5	4	4	4	4.76	6.35	7.94	4	4	5	4	1009.1	0.03	515.7	
0.6	1	2	95	40	30	80	65	0	75	15	35	45	70	30	0	0	6	5	6	4	4	5	6.35	4.76	4	5	6.35	7.94	4	5	6.35	4	1021.1	0.03	550.1	
0.6	1	2	90	50	30	75	70	0	70	15	45	50	65	25	0	0	5	4	6	4	4	5	6.35	5	4	5	7.94	7.94	4	4	7.94	4	1023.2	0.03	536.2	
0.8	1	2	100	55	45	85	75	5	75	25	45	40	60	25	0	0	5	4	5	5	5	6.35	5	4	4	5	6.35	6	4	4	6	4	907.2	0.01	498.2	
0.8	1	2	95	55	45	60	70	5	80	25	40	45	60	30	0	0	5	5	5	5	5	6	5	4	4	5	6.35	6.35	4	4	6	4	900.0	0.02	498.4	
0.8	1	2	95	55	40	65	80	0	85	25	50	50	60	35	0	0	6.35	4.76	5	4	5	7.94	5	4	4	6	6.35	7.94	4	4	6	4	910.2	0.02	464.9	
1.0	1	2																																		
1.2	1	2																																		
0.5	1	3	65	45	20	45	30	45	65	0	75	65	25	20	0	0	4.76	5	4.76	4	5	6.35	4	4	3	6	5	6.35	4	4	6	5	938.9	0.04	529.8	
0.5	1	3	75	30	50	55	40	55	70	10	65	55	35	25	0	0	4.76	5	4.76	4	4	5	4	4	3	6	6	6.35	4	4.76	6	4.76	6	936.2	0.04	531.6
0.5	1	3	80	55	45	60	50	55	80	0	65	50	45	30	0	0	6	5	4.76	4	4	4.76	4	4	3	6	6.35	4	4	6	5	948.0	0.04	516.2		
0.6	1	3	85	35	30	65	45	35	80	20	80	50	45	55	0	0	4.76	6	4.76	5	4	7.94	4	4.76	3	6.35	9.53	7.94	4	6.35	6.35	4	988.6	0.02	604.9	
0.6	1	3	85	40	30	70	45	30	85	25	60	50	50	20	0	0	6	5	4.76	5	4	7.94	4	4	3	6.35	7.94	7.94	4	6.35	5	4.76	968.0	0.02	614.2	
0.8	1	3	80	45	10	70	55	55	65	40	75	50	45	40	0	0	6	7.94	4.76	4	6.35	9.53	5	4	3	5	6.35	6.35	4	4	6.35	4	918.5	0.03	538.6	
0.8	1	3	100	55	25	70	45	55	65	45	80	60	40	35	0	0	5	7.94	4.76	4	6.35	9.53	5	4	3	5	6	6	4	4	6.35	4	922.2	0.03	530.0	
0.8	1	3	85	65	25	70	50	10	70	55	65	50	35	25	0	0	6	7.94	4.76	4	6.35	9.53	5	4	3	5	7.94	7.94	4	4	6.35	4	913.6	0.02	541.1	
0.8	1	3	100	70	30	75	50	55	70	45	70	40	40	40	0	0	6	7.94	4.76	4	6.35	9.53	4	4	3	5	7.94	6.35	4	5	9.53	4	934.9	0.02	525.4	
0.8	1	3	95	60	30	80	50	65	65	40	65	40	25	20	0	0	6.35	7.94	4.76	4	6.35	9.53	4	4	3	5	7.94	7.94	4	5	7.94	4	927.1	0.03	529.8	
0.8	1	3	85	45	20	70	40	45	65	40	65	55	50	35	0	0	6	7.94	4.76	4	6.35	5	5	4	3	5	7.94	6.35	4	4.76	6.35	4	911.6	0.03	549.7	
1	1	3	95	55	45	75	55	65	65	20	45	50	50	55	0	0	7.94	4.76	5	4.76	6.35	7.94	5	4	5	5	4.76	4.76	4	5	6.35	6	955.8	0.05	634.1	
1	1	3	95	65	35	70	45	50	55	20	35	40	55	40	0	0	9.53	4.76	5	4.76	6.35	7.94	4.76	4	5	5	5	4.76	4	4	5	6	929.8	0.05	634.2	
1	1	3	90	65	30	70	50	15	65	20	35	65	50	45	0	0	9.53	4.76	5	5	6.35	7.94	4	4	5	5	5	4	4	5	5	6	922.9	0.06	636.9	
1.2	1	3	100	50	50	80	70	35	80	30	80	45	55	45	0	0	9.53	7.94	5	5	6.35	7.94	5	5	3	4	7.94	4.76	4	6	4.76	6	963.7	0.02	666.3	
1.2	1	3	95	40	45	80	70	30	70	25	80	45	55	40	0	0	9.53	6.35	5	5	6.35	7.94	5	5	3	4	7.94	5	4	6	4.76	6	951.3	0.02	666.5	
0.5	1	4	75	40	0	60	45	0	75	25	60	50	50	10	0	0	6	4.76	4.76	4	4	6.35	4	4	4	5	6	7.94	4	6	4.76	4	949.6	0.04	520.8	
0.5	1	4	75	40	0	55	50	15	60	25	40	35	55	20	0	0	6	4	4.76	4	4	6.35	4	4	4	5	6	7.94	4	6	4.76	4	945.1	0.04	550.7	
0.6	1	4	75	60	25	55	50	40	80	0	55	50	40	40	0	0	5	4.76	4.76	4	4	7.94	4	4	3	6.35	6	6.35	4	5	6.35	4	954.3	0.01	543.6	
0.6	1	4	7																																	

l (m)	nel	nl	l_bar_keel (mm)	l_bar_keel_flange (mm)	l_bottom_long_flange (mm)	l_bottom_long_web (mm)	l_bottom_transverse_flange (mm)	l_bulk_flange (mm)	l_bulk_web (mm)	l_deck_long_flange (mm)	l_deck_long_web (mm)	l_side_long_flange (mm)	l_side_long_web (mm)	l_side_transverse_flange (mm)	Approvado	t_bar_keel (mm)	t_bar_keel_flange (mm)	t_bottom (mm)	t_bottom_long (mm)	t_bottom_transverse (mm)	t_bottom_transverse_flange (mm)	t_bulk_long (mm)	t_bulkhead (mm)	t_deck (mm)	t_deck_long (mm)	t_plate_plate_keel (mm)	t_sheer_bar (mm)	t_side (mm)	t_side_long (mm)	t_side_transverse_flange (mm)	t_side_transverse_web (mm)	Peso (Kg)	Variacao_Gr (m)	Volume_Solda (cl)	
0.6	1	4	75	45	0	60	45	50	70	0	55	65	55	50	0	5	4.76	4.76	4	4	7.94	4	4	3	6.35	6.35	6	4	6	6.35	4.76	964.3	0.03	530.5	
0.8	1	4	95	10	0	65	55	30	60	25	20	80	45	15	0	6	4.76	4.76	4.76	6	5	4	4	3	5	6.35	6.35	4	5	5	4.76	897.3	0.01	546.9	
0.8	1	4	95	10	0	65	55	25	60	20	40	35	55	20	0	6.35	4.76	4.76	4.76	6	5	4	4	3	5	6.35	6.35	4	5	5	4.76	895.0	0.02	550.1	
1	1	4	100	20	25	75	65	20	60	0	50	35	35	10	0	6.35	6.35	5	4	6	5	4	5	3	4	6.35	4.76	4	5	7.94	4.76	863.5	0.04	539.5	
1.2	1	4	100	45	55	75	80	20	70	55	60	25	60	60	0	7.94	7.94	5	5	6.35	6.35	4.76	5	3	4.76	9.53	7.94	4	5	5	4.76	985.0	0.02	681.6	
1.2	1	4	95	35	30	80	75	20	60	45	60	25	55	90	0	7.94	12.7	4.76	5	6.35	6.35	4.76	6.35	3	5	9.53	7.94	4	5	6	4	980.7	0.01	710.6	
0.5	2	1	95	45	35	65	35	50	70	40	40	55	50	0	0	4	6.35	7.94	4	4	9.53	5	4.76	4.76	6	9.53	4.76	4	4	0	4	1122.2	0.04	598.7	
0.5	2	1	95	45	35	65	35	50	75	30	40	50	50	0	0	4	6.35	7.94	4.76	4	9.53	4.76	4.76	4.76	5	9.53	5	4	4	0	4	1122.0	0.04	599.2	
0.5	2	1	95	45	40	65	35	50	70	45	40	50	50	0	0	4	6.35	7.94	4.76	4	9.53	4.76	4.76	4.76	4.76	9.53	4.76	4	4	0	4	1122.3	0.04	597.7	
0.5	2	1	95	30	45	55	35	60	75	30	40	50	50	0	0	4	6.35	7.94	4.76	4	9.53	4.76	4.76	4.76	6	7.94	4.76	4	4	0	4	1118.6	0.04	604.1	
0.6	2	1	100	40	25	65	50	20	80	20	70	45	50	35	0	6	6	7.94	5	4	6.35	5	4.76	4.76	5	12.7	9.53	4	4	5	4	1145.0	0.04	647.5	
0.6	2	1	100	60	100	70	55	30	75	15	65	50	45	50	0	5	6.35	7.94	4	4	7.94	5	5	4.76	4.76	12.7	5	4	4	5	4	1162.6	0.04	627.9	
0.6	2	1	100	55	65	65	45	25	75	30	75	45	45	35	0	4	6.35	7.94	5	4	7.94	5	5	4.76	4	12.7	6.35	4	4	5	4	1150.2	0.04	631.5	
0.8	2	1	100	40	55	80	65	50	90	35	45	55	45	45	0	7.94	6.35	7.94	4	5	6	6	4.76	4.76	6.35	9.53	5	4	4	4	5	1107.5	0.02	670.5	
0.8	2	1	90	40	60	75	55	50	85	5	55	5	45	30	0	9.53	6	7.94	4	5	6	6	4.76	4.76	6.35	9.53	5	4	4	4	5	1086.7	0.03	690.9	
0.8	2	1	90	35	30	90	60	55	85	15	50	35	45	35	0	9.53	6	7.94	4	5	6.35	5	4.76	4.76	6.35	9.53	5	4	4	4	5	1092.2	0.03	675.7	
0.8	2	1	90	35	60	80	55	75	85	20	50	30	45	30	0	9.53	5	7.94	4	5	6.35	5	4.76	4.76	6	9.53	5	4	4	4	5	1094.3	0.03	673.3	
0.8	2	1	100	10	10	95	65	60	90	0	45	50	45	0	0	9.53	7.94	7.94	6	5	7.94	5	4.76	4.76	6	9.53	5	4	4	0	5	1100.9	0.03	672.1	
1.0	2	1																																	
1.2	2	1																																	
0.5	2	2	75	35	0	70	20	30	65	35	45	0	60	35	0	5	6.35	6	5	4	12.7	4.76	4	4	6	6.35	6.35	4	4.76	5	4	992.4	0.04	523.9	
0.5	2	2	80	40	0	70	40	30	65	35	45	0	60	35	0	5	6.35	6	5	4	12.7	4.76	4	4	6	6.35	5	4	4	4.76	4	1003.6	0.04	513.3	
0.5	2	2	75	35	0	55	40	30	65	30	45	5	25	25	0	5	5	6	5	4	6	4.76	4	4	6.35	6.35	7.94	4	4.76	5	4	974.8	0.04	561.3	
0.5	2	2	65	35	0	55	40	30	70	35	45	0	50	30	0	5	6.35	6	5	4	6	4.76	4	4	6.35	6.35	4	4	4.76	5	4	977.9	0.04	525.6	
0.6	2	2	85	70	25	55	60	0	75	25	60	50	60	0	0	4.76	6.35	6	5	4	5	6	4	4	4	7.94	6.35	4	4	0	4	997.2	0.02	501.5	
0.8	2	2	90	45	35	60	55	0	80	10	60	60	55	30	0	6.35	5	6	6.35	4.76	6.35	5	4	4	5	6.35	6.35	4	4.76	4.76	4	971.3	0.01	600.3	
0.8	2	2	90	45	45	60	55	0	##	10	70	50	50	25	0	6.35	5	6	6.35	5	7.94	4	4	4	5	6.35	6.35	4	4	5	4	973.2	0.01	575.0	
1	2	2	100	60	30	65	50	0	80	25	50	50	45	45	0	9.53	4.76	5	6.35	6	6.35	5	4	3	6	5	6	4.76	4.76	5	4	881.5	0.04	597.1	
1	2	2	95	45	30	65	50	0	80	10	60	55	65	15	0	9.53	4.76	5	6.35	6	9.53	5	4	3	5	6.35	5	4.76	4.76	6.35	4.76	892.7	0.04	596.7	
1.2	2	2																																	
0.5	2	3	90	45	45	45	35	15	75	25	70	10	70	20	0	4.76	6	4.76	4	4	6.35	4	4	3	4.76	7.94	9.53	4	5	5	4	933.3	0.03	542.1	
0.5	2	3	90	45	45	45	30	40	75	20	65	0	70	20	0	5	5	4.76	4	4	6.35	4	4	3	4.76	7.94	9.53	4	5	5	4.76	944.6	0.04	524.7	
0.5	2	3	90	45	60	40	35	30	75	25	75	0	60	20	0	4	6.35	4.76	4	4	6	4	4	3	4	7.94	9.53	4.76	5	5	4	961.6	0.03	510.5	
0.5	2	3	90	45	40	65	25	45	75	40	80	10	70	20	0	4	6	4.76	4	4	6.35	4	4	3	4	7.94	9.53	4	5	5	4	944.1	0.03	529.3	
0.5	2	3	90	45	50	45	30	45	75	25	75	0	70	0	0	4.76	5	4.76	4	4	6.35	4	4	3	4	7.94	9.53	5	5	0	4.76	986.3	0.03	509.5	
0.5	2	3	90	45	45	45	35	15	75	25	75	10	65	30	0	4	6	4.76	4	4	6.35	4	4	3	4.76	7.94	9.53	4	5	5	4	934.2	0.03	537.2	
0.6	2	3	85	50	30	55	0	55	90	0	70	0	40	0	0	6.35	6	4.76	4	6	0	5	5	3	4.76	4.76	5	4	5	0	4	979.5	0.02	533.2	
0.6	2	3	85	50	30	55	0	55	90	5	70	0	35	0	0	6.35	6	4.76	4	6	0	5	5	3	4.76	4.76	5	4	5	0	4	978.4	0.02	546.7	
0.6	2	3	80	55	30	55	10	55	80	10	70	10	25	25	0	6.35	6	4.76	4.76	5	6.35	5	5	3	4	5	5	4	5	5	4	966.0	0.00	644.4	
0.6	2	3	80	50	35	55	10	55	70	15	70	0	25	25	0	6.35	6	4.76	4.76	5	9.53	5	5	3	4	6	6.35	4	4.76	5	4	967.6	0.00	605.7	
0.8	2	3	90	50	25	65	55	55	80	0	65	45	25	35	0	5	6.35	5	5	4.76	6.35	4	4	3	4	5	9.53	4	5	6.35	4	907.2	0.01	550.5	
1	2	3	95	20	50	100	40	0	85	20	60	80	30	10	0	9.53	5	4.76	4	6	9.53	4.76	4.76	4	4	4.76	6.35	9.53	4	5	4.76	6.35	937.5	0.06	605.9
1.2	2	3																																	
0.5	2	4	50	55	0	65	20	30	75	15	80	30	45	0	0	6	4	4.76	5	4.76	6.35	4	4	3	5	7.94	6.35	4	4.76	0	4.76	966.4	0.02	577.2	
0.5	2	4	80	45	0	60	15	20	80	0	55	5	45	15	0	6	4.76	5	5	4	7.94	4.76	4	3	6	7.94	7.94	4	5	5	5	959.4	0.03	623.7	
0.5	2	4	80	40	0	55	15	15	80	20	50	15	60	10	0	4.76	4	4.76	4	4	7.94	4.76	4	3	6	7.94	6.35	4	5	6.35	5	947.9	0.03	636.2	
0.6	2	4	55	50	55	55	60	15	65	15	40	20	40	0	0	6.35	4.76	5	4	4.76	7.94	4	4	3	6	6	6	4	4	0	5	991.5	0.02	607.1	
0.6	2	4	55	50	55	60	60	20	65	25	60	15	35	0	0	6.35	7.94	4.76	4	4	7.94	4	4	3	6	6	5	4	5	0					

