

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

MARCELO PAIVA HERMANN

**OTIMIZAÇÃO DE PROJETO ESTRUTURAL PARA EMBARCAÇÕES DE
GRANDE PORTE**

JOINVILLE

2016

MARCELO PAIVA HERMANN

**OTIMIZAÇÃO DE PROJETO ESTRUTURAL PARA EMBARCAÇÕES DE
GRANDE PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville.

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

JOINVILLE

2016

OTIMIZAÇÃO DE PROJETO ESTRUTURAL PARA EMBARCAÇÕES DE GRANDE
PORTE

MARCELO PAIVA HERMANN

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

Joinville (SC), 01/ 12/ 2016.

Banca Examinadora:

Dr. Thiago Pontin Tancredi

Presidente/Orientador

Dr. Eng. Bernardo Luis Rodrigues de Andrade

Membro

Dr. Eng. Rafael Gallina Delatorre

Membro

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Mauro Hermann e Fátima Paiva, pelo incentivo aos estudos e por nunca me deixarem faltar nada. Os exemplos que recebi de vocês foram e são muito importantes para a minha formação pessoal e profissional.

Ao meu irmão Gabriel por sempre estar do meu lado, compartilhando boas risadas e me ajudando a esquecer e superar os momentos turbulentos.

À toda minha família, minha avó, meus tios e primos, com quem eu sei que sempre poderei contar.

À minha namorada Ana Paula Scussel pela compreensão, companheirismo e carinho, que, mesmo longe não deixou de me apoiar e teve paciência para não me deixar desistir.

Ao meu orientador Thiago Pontin Tancredi, que aceitou o desafio de me orientar mesmo à distância, não deixando faltar incentivo e apoio, sempre partilhando conhecimento em todos os momentos.

À toda equipe da Netuno- Engenharia Naval, onde realizei meu estágio obrigatório e tanto aprendi nos últimos meses. Na empresa conheci grandes pessoas que muito me ajudaram na adaptação a uma nova cidade, bem como no dia-a-dia da profissão. Tudo que vivi aqui contribuiu muito para minha formação de Engenheiro Naval.

A todos meus amigos, em especial ao Eduardo Festa, Shimizu, Hector, Becker, Marlon, Juan Matos, Lucas Duarte, Elpidio, Fábio, Daniel, Murilo e Castro que fizeram desses anos de faculdade os mais intensos e, se assim foi, eu devo à parceria de vocês.

Por fim agradeço também a AAACEM, e todos que comigo trabalharam e partilharam o sonho de uma atlética grande e respeitada. Entre eventos e reuniões, vi a atlética se consolidar no curso, fiz grandes amigos e espero tê-los sempre comigo.

RESUMO

O dimensionamento estrutural é etapa fundamental no projeto de uma embarcação de grande porte, a partir dele é concebido todo um conjunto de reforçadores e chapas que devem ser posicionados de maneira que o arranjo resista às diversas cargas atuantes no casco. Com a alta competitividade do mercado naval, dimensionar uma estrutura mais leve que, ainda assim, garanta a sua integridade, torna-se um diferencial. Dentro desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo encontrar a configuração de seção mestra que atinja o objetivo de menor massa e, além disso, tenha confiabilidade estrutural e respeite as normas da Sociedade Classificadora ABS. Para tal, uma planilha de síntese de tensões é construída para permitir a análise da seção mestra típica de petroleiros, graneleiros e porta contêineres. A planilha, desenvolvida no programa Excel, a partir de dados de entrada referentes a dimensões principais da embarcação, realiza uma robusta síntese de tensões, tendo como saída o máximo valor de tensões existente na seção. A partir daí, é acoplada à planilha um processo de otimização usando algoritmo genético NSGA-II, onde foram utilizados dois métodos diferentes, o primeiro adota valores de espessuras de chapas como mínimo da norma, enquanto o segundo utiliza tais espessuras como variáveis, acrescentando valores da norma ao grupo de restrições do processo. Como resultado, verificou-se que adotar espessuras de chapas maiores que o mínimo sugerido por norma na seção mestra pode ser um procedimento capaz de trazer um arranjo estrutural mais leve, uma vez que é utilizado um reforçador menor.

Palavras-chave: Otimização. Algoritmo genético. Projeto Estrutural. Tensão global. Tensões locais. Vibração em estruturas navais.

ABSTRACT

The structural sizing is a fundamental step in the design of a large vessel, from which it is conceived a whole set of reinforcers and plates that must be positioned in such a way that the arrangement resists various loads acting on the hull. With the high competitiveness of the naval market, dimensioning a lighter structure that, nevertheless, guarantees its integrity, becomes a differential. In this context, the present work aims to find the configuration of the midship section that achieves the goal of lower mass and, in addition, has structural reliability and respects the standards of the ABS Classification Society. For this, a tensions synthesis spreadsheet is built on Excel and works for midship sections typical of oil tankers, bulk carriers and container carriers, so that from input data referring to the main dimensions of the vessel, a robust synthesis of tensions is made, taking as an output the worst tension condition in the section. From there, the NSGA-II genetic algorithm optimization process is coupled to the spreadsheet, where two different methods were used the first adopting plate thickness values as a minimum of the standard, while the second one uses these thicknesses as variables, adding values from the norm to the group of process restrictions. As result, it was verified that adopting thicknesses bigger than the minimum suggested by standard in the midship section may be a procedure capable of bringing a lighter structural arrangement, once a smaller reinforcer is used.

Keywords: Optimization. Genetic Algorithm. Structural Design. Global tension. Local tensions. Vibration in naval structures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Porta contêiner (a), Graneleiro (b) e Petroleiro (c).....	17
Figura 2 – Típico painel estrutural de uma embarcação.....	22
Figura 3 - Orientação dos eixos na embarcação	23
Figura 4 - Configurações de onda no navio.....	25
Figura 5 - Gráficos de momento fletor para águas tranquilas, ondas de Tosamento e Alquebramento	26
Figura 6 - Pressão atuante na secção mestra da embarcação.....	27
Figura 7 - Reforçadores longitudinais e transversais.....	28
Figura 8 - Perfil de reforçador com a chapa colaborante	29
Figura 9 - Unidade de chapeamento de uma embarcação	31
Figura 10 – Tensões em placas retangulares	32
Figura 11 - Comportamento de tensão primária, secundária e terciária.....	33
Figura 12 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético	35
Figura 13 - 1º e 2º modo de vibrar da viga navio	37
Figura 14 - Comportamento dos apoios no movimento de rotação da chapa.....	38
Figura 15 - Seção mestra de petroleiro utilizada na ferramenta de análise	41
Figura 16 - Angulo de repouso de talude	42
Figura 17- Seção mestra de graneleiro utilizada na ferramenta de análise	43
Figura 18 - Seção mestra de porta contêiner utilizada na ferramenta de análise.....	44
Figura 19 - Parâmetros de entrada da ferramenta de análise	50
Figura 20 - Grupo de pesos de entrada	53
Figura 21 - Coeficiente de <i>outfit</i> para diferentes tipos de embarcações	54
Figura 22 - Típicos reforçadores utilizados	58
Figura 23 - Distribuição de momento fletor ao longo do comprimento do perfil	63
Figura 24 - Gráfico de <i>Shade</i> para largura de chapa colaborante.....	63
Figura 25 - Tensões diretas e de Poisson.....	66
Figura 26 - Pontos analisados no painel estrutural pela vista de topo.....	67
Figura 27 - Alturas analisadas no painel do fundo	68
Figura 28 - Alturas analisadas no painel do convés de petroleiro	68
Figura 29 - Coeficiente de massa adicional em função de B/T.....	71
Figura 30 - Esquemático da otimização tipo 1	76
Figura 31 - Esquemático de otimização tipo 2	78

Figura 32 - Dados de entrada referentes ao petroleiro <i>Elka Leblon</i>	79
Figura 33- Variação da massa ao longo do processo de otimização tipo 1 para 20 gerações ..	81
Figura 34 - Variação da massa ao longo do processo de otimização tipo 2 para 20 gerações .	82
Figura 35 – Soluções viáveis e inviáveis no procedimento, a partir das restrições.....	82
Figura 36 - Influência das restrições no objetivo	83
Figura 37 - Espessuras mínimas e ótimas para resultado otimizado	86
Figura 38 - Comparativo de resultados de otimizações com Numeral E	87
Figura 39 - Pior condição de tensão para os arranjos estruturais otimizados.....	87
Figura 40 - Seção mestra com parâmetros otimizados	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores da constante C1 nas equações de momento em ondas	49
Tabela 2 - Correção da flutuação em relação ao comprimento	56
Tabela 3 - Sequencias de entrada da macro "calcular tensões"	57
Tabela 4 - Divisão de elementos da seção mestra de petroleiro, graneleiro e porta contêiner .	59
Tabela 5 - Tensões secundárias e terciárias nos pontos na vista de topo	67
Tabela 6 - Intervalos e passos iniciais das variáveis	80
Tabela 7 - Intervalo de otimização para variáveis no processo de 60 gerações	84
Tabela 8 - Resultados ótimos encontrados nos dois procedimentos após 50 gerações para o tipo 1 e 80 gerações para o tipo 2	84
Tabela 9 - Intervalo de variação e passo para otimização tipo 1 com passo reduzido	85
Tabela 10 - Intervalo de variação e passo para otimização tipo 2 com passo reduzido	85
Tabela 11 - Resultado final de otimização	85
Tabela 12 - 3 primeiros modos de vibrar para estrutura otimizada	88
Tabela 13 - Dimensão dos reforçadores no arranjo estrutural ótimo	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IMO – International Maritime Organization

IACS – International Association of Classification Societies

DNV – Det Norske Veritas

ABS – American Bureau of Shipping

NSGA II – Non-Sorting Genetic Algorithm II

MARPOL – International Convention for the Prevention of Pollution from Ships

LCG – Longitudinal Center of Gravity

LCB – Longitudinal Center of Buoyancy

FC_F – Fator de Correção na Flutuação

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Maior dimensão de uma unidade de chapeamento	[m]
al	Largura da alma do perfil	[mm]
Alq	Constante multiplicativa para alquebramento	
b	Menor dimensão de uma unidade de chapeamento	[m]
B	Boca do navio	[m]
B'	Largura de carga	[m]
Bn	Constante de acordo com condição de contorno	
c	Largura da chapa colaborante	[m]
Cb	Coefficiente de bloco	
Cm	Coefficiente de seção mestra	
D	Pontal para ABS	[m]
D'	Rigidez flexional de uma placa retangular	[N.m]
ds	Calado para ABS	[m]
Dwt	Porte bruto do navio	[t]
E	Numeral E de Watson (2002)	
E _{aço}	Módulo de elasticidade	[MPa]
H _{DB}	Altura do duplo fundo	[m]
H _{DS}	Altura do duplo costado	[m]
f	Largura da flange do perfil	[mm]
fp	Fator referente a tensão admissível	[kN/cm ²]
FS	Fator de segurança	
h	Altura de carga	[m]
I	Momento de inércia	[m ⁴]
ka	Coefficiente de pressão em placas na direção “a”	[m]
kb	Coefficiente de pressão em placas na direção “b”	[m]
L	Comprimento entre perpendiculares para ABS	[m]
l	Distancia longitudinal entre reforçadores	[m]
ll	Distância entre momentos nulos	[m]
LN	Linha neutra	[m]
Loa	Comprimento total	[m]
Lpp	Comprimento entre perpendiculares	[m]
Mt	Momento total	[N.m]

LISTA DE SÍMBOLOS

M_{wh}	Parcelo do momento de tosamento	[N.m]
M_{ws}	Parcelo do momento de alquebramento	[N.m]
n	Modo de vibração	
P	Pontal do navio	[m]
P_{sup}	Peso da superestrutura	[t]
p	Pressão	[MPa]
q	Distribuição de carga	[N/m]
R_{bojo}	Raio de bojo	[m]
s	Espaçamento entre perfis	[mm]
SM	Módulo de seção	[m ³]
SM_{req}	Módulo de seção requerido	[m ³]
T	Calado	[m]
$T_{alquebramento}$	Calado em condição de alquebramento	[m]
$T_{médio}$	Calado médio	[m]
T_{ondas}	Calado em ondas	[m]
$T_{tosamento}$	Calado em condição de tosamento	[m]
t_a	Espessura da alma do perfil	[mm]
$t_{convés}$	Espessura da chapa do convés	[mm]
$t_{costado}$	Espessura da chapa do costado	[mm]
t_{df}	Espessura da chapa do duplo fundo	[mm]
t_f	Espessura da flange do perfil	[mm]
t_{fundo}	Espessura da chapa do fundo	[mm]
Tos	Constante multiplicativa para tosamento	
W_o	Peso de <i>outfit</i>	[t]
W_s	Peso em aço por Watson (2002)	[t]
Z	Altura a partir da quilha	[m]
$\rho_{aço}$	Massa específica do aço	[kg/m ³]
A_i	Área do elemento i	[m ²]
B_l	Largura de carga para perfis leves	[m]
B_p	Largura de carga para perfis pesados	[m]
L_{Ni}	Linha neutra do elemento i	[m]

LISTA DE SÍMBOLOS

$M_{m\acute{a}x}$	Momento máximo	[N.m]
M_y	Momento fletor no eixo y	[N.m]
ν	Coefficiente de Poisson	
Z_{LN}	Altura da linha neutra da seção	[m]
σ''_2	Tensão secundária proveniente do reforçador leve	[Mpa]
σ'_2	Tensão secundária proveniente do reforçador pesado	[MPa]
σ_1	Tensão primária	[MPa]
σ_3	Tensão terciária	[MPa]
σ_x	Tensão longitudinal no eixo x	[MPa]
ω_n	Frequência natural	[rad/s]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1. Objetivo Geral	19
1.1.2. Objetivos Específicos	19
1.2 ESTRUTURA DO RELATÓRIO	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1. O PROJETO ESTRUTURAL DE UMA EMBARCAÇÃO.....	21
2.2. TENSÃO GLOBAL	23
2.3. TENSÕES LOCAIS	27
2.3.1. Tensões secundárias	28
2.3.2 Tensão terciária.....	30
2.4. COMPOSIÇÃO DE TENSÕES	32
2.5. OTIMIZAÇÃO	33
2.6. VIBRAÇÃO EM ESTRUTURAS NAVAIS.....	35
2.6.1. Vibração da viga-navio.....	36
2.6.2. Vibração em reforçadores e chapas	37
3. CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA DE SÍNTESE.....	39
3.1. A SEÇÃO MESTRA	39
3.1.1. A seção mestra de um petroleiro	40
3.1.2. A seção mestra de um graneleiro.....	41
3.1.3. A seção mestra de um porta contêiner.....	43
3.2. APLICAÇÃO DA NORMA DA ABS	45
3.2.1. Espessuras de chapas	46
3.2.2. Módulo de Seção dos reforçadores.....	47
3.2.3. Momento fletor em ondas.....	48

3.2.4. Módulo de Seção mestra mínimo e requerido	49
3.3. PARAMETROS DE ENTRADA NA FERRAMENTA	50
3.4. CALCULO DA TENSÃO PRIMÁRIA	55
3.4.1. Momento fletor em águas calmas	55
3.4.2. Seleção dos reforçadores	58
3.4.3. Propriedades da seção mestra	59
3.5. CALCULO DA TENSÃO SECUNDÁRIA	62
3.6. CALCULO DA TENSÃO TERCIARIA	65
3.7. COMPOSIÇÃO DE TENSÕES	66
3.8. CALCULO DA MASSA ESTRUTURAL	70
3.9. ANALISE DE VIBRAÇÃO NA ESTRUTURA	70
4. PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO	73
4.1. MODELO MATEMÁTICO DE OTIMIZAÇÃO: TIPO 1 - ESPESSURAS COMO MÍNIMO DA ABS	74
4.2. MODELO MATEMÁTICO DE OTIMIZAÇÃO: TIPO 2 - ESPESSURAS COMO VARIÁVEIS DO PROCESSO	76
5. ESTUDO DE CASO	79
5.1. DADOS DA EMBARCAÇÃO UTILIZADA	79
5.2. PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO PARA A EMBARCAÇÃO DE ESTUDO E RESULTADOS	80
6. CONCLUSÃO	90
REFERÊNCIAS	92
APÊNDICE A – Resultados com menor massa estrutural no processo de 20 gerações	95
APÊNDICE B – Comportamento das variáveis em função da massa no processo de 20 gerações	97
APÊNDICE C – Máximas tensões encontradas para resultados ótimos	104
ANEXO A	105
ANEXO B	106

ANEXO C	107
ANEXO D	108

1. INTRODUÇÃO

Nas primeiras fases do projeto de uma embarcação, um processo iterativo de tomadas de decisões é realizado com o propósito de atingir a melhor configuração possível capaz de atender os requisitos estabelecidos. Nesse processo, a análise estrutural do navio é uma etapa fundamental no projeto, onde o engenheiro procura projetos eficientes capazes de transportar a maior carga com menor massa estrutural e apto a resistir às diversas forças atuantes no casco, tais como o peso do próprio casco, da carga, do combustível, pressão da água e do vento.

Em toda a história da navegação, foram vistos construtores navais com problemas para propiciar resistência adequada às suas embarcações. Limitando-se a copiar estruturas anteriormente executadas, cuja resistência estrutural fosse considerada satisfatória. Essa tradição, com o tempo se transformou em lei, quando se criaram as sociedades classificadoras (AUGUSTO, 1996).

A partir da década de 1960, para proteção da propriedade do mar e evitar mais desastres ambientais, iniciou-se a utilização de normas que regulamentam o projeto dos navios. A fim de manter uma melhor segurança e atender toda a demanda no setor da navegação, em 1969 a *International Maritime Organization* (IMO) transferiu a responsabilidade de aplicação de normas relativas à segurança marítima para a *International Association Of Classification* (IACS).

De acordo com a IMO (2011), classificadoras da IACS têm a finalidade de fornecer serviços estatutários e de classificação, além de desenvolver assistência para a indústria marítima e órgãos regulamentadores em matéria de segurança. Dentre as classificadoras, estão a *Det Norske Veritas* (DNV) e *American Bureau of Shipping* (ABS).

Com o emprego de normas, o projeto estrutural do navio se transformou em grande parte empírica, com base na experiência acumulada e desempenho do navio, expressos sob a forma de códigos de concepção estrutural ou regras publicadas pelas diversas sociedades classificadoras. Essas regras dizem respeito às cargas, a força e a critérios de projeto, fornecendo fórmulas simplificadas e fáceis de usar para as dimensões estruturais. Esta abordagem além de economizar tempo no escritório de projeto, desde que o navio deve obter a aprovação de uma classificação sociedade, ele também economiza tempo no processo de aprovação (LAMB apud. HUGHES, 2004, p.18-2).

A classificação, porém, não julga a viabilidade econômica de uma embarcação, e com o aumento da competitividade no transporte marítimo, tornaram-se necessários modelos

estruturais que trouxessem mais eficiência e não apenas atingissem valores requisitados pelas normas.

Com o desenvolvimento tecnológico, análises computacionais foram tornando esse processo mais acurado. Entre tais análises, a que usa o método dos elementos finitos pode ser considerada a mais empregada para projeto estrutural. Softwares como Ansys e Abaqus permitem desenvolver uma ampla e precisa análise estrutural baseada neste método, entretanto, geram um alto custo computacional, necessitando de um estudo para verificar a viabilidade destas análises.

A contínua busca pela melhor solução e a motivação em realizar um projeto mais eficiente possível, tornou o uso de técnicas de otimização popular em processos de engenharia. Segundo Tancredi (2008) pode-se definir o processo de otimização como a busca automática, sistemática e dirigida para obter a melhor solução dentro do universo de soluções existentes. Na Engenharia de estruturas esta técnica, usualmente, tem como objetivo a minimização do peso estrutural.

O projeto estrutural deve resultar em uma embarcação confiável para lidar com diferentes aspectos, ao mesmo tempo em que seja econômico de construir e operar (LAMB, 2004). Ademais, o tipo de serviço que será realizado, bem como o tipo de carga transportada, são aspectos que devem ser levados em consideração na concepção do projeto estrutural.

Exemplo típico de adaptação de uma embarcação mercante seguindo o tipo de transporte efetuado é do navio porta contêiner, que precisa se adaptar para resistir a diversas pilhas de contêineres presentes em seus porões e conveses, do petroleiro, que requer casco duplo para transportar petróleo e derivados em seus porões, e do graneleiro, que possuem grandes aberturas de escotilhas para transportar carga a granel. Os três tipos de embarcações mercantes podem ser visualizados na figura 1.

Figura 1 - Porta contêiner (a), Graneleiro (b) e Petroleiro (c)



Fonte: Marine ... (2007); Significant Ships of 2011 (2012, p.76); Significant Ships of 2012 (2013, p. 30)

Embarcações estão comumente vulneráveis a diferentes fontes de vibrações que podem causar problemas em elementos estruturais. De acordo com Moliner (2014), as principais delas são o motor e o propulsor, que em funcionamento pode excitar algumas ressonâncias do casco.

Uma das maneiras de evitar a vibração em estruturas navais é a prevenção das condições de ressonância. Por isso, no presente trabalho, também foi realizada uma análise de vibração na viga navio, em um reforçador e no chapeamento no fundo do casco, para depois serem analisados com frequências excitatórias provenientes do motor e propulsor, para, assim, avaliar se a embarcação poderá apresentar problemas de vibrações.

Dentro desse contexto, o presente estudo propõe um processo que visa diminuir o peso do aço de uma embarcação de grande porte sem que haja o colapso da estrutura, trazendo o melhor conjunto de soluções de espaçamentos transversais e longitudinais entre reforçadores leves e pesados por meio de um processo de otimização, utilizando modelos de seções mestras típicas de petroleiros, porta contêineres e graneleiros, além de analisar possíveis problemas com vibrações. Para tal, divide-se o trabalho em duas grandes etapas:

1. Construção de uma ferramenta de síntese de tensões usando o programa Microsoft Excel, que visa executar uma composição de tensões longitudinais, como a soma de tensão global (tensão primária) e tensões locais (tensões secundárias e terciárias) em diferentes pontos críticos da estrutura, além de verificar se as restrições da norma ABS são obedecidas. A planilha também analisará possíveis problemas de vibração na estrutura, a partir de comparação das frequências naturais analisadas com os parâmetros de entrada referentes à rotação do motor e propulsor da embarcação.
2. Em seguida, será acoplada à ferramenta a técnica de otimização NSGA II, baseada em algoritmo genético, que tem como objetivo encontrar o arranjo de seção mestra que trará a menor massa estrutural. Para isso, serão realizados dois procedimentos de otimização, o primeiro utiliza valores fixos de espessuras calculadas como o mínimo da norma, variando apenas espaçamentos entre reforçadores longitudinais e cavernas, com restrições no módulo de seção mestra e na máxima tensão. O segundo acrescenta as espessuras da seção ao conjunto de variáveis, adicionando restrições com os valores mínimos calculados pela ABS.

Muitos estudos foram realizados recentemente sobre os temas englobados no presente trabalho e foram utilizados como referência para o desenvolvimento do mesmo.

Destaca-se na área estrutural o trabalho de (MARTINS, 2014), que desenvolveu uma ferramenta de análise de tensões longitudinais atuantes em qualquer ponto da embarcação.

Diferentemente do trabalho citado, no presente estudo o desenvolvimento da ferramenta não faz uma análise tão robusta de tensões, limitando-se apenas a pontos críticos de uma única seção transversal (a de máxima tensão global). Porém, procurou-se superar limitações de automatização, onde a planilha resulte em uma síntese de tensões em diferentes locais na seção mestra, sem a presença constante de um operador.

Na área de otimização aplicada às estruturas navais, destacam-se (CHAVES, 2012), onde foi aplicada a otimização para embarcações menores de 100 metros, baseando-se em normas da DNV, e (TANCREDI, 2008), o qual realizou uma otimização multidisciplinar de sistemas complexos de engenharia. O objetivo deste trabalho se assemelha muito com o primeiro, porém diferenciando-se em alguns aspectos, como o tipo de embarcação e o conjunto de variáveis empregadas. Enquanto o segundo foi utilizado como referência teórica, já que o processo empregado no presente trabalho é um caso de otimização mono objetiva.

No tocante a área de vibração em estruturas navais, o presente trabalho usou como referencias trabalhos como (FIGUEIREDO, 2012), (MOLINER, 2014) e (MOURA, 2014).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo a elaboração de uma ferramenta usando o programa Microsoft Excel apta a sintetizar as máximas tensões presentes no painel estrutural de uma embarcação de grande porte, baseado em critérios das normas da ABS. Para tanto, dados de entrada referentes à embarcação estudada deverão ser inseridos, para então a técnica de otimização NSGA II baseada em algoritmo genético ser acoplada a ferramenta, afim de encontrar a melhor configuração de reforçadores e chapas na seção mestra, com o objetivo de determinar ao arranjo estrutural da seção com a menor massa estrutural possível.

1.1.2. Objetivos Específicos

- ✓ Construção de uma planilha que sintetize as tensões estruturais em diferentes pontos da seção mestra com a inserção de apenas alguns dados de entrada referentes às dimensões principais da embarcação, e que funcione de maneira automática para seções mestras típicas de graneleiros, petroleiros e porta contêineres;
- ✓ Processo de otimização utilizando algoritmo genético NSGA2, realizando-se um processo em que as espessuras de chapas entram diretamente como o mínimo calculado

por norma e também um processo onde as espessuras de chapas entram como variáveis na otimização;

- ✓ Realização de cálculos de vibrações na viga navio, unidade de reforçador e chapeamento, para servir de comparativo com vibrações provenientes do propulsor e motor da embarcação.

1.2 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

Esta seção descreve a estrutura dos demais capítulos que compõem o relatório, são eles:

- ✓ Capítulo 2 – Fundamentação teórica: neste capítulo são apresentados os principais conceitos sobre os temas que abrangem o presente trabalho, como teoria analítica de estruturas navais, otimização e vibrações.
- ✓ Capítulo 3 – Construção da ferramenta de síntese: este capítulo descreve todo o procedimento de construção da ferramenta de síntese, apresentando as seções mestras típicas utilizadas, como foi implementado a norma e os cálculos para tensões, massa e vibrações na estrutura.
- ✓ Capítulo 4 – Processo de otimização: o objetivo desse capítulo é apresentar o processo de otimização, relatando também o modelo matemático para cada um dos tipos de procedimentos.
- ✓ Capítulo 5 – Estudo de caso: descreve o processo de estudo de caso e os resultados encontrados no processo de otimização.
- ✓ Capítulo 6 – Conclusão: apresentam-se as conclusões do presente trabalho, a validação da planilha, do processo de otimização e propostas para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresentará os temas relativos à pesquisa desenvolvida, primeiramente será feita uma revisão do projeto estrutural de uma embarcação, levantando-se hipóteses para o desacoplamento das tensões atuantes, assim como análise das tensões global e local, processo de otimização e vibração em estruturas navais.

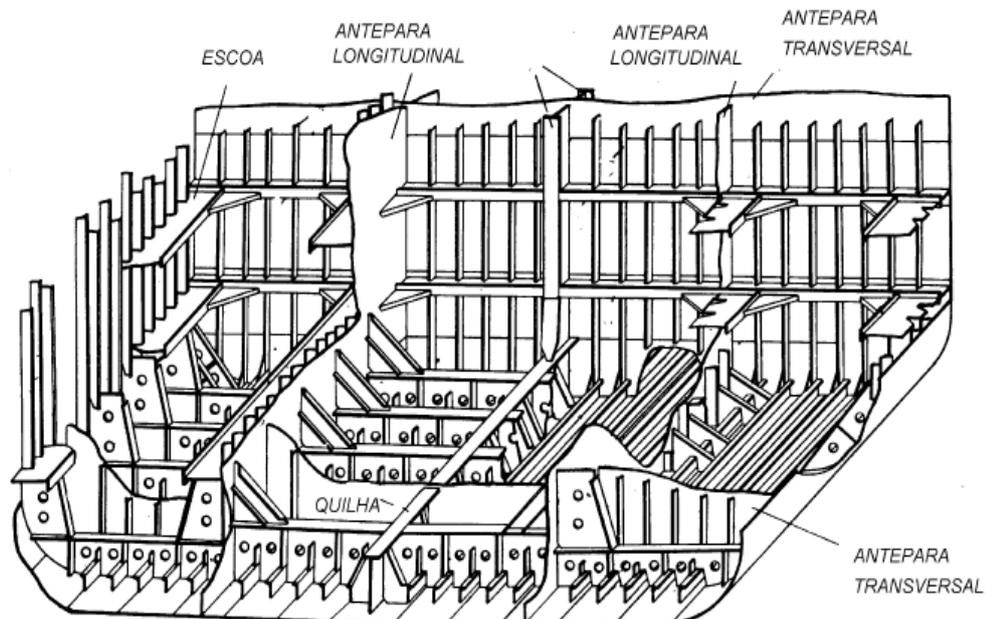
2.1. O PROJETO ESTRUTURAL DE UMA EMBARCAÇÃO

O casco de um navio é essencialmente um recipiente flutuante estável com espaço para máquinas, instalações, equipamentos e cargas, funcionando como um instrumento de transporte. Em termos de mecânica estrutural, pode ser considerado como uma viga oca de secção transversal variável sob ação de forças peso e forças hidrostáticas. Essas forças além de variar ao comprimento e direção, não são uniformes ao longo de toda a extensão (BARABANOV, 1966).

A partir de um projeto de embarcação, a análise estrutural deverá ser realizada de modo que o navio resista a todos os tipos de cargas atuantes com o menor peso possível. Segundo Lewis (1988) o tamanho e características principais de um novo navio são determinadas principalmente pela sua missão ou objetivo de trabalho. Além das considerações funcionais básicas existem requisitos que devem ser preenchidos, como a estabilidade, baixa resistência e alta eficiência de propulsão, além de uma boa condição de navegação.

Com base nestes propósitos, a estrutura ao ser analisada como apenas uma “casca” poderia não atender a todos os requisitos, comprometendo a navegabilidade e produtividade exigida. Logo, a utilização de reforçadores, tanto na transversal (anteparas e cavernas) como na longitudinal (escoas, sicordas e quilhas), é comumente aplicada à estruturas navais, tornando a composição de um casco reforçado a melhor maneira de reduzir seu peso sem afetar o desempenho determinado. Um típico arranjo estrutural de uma embarcação de carga é mostrado na figura 2.

Figura 2 – Típico painel estrutural de uma embarcação



Fonte: Augusto (2004a, p. 4)

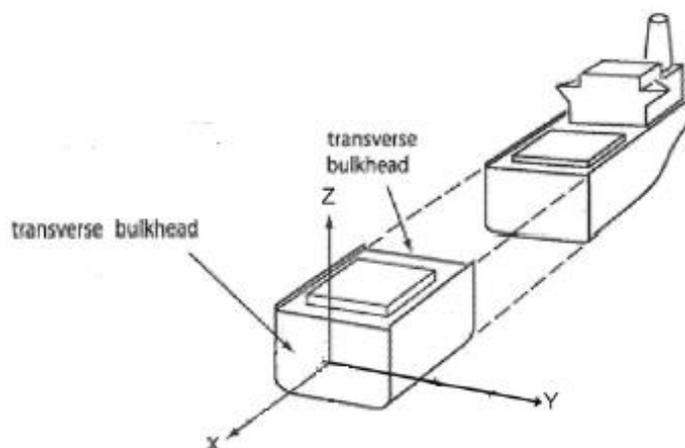
Excluídas as cargas de inércia devido ao movimento, a carga em um navio deriva de apenas duas fontes: a gravidade e a pressão da água. É impossível conceber um estado do mar em que as cargas devido à gravidade e pressão da água se anulem exatamente ao longo do comprimento do navio. O que existe é uma distribuição irregular de carga ao longo da embarcação e, por se tratar de uma estrutura elástica, deforma-se, como uma unidade inteira, tal como uma viga de fundação elástica, sendo por isso denominada de viga navio (MOLLAND, 2008). Tal distribuição irregular de carga gera uma curva de momento fletor ao longo do comprimento, essa origina a tensão global da estrutura, também conhecida como tensão primária.

Porém, além da tensão primária, existe toda a estrutura local da embarcação, composta por chapas e reforçadores (longitudinais e transversais) cuja deformação não tem efeito expressivo na distribuição dos esforços globais. Isso ocorre porque o raio de curvatura desses elementos é de ordem de grandeza inferior, permitindo uma análise desacoplada do fenômeno (MARTINS, 2014).

Portanto, por seus raios de curvatura de deformação serem de ordem de grandezas diferentes, sendo tensões nas chapas com raios muito menores que as tensões nos reforçadores, que também é relativamente inferior à primária. Usualmente tensões globais e locais podem ser analisadas separadamente.

Para facilitar a aplicação da teoria analítica de estrutura navais, foram utilizadas as coordenadas descritas na figura 3. Com o eixo x na direção do comprimento, eixo y na direção da boca e eixo z na direção do pontal da embarcação.

Figura 3 - Orientação dos eixos na embarcação



Fonte: Hughes (2010, p. 1.13)

2.2. TENSÃO GLOBAL

Embarcações de grande porte tem seu comprimento (L) consideravelmente maior que a Boca (B) e o Pontal (D). Devido à essa geometria, pode-se utilizar para análise de estrutura global da embarcação uma Teoria Simples de Viga, comparando o navio com uma simples viga, chamada de “viga-navio”, a qual possui comprimento igual ao da embarcação analisada. Assim, assume-se que a deflexão ocorre apenas na direção do eixo longitudinal da embarcação.

Segundo Tancredi (2004), para que a Teoria Simples de Viga nos forneça dados satisfatórios, a embarcação em análise terá que ter coeficientes L/B e L/D maiores que oito. Para coeficientes menores, o comportamento estrutural começa a sofrer influência da deflexão ocorrida em outras direções (B e D), e a Teoria passa a não produzir resultados coerentes com esse comportamento.

Para a análise da Teoria Simples de Viga é necessário tecer algumas considerações. De acordo com Hughes (2010) a viga-navio não poderá ter descontinuidades ou aberturas, sendo essencialmente prismática, distorções causadas por cisalhamento não afetam a momento de flexão, podendo ser tratadas separadamente. Ademais, o material é considerado homogêneo e elástico.

É importante destacar que apenas materiais contínuos por mais de 2/3 do comprimento do navio devem ser considerados na análise da Estrutura Primária da embarcação. Pois elementos de comprimento menor que 2/3 do comprimento do navio tem curvatura de deflexão muito inferior à curvatura de deflexão da viga-navio, não contribuindo com a rigidez da viga-navio (TANCREDI, 2004).

Assumindo que não há forças axiais, a equação 1 permite calcular a distribuição da tensão primária.

$$\sigma_x = \frac{My*(z-Z_{LN})}{I} \quad (1)$$

Onde σ_x é a tensão primária, que ocorre na direção x, My é o momento fletor na seção de análise, z é a altura a partir da quilha, Z_{LN} é a linha neutra da seção transversal da estrutura e I é o momento de inércia da mesma seção transversal. Nota-se, a partir da equação 1, que a variação da tensão primária ao longo do pontal da embarcação apresenta um comportamento linear, sendo constante em um plano horizontal para a mesma altura z.

A viga-navio está sujeita a dois tipos de forças atuantes, a de seu próprio peso, que é contraposta pela força da pressão hidrostática exercida no casco, o empuxo. Por ser uma viga auto equilibrada, sem possuir nenhum vínculo em suas extremidades, considera-se que trata-se de uma “viga livre-livre”.

A solicitação estrutural somente acontece quando o sistema de forças se encontra em equilíbrio. Pois do contrário, o navio desenvolve movimento de corpo rígido ao invés de deformações estruturais.

Para que o equilíbrio seja satisfeito é necessário determinar o calado e o ângulo de trim que resultem na somatória nula de forças e momentos. Assim, o empuxo tem que ser necessariamente igual ao peso do navio, pois caso essa condição não seja satisfeita, uma correção no calado médio da embarcação deverá ser realizada até que atinja seu equilíbrio.

Além da primeira condição de equilíbrio, a diferença entre o posicionamento do centro de flutuação longitudinal (LCB) e do centro de gravidade longitudinal (LCG) fará com que esse conjunto de forças não se anulem, formando um binário. É rigorosamente necessário que o posicionamento desses dois centros seja igual. Para corrigir essa diferença, faz-se uma correção no ângulo de trim da embarcação, variando-se o calado tanto na popa quanto na proa da embarcação, até que esse equilíbrio seja alcançado.

Usualmente, embarcações tem um peso estrutural maior na parte da popa, devido a superestrutura e ao maquinário, o qual costuma ser arranjado na parte de trás do navio. Desta

feita, um trim de popa deve ser realizado para forçar um deslocamento no LCB até que este se alinhe com o LCG da embarcação.

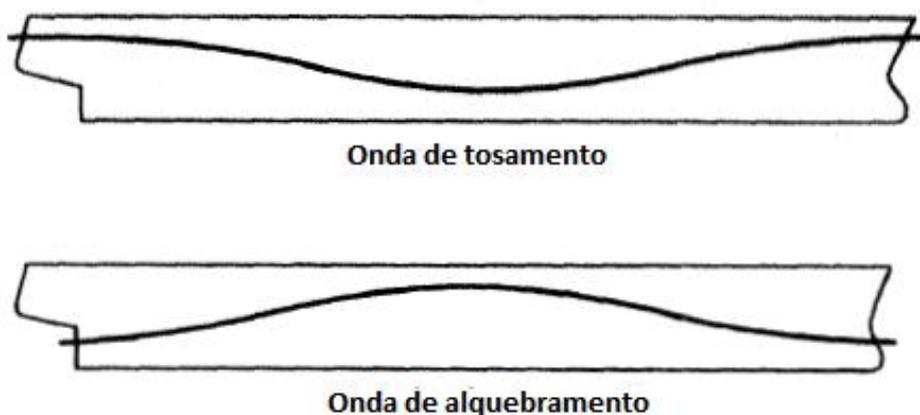
Modificando o ângulo de trim do navio, tem-se conseqüentemente uma mudança do calado ao longo da embarcação, modificando o empuxo e possivelmente fazendo com que a primeira condição de equilíbrio não seja mais satisfeita. Sendo assim, o equilíbrio da viga-navio é um processo iterativo, mas de rápida convergência (TANCREDI, 2004).

Além de uma análise de equilíbrio para águas calmas, sem interferência de ondas, é necessário avaliar o comportamento da estrutura da embarcação com forças relativas a ondas atuando sobre o casco. Segundo Barabanov (1966) em um navio, a disposição relativa de peso e empuxo é influenciada por fatores tais como o carregamento e as condições de serviço. Enquanto o primeiro pode permanecer praticamente inalterado ao longo de uma viagem, o último irá mudar com a passagem de cada uma das ondas. Assim, as cargas resultantes atuando sobre um navio variam com o tempo.

Essas ondas geram uma diferença de calado ao longo do comprimento de embarcação, resultando em uma variação do empuxo por todo o comprimento. Assim, para a análise estrutural, deve-se sempre verificar a pior condição de sollicitação, que em geral ocorre para uma onda de comprimento igual ao comprimento do navio.

O instante em que vales da onda se encontram alinhados com as extremidades da embarcação, e existe uma única crista a meia nau, é chamada de Alquebramento. A configuração inversa, com o vale na meia nau é denominada Tosamento. As duas possíveis configurações podem ser visualizadas na figura 4.

Figura 4 - Configurações de onda no navio



Fonte: Tupper (2014, p. 128)

Após a determinação do equilíbrio da viga-navio, se faz necessário avaliar a curva de carga da embarcação, obtida através da soma do peso com o empuxo.

A curva de peso é obtida analisando cada seção da viga-navio, com elementos de massa significativa, dispostos como cargas distribuídas ao longo do comprimento do componente.

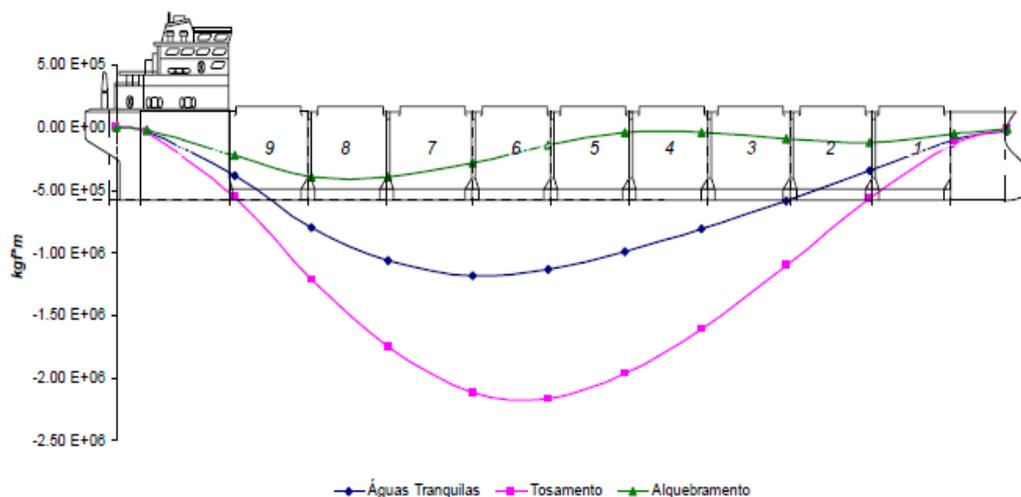
A curva de flutuação é encontrada de maneira mais complexa, obtida por meio da integração do volume submerso de cada seção ao longo do comprimento. Porém, para navios prismáticos com coeficiente de bloco alto, como petroleiros e graneleiros, pode-se aproximar o volume deslocado com relativa precisão.

Segundo Tancredi (2004) uma possibilidade é aproximar a área submersa $A(x)$ pelo produto do calado $T(x)$ e a boca $b(x)$ ambos medidos na posição longitudinal x do navio. Pode-se então aplicar uma correção com um coeficiente de forma, como por exemplo, o C_b . Tancredi (2004) também relata que essa aproximação tem defeitos óbvios e pode ser utilizada para navios de seções simples e prismáticas.

Integrando a curva de carga da embarcação se pode determinar a curva de força cortante, a qual integrada resulta na curva de momento fletor ao longo da viga-navio. Através da análise dessa curva é possível determinar as seções que sofrem a maior sollicitação de momento fletor.

Naturalmente, sem a interferência de ondas, a embarcação terá um comportamento referente à sua distribuição de carga, podendo ser típico de Tosamento ou Alquebramento. A interferência de onda agravará ou suavizará esse comportamento, como podemos analisar na figura 5.

Figura 5 - Gráficos de momento fletor para águas tranquilas, ondas de Tosamento e Alquebramento



Fonte: Tancredi (2004, p.16)

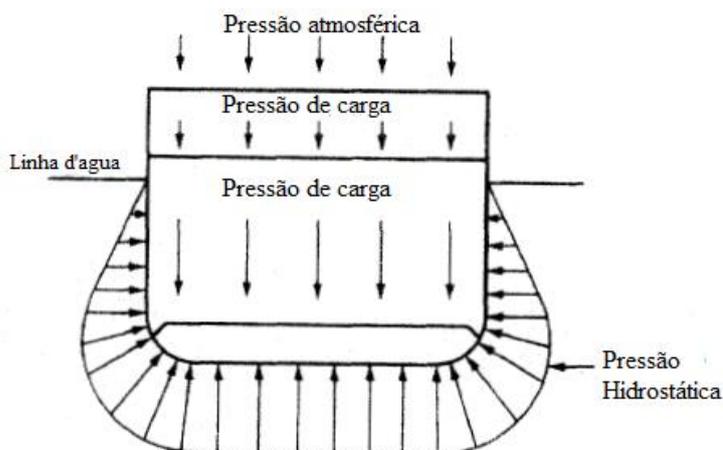
Por fim, para análise de esforços globais da estrutura da embarcação, é necessário verificar a secção que sofre maiores esforços, a qual normalmente se localiza próximo à meia nau.

Essas secções de máximo esforço estrutural devem ser analisadas separadamente, englobando os efeitos das tensões locais atuantes, para que em uma composição de esforços a estrutura consiga suportar todo o carregamento sem que sofra falhas estruturais.

2.3. TENSÕES LOCAIS

Além das tensões primárias da embarcação, provenientes da sua distribuição de carregamento, a estrutura sofre também deformações locais no casco, causadas pela pressão hidrostática ou carga atuante, como ilustra a figura 6.

Figura 6 - Pressão atuante na secção mestra da embarcação



Fonte: Tupper (2013, p. 127)

Essas cargas de pressão interna e externa podem ter importantes efeitos estruturais locais e devem ser consideradas na concepção do projeto estrutural da embarcação (LEWIS, 1988). O painel estrutural de uma embarcação consiste, portanto, no conjunto de chapeamentos e reforçadores chamados de perfis leves e perfis pesados, o qual deve ajudar a combater esforços estruturais gerados localmente na estrutura do navio.

Como citado anteriormente, as tensões locais são divididas em tensões nos reforçadores (secundárias) e tensões na unidade de chapeamento (terciárias). Tais esforços serão analisados e seus devidos cálculos analíticos discutidos nas seções seguintes.

2.3.1. Tensões secundárias

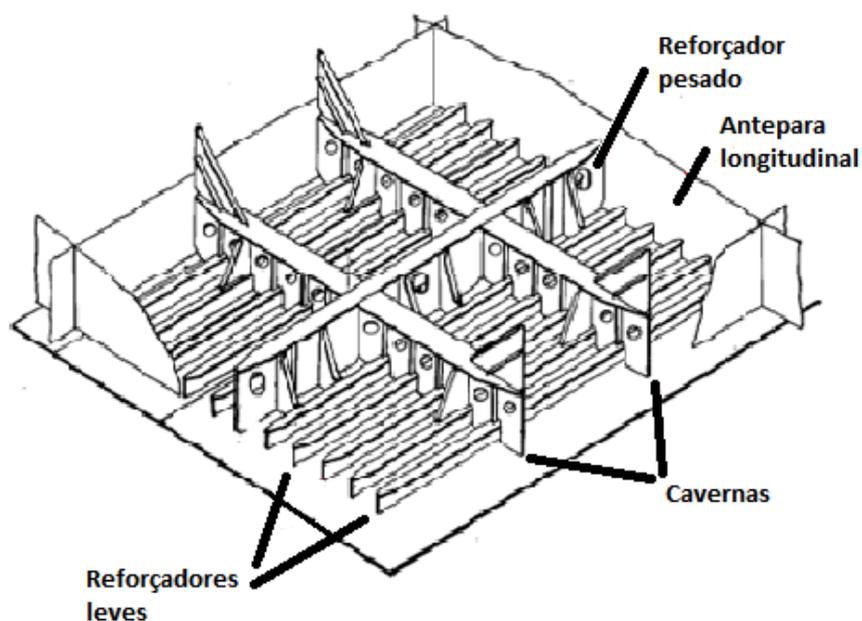
A estrutura secundária de uma embarcação consiste nos elementos longitudinais que reforçam todo o chapeamento do casco. Esses reforçadores podem ser divididos em leves e pesados, de acordo com a grandeza de sua rigidez flexional.

Perfis pesados, de maior rigidez flexional, são limitados na transversal pelas anteparas do navio, por suportarem uma ordem de grandeza de rigidez flexional superior ao do próprio perfil, limitando suas deflexões. Para perfis leves, a limitação pode ocorrer tanto por cavernas quanto por anteparas na transversal, já que sua rigidez flexional é uma ordem de grandeza inferior as dos perfis pesados.

Muitas vezes, contudo, as cavernas têm a mesma ordem de grandeza de rigidez flexional de perfis pesados. Logo, mesmo que não se limite a sua deformação, elas servirão como apoio elástico, reduzindo sua amplitude de deformação.

Como os resultados analíticos encontrados serão maiores do que realmente representam, limitar a deformação do perfil pesado somente na antepara é considerada apropriada e tornam os cálculos conservadores. Todos esses elementos são mostrados na figura 7.

Figura 7 - Reforçadores longitudinais e transversais



Fonte: Augusto (2004, p.5)

Partindo do pressuposto que os reforçadores, tanto leves quanto pesados, possuem a dimensão de seu comprimento muito maior que as outras dimensões, o elemento pode ser

tratado como uma viga. Porém, diferentemente da estrutura primária, a viga está totalmente ligada à estrutura do navio, assim não poderá ser tratada como um comportamento livre-livre.

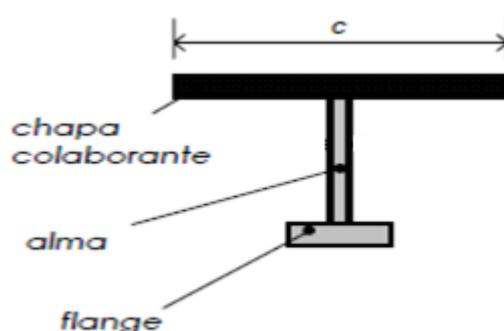
Segundo Mathai (2013), a análise de carregamento da estrutura secundária é calculada de maneira semelhante ao da estrutura primária, com a tensão calculada a partir da distribuição de cargas, porém considerada como um painel complexo composto, apoiado ou engastado nas laterais, em vez de como feixe simples.

Normalmente, considera-se que compartimentos adjacentes tenham carregamentos análogos, o que acarreta em planos de simetria que impedem a rotação de um reforçador longitudinal no plano onde se localiza um reforçador transversal (no caso de reforçadores leves) ou antepara transversal (no caso de reforçadores pesados) (MARTINS, 2014).

Deste modo, em virtude da simetria da deformação, considera-se que não existe rotação nos vínculos, sendo assim modelados como engastes, com restrição de movimentos e rotações em todas as direções.

Isolar um elemento reforçador do painel requer que se estabeleçam hipóteses sobre a distribuição de cargas entre as várias vigas em que se considera o chapeamento reforçado. Cada uma dessas vigas é constituída de um perfil e de uma parte de chapeamento a ele associada, chamada de chapa colaborante (AUGUSTO, 2004a), conforme visualizado na figura 8.

Figura 8 - Perfil de reforçador com a chapa colaborante



Fonte: Augusto (2004, p.7)

Esse modelo de chapa colaborante é utilizado para correção do efeito de “shear lag” no campo de tensão secundário. Esse fenômeno é decorrente da distribuição irregular do campo de tensão na chapa conectada ao perfil. Conforme Augusto (2004a), o aspecto significativo da distorção causada pelo cisalhamento faz com que as regiões mais afastadas do flange apresentem menores tensões de flexão e são, portanto, menos efetivas do que as regiões mais

próximas. Deste modo, é realizada uma correção para que seja utilizada somente a porção de chapeamento que efetivamente enrijece o reforçador.

Como a pressão atuante no painel estrutural não se encontra agindo diretamente sobre o reforçador, é necessário encontrar uma largura de carga efetiva nos reforçadores. Nos cálculos analíticos, uma maneira de obter essa largura é considerar que carga atuante entre os perfis, é dividida igualmente entre ambos os perfis, assim considera que a largura de carga equivale a distância entre perfis.

Como os reforçadores são tratados como elementos de viga, a maneira de calcular a tensão secundária é análoga à utilizada para cálculo da tensão primária, descrita pela equação 1, com os valores referentes ao reforçador. M é o momento fletor atuante na seção do perfil, z é a distância medida na posição vertical para a linha neutra do perfil (Z_n) e I é o momento de inércia da secção do perfil mais chapa colaborante.

Analisando-se a fórmula, observa-se novamente um comportamento linear ao longo da altura do perfil, no eixo z , como acontece com a tensão primária.

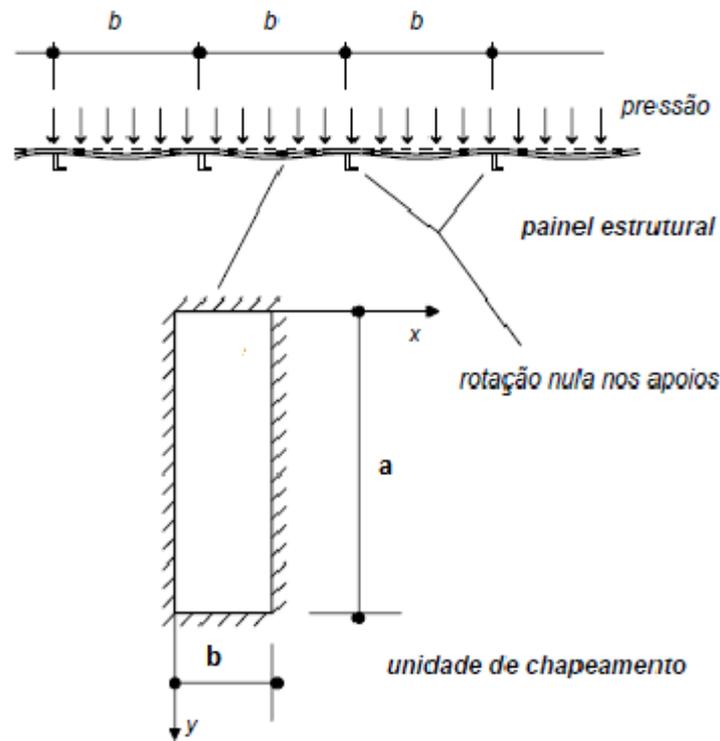
Como o carregamento da tensão secundária é, em partes, proveniente da pressão hidrostática, teremos uma variação conforme a profundidade do local em que será analisado. Assim, quanto maior o calado do local do reforçador analisado, maior será a coluna d'água existente e, conseqüentemente, maior será a tensão secundária. Logo, normalmente existem tensões secundárias maiores no fundo da embarcação, a não ser que haja cargas de peso significativo sobre algum convés da embarcação.

2.3.2 Tensão terciária

A estrutura terciária do navio corresponde à análise de uma unidade de chapeamento. Segundo Lewis (1988), a tensão terciária descreve a força fora do plano de deflexão e associado a um painel individual de chapeamento. O carregamento é normal ao painel e suas fronteiras são limitadas por quatro reforçadores quaisquer, ou outras descontinuidades geométricas.

Como explanado na seção anterior, normalmente se considera a distribuição similar de carregamento entre porções, evitando rotações nos apoios das chapas (perfis), logo a chapa é considerada engastado nos quatro lados, conforme visto na figura 9.

Figura 9 - Unidade de chapeamento de uma embarcação



Fonte: Augusto (2004, p.21)

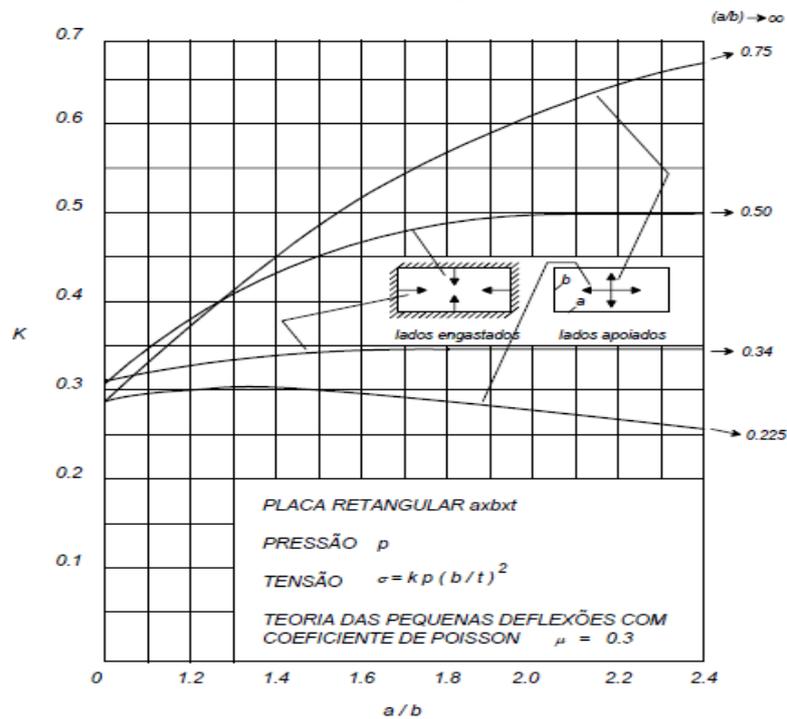
Ao contrário do que ocorre nas vigas, na qual a flexão ocorre apenas ao longo do comprimento, as chapas têm componentes longitudinais e transversais.

Quando o lado maior (a) se alinha com a direção longitudinal, ou seja, a distância entre cavernas é maior do que o espaçamento entre perfis leves longitudinais, diz-se que o cavernamento da embarcação é longitudinal, caso contrário, o cavernamento é transversal.

Como as embarcações de grande porte costumam apresentar uma grande componente referente à flexão da viga navio, utiliza-se cavernamento longitudinal em sua estrutura.

Em virtude da baixa curvatura de deflexão, pode-se assumir a hipótese de pequenas deflexões e, por considerar rotações nulas nos apoios (reforçadores), estes são considerados do tipo engaste, e uma análise gráfica, proposta por Navier (1820), apud Augusto (2004a), é comumente utilizada na engenharia naval, como podemos visualizar na figura 10.

Figura 10 – Tensões em placas retangulares



Fonte: Augusto (2004, p.20)

Assim como na tensão secundária, a amplitude da tensão dependerá da variação da profundidade do local analisado, portanto, a tensão terciária depende do calado do local da chapa analisada.

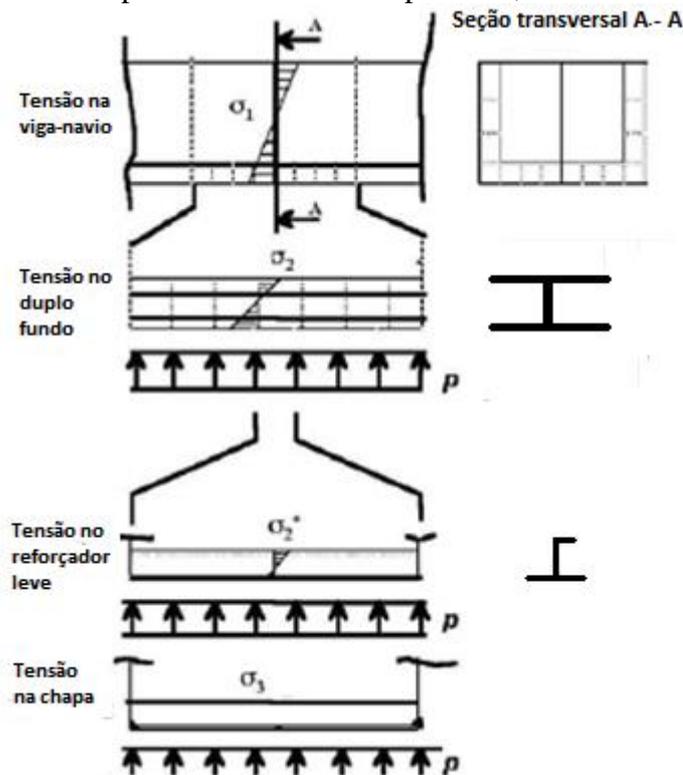
2.4. COMPOSIÇÃO DE TENSÕES

Uma vez que todos os métodos de cálculos das tensões primárias, secundárias e terciárias pressupõem comportamento elástico linear da estrutura, um procedimento cumulativo deverá ser aplicado para tensões na mesma direção, a fim de se obter o valor de tensão combinada (LAMB, 2004).

Mesmo que a análise na unidade de chapeamento retorne em tensões tanto longitudinais como transversais, tensões em estruturas de embarcações de grande porte são, em sua maior parte, longitudinais. O presente trabalho analisará somente tensões longitudinais, comparando com a tensão de escoamento do aço utilizado na construção de uma embarcação.

Para a combinação de tensões, podemos verificar o comportamento das três seções no corte transversal de uma embarcação conforme figura 11.

Figura 11 - Comportamento de tensão primária, secundária e terciária



Lamb (2003, p.18-34)

Segundo Lamb (2003), as três componentes de tensão podem nem sempre ocorrer no mesmo instante de tempo em que o navio se move nas ondas e, também, a pressão máxima em um painel não necessariamente ocorrerá na seção de maior momento fletor.

Porém, no dimensionamento estrutural devemos sempre contar com a pior situação de esforços possível, portanto, a análise de composição de tensões é realizada de maneira a considerar que a seção em que ocorrerá o maior momento fletor, terá também a maior pressão atuante.

2.5. OTIMIZAÇÃO

Os problemas de otimização envolvem a minimização de função de uma ou mais variáveis num determinado domínio, sendo que, geralmente, existe um conjunto de restrições impostas ao problema (SILVA, 2007).

A engenharia de estruturas é uma das áreas onde há maior aplicação de técnicas de otimização, onde se visa obter uma redução da massa estrutural sem que a estrutura em si sofra uma falha estrutural.

Um arranjo estrutural mais pesado pode ser mais resistente do que um mais leve, porém esse peso extra pode acarretar falta de eficiência e custos mais elevados.

O processo de otimização consiste na busca de uma relação ótima entre o peso estrutural e a carga máxima suportada, em que a estrutura possa resistir sem que ocorra uma falha.

De acordo com Chaves (2012), estruturas navais são exemplos típicos de arranjos estruturais baseados no conceito de eficiência estrutural, a redução da massa de aço do navio pode assegurar a redução do seu custo de fabricação e um melhor desempenho operacional.

Segundo Silva (2007), existem basicamente três abordagens em otimização estrutural: paramétrica, de forma e topológica. Na otimização paramétrica são otimizadas as dimensões (ou a razão das dimensões) da estrutura, mantendo-se a sua forma pré-definida. Na otimização de forma são alterados os contornos (internos e externos) da estrutura. Finalmente na otimização topológica encontram-se novos "buracos" de forma ótima no domínio estrutural.

Este estudo apresentará uma otimização estrutural paramétrica, com o objetivo único de diminuir a massa estrutural. Esse processo trata-se de um típico problema mono objetivo, que trará uma solução ótima após uma função objetivo ser agregada.

Para o desenvolvimento da otimização, escolheu-se trabalhar com um algoritmo genético. Segundo Tancredi apud. Goldberg (2004), os algoritmos genéticos são técnicas de busca inspiradas em mecanismos de genética e seleção natural. Dada uma população inicial de soluções, ocorre a evolução até que a população convirja para uma única solução (no caso de problemas mono objetivo), por meio de aplicação de operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação.

A partir de um conjunto inicial de soluções, aplicam-se operadores de reprodução aos indivíduos, gerando uma nova população. Indivíduos menos aptos são descartados e um novo cruzamento ocorre com aqueles de maior aptidão, similar a um processo de seleção natural. Se o critério não foi satisfeito, o procedimento é realizado novamente, tornando-se iterativo até a convergência da solução. O fluxograma apresentado na figura 12 descreve o funcionamento de um algoritmo genético até a solução.

Figura 12 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético



Fonte: Tancredi (2008, p.36).

A aplicação do processo de otimização ao modelo desenvolvido neste trabalho, tem como objetivo encontrar o conjunto ótimo de variáveis, definido como espaçamentos entre reforçadores longitudinais e cavernas. Além disso, restrições ao processo serão realizadas, como o limite de espessuras e o módulo de seção mestra impostos pela classificadora ABS, assim como um fator de segurança imposto pelo escoamento do aço utilizado.

2.6. VIBRAÇÃO EM ESTRUTURAS NAVAIS

Vibração é o ramo da engenharia que lida com o movimento repetitivo de sistemas mecânicos em relação a uma posição nominal (geralmente equilíbrio) ou uma estrutura estacionária. A vibração pode ser prejudicial a estruturas, sendo importante verificar a possibilidade de ressonância da estrutura do navio com as principais fontes excitatórias a bordo (INMAN, 2001).

Segundo Rao (2008), recentemente, muitas investigações foram motivadas devido à aplicação de vibração na área da engenharia, como projeto de máquinas, estruturas, fundações, motores, turbinas e sistemas de controle.

Vibrações em embarcações, quando em ressonância, são de grande preocupação, uma vez que podem ocasionar sérios danos aos navios, prejudicando a capacidade de operação ou até mesmo o conforto da tripulação. Outrossim, o fenômeno pode provocar fadiga, que pode acarretar danos em equipamentos ou até mesmo um colapso estrutural (FIGUEIREDO, 2012).

O fenômeno de ressonância ocorre quando a frequência de operação de um sistema coincide com sua frequência natural, ocasionando vibrações excessivas que podem ser catastróficas. Tal acontecimento atua como amplificador mecânico que faz com que o sistema passe a vibrar com amplitudes de deslocamento cada vez maiores. O prognóstico das frequências naturais de vibração em um navio permite evitar condições de ressonância durante sua operação (MOURA, 2014).

Portanto, além da análise de resistência, é indispensável realizar, no projeto estrutural de embarcações, um estudo dos modos de vibrações aos quais o sistema eventualmente estará submetido, verificando se alguma das frequências naturais de elementos estruturais não coincide com os modos de vibrar do propulsor e do motor da embarcação.

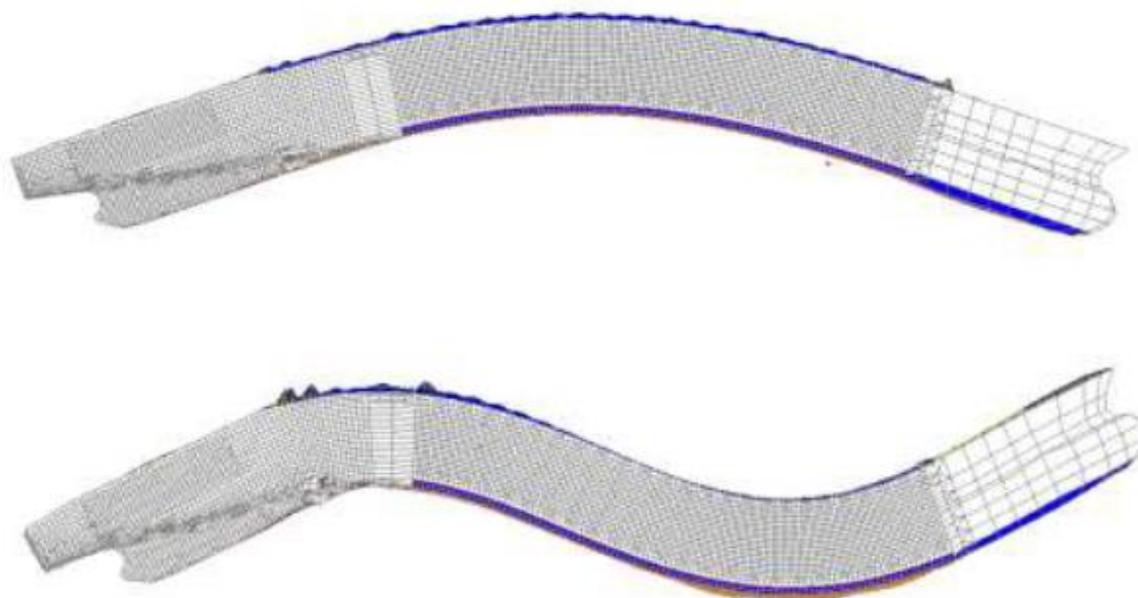
Em uma estrutura de navio, a vibração pode ocorrer de duas formas: a vibração da viga-navio e a vibração local, nesses casos a resposta da vibração de um dado sistema depende da intensidade das forças de excitação e de características (amortecimento, rigidez e inércia) do sistema (FIGUEIREDO, 2012).

2.6.1. Vibração da viga-navio

Conforme Figueiredo (2012), a vibração da viga-navio ocorre para a embarcação como um todo, e pode ocorrer em três formas: lateral (vertical e horizontal), torsional e longitudinal. Dentre essas, a vibração vertical é, sem dúvida, a mais importante de ser estudada, visto que nessa a frequência natural da viga-navio é mais baixa que as outras frequências ocorrentes.

Um exemplo de vibrações verticais em uma viga-navio pode ser visualizado na figura 13, na qual se descrevem os dois primeiros modos de vibrar de um navio.

Figura 13 - 1º e 2º modo de vibrar da viga navio



Fonte: Figueiredo (2012, p. 60 e 61)

A vibração da viga-navio ocorre de maneira livre, sem vínculos. Porém, o que a difere do comportamento de uma viga simples, é que a embarcação estará submersa.

A energia cinética total do sistema é a soma da energia do corpo com a do fluido em que está em movimento. Se o fluido é o ar, a energia é muito baixa em razão da baixa densidade e o efeito sobre a frequência de vibração pode ser ignorado com segurança. Quando o fluido é a água, a densidade desta é muito maior e a energia cinética gerada não pode ser negligenciada (TUPPER, 2013).

Assim, ao analisar a vibração da viga-navio, verifica-se um fator de correção relacionado à reação das partículas conforme o casco se movimenta na água, este fenômeno é chamado de massa adicional.

2.6.2. Vibração em reforçadores e chapas

A vibração local da estrutura, em reforçadores e chapas, mesmo ocorrendo em frequências superiores às da viga-navio, devem ser estudadas.

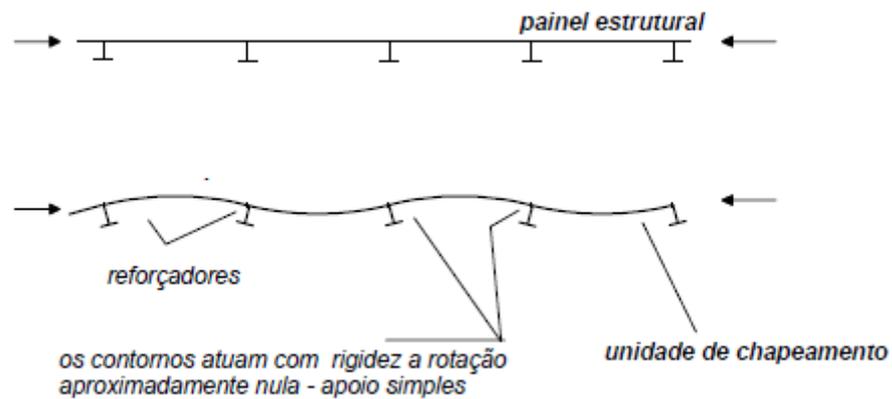
Diferentemente da análise estrutural secundária e terciária, onde consideramos vínculos do tipo engaste, o vínculo considerado para vibrações em reforçadores e chapas é do tipo apoio.

Segundo Augusto (2004), reforçadores garantem elevada rigidez em relação a deslocamentos transversais de placas, porém não se pode dizer o mesmo quanto a rigidez da

rotação. Portanto, na medida em que uma vibração em reforçadores e unidades de chapeamento causam movimentos de rotação, uma melhor aproximação se dá para vínculos do tipo apoio para tais análises.

A figura 14 mostra o comportamento dos apoios devido a rotação, tal procedimento é considerado tanto no fenômeno de vibrações em reforçadores e chapas, quanto na flambagem¹ de chapas.

Figura 14 - Comportamento dos apoios no movimento de rotação da chapa



Fonte: Augusto (2004b, p. 37)

¹ Deformações na chapa, que podem ser permanentes ou não. Ocorre principalmente em peças que tem uma área transversal muito menor comparado com suas outras dimensões

3. CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA DE SÍNTESE

A ferramenta de síntese proposta no presente trabalho foi totalmente desenvolvida via Software Excel, sendo todos os passos realizados a fim de tornar o processo automático, levando em consideração toda a teoria analítica de estruturas navais apresentada na fundamentação teórica.

Este capítulo apresenta a construção da ferramenta de síntese, demonstrando as típicas seções mestras utilizadas para graneleiros, petroleiros e porta contêineres, a implementação da norma da classificadora ABS, bem como a explicação de como foi desenvolvida a planilha automatizada para obtenção de tensões críticas.

3.1. A SEÇÃO MESTRA

Antes de dimensionar a seção mestra, é preciso entender a definição desta. Segundo Fonseca (2005), chama-se seção mestra a maior das seções transversais de um casco, situando-se coincidentemente com a seção a meia nau, ou próximo desta. Em muitos navios modernos, e particularmente nos navios mercantes de carga, a região central do casco é constituída por seções iguais a seção mestra numa distância apreciável.

Na engenharia estrutural, considera-se a seção mestra aquela na qual o corte transversal está sujeito a maior solicitação estrutural na embarcação. Em se tratando de navios cargueiros, com formas cheias e um corpo médio paralelo relativamente alto, as duas seções normalmente coincidem.

Apesar das semelhanças, devido ao tipo de carga transportada, ou até mesmo embalagem (contêiner), esses três perfis de cargueiros têm suas particularidades quanto ao projeto estrutural da seção mestra.

Portanto, para implementar uma única ferramenta que funcione para graneleiros, porta contêineres e petroleiros, será analisado as similaridades existentes, assim como toda particularidade em cada tipo de embarcação em análise, para implementar cada seção mestra considerada na ferramenta de síntese.

3.1.1. A seção mestra de um petroleiro

Por definição da IMO, petroleiro é toda embarcação construída ou adaptada a transporte de hidrocarbonetos em seus espaços de carga, incluindo todo tipo de óleo e seus derivados (LAMB, 2004).

Devido ao transporte de grande volume de petróleo por via marítima, a poluição ambiental causada por navios petroleiros ganhou vulto a partir de 1967, após o acidente com o *Torrey Canyon*, quando 120.000 (cento e vinte mil) toneladas de petróleo foram derramadas no mar (JURAS, 2002).

A partir desse contexto, acordos foram firmados no âmbito da IMO, para prevenir poluição acidental e operacional de embarcações (JURAS, 2002). Dentro das conferências, destaca-se a *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships* (MARPOL), por meio do protocolo de 73 e, seguindo alterações 1978 e 2003, com o objetivo de diminuir a probabilidade de ocorrência de evasão de óleo após uma colisão, foram estabelecidas orientações a serem seguidas nos valores do duplo costado e fundo. Com base na (IACS,2014), o duplo costado para petroleiros é obtido a partir da equação 2.

$$H_{DS} = \text{mínimo}\left(0,5 + \frac{Dwt}{20000} ; 2\right) \quad [\text{m}] \quad (2)$$

Onde Dwt é o porte bruto da embarcação, e segundo a IACS (2014) além de usar a equação 2, o valor mínimo para o duplo costado é de um metro. Utilizaremos esta equação para definir a distância do duplo costado tanto no petroleiro, quanto no porta contêiner.

Para o cálculo da altura do duplo fundo, a mesma IACS (2014) sugere, para petroleiros, o uso da equação 3.

$$H_{DB} = \text{mínimo} \left(\frac{B}{15} ; 2 \right) \quad [\text{m}] \quad (3)$$

Além desta, estabelece-se que o duplo fundo de petroleiros não poderá ser menor que um metro (IACS, 2014). A mesma equação é utilizada para definir a altura do duplo fundo para porta contêineres.

Por transportar carga líquida, qualquer movimento de *roll*² na embarcação pode causar o deslocamento do centro de gravidade da carga para um de seus bordos acarretando problemas

² Movimento de rotação no eixo do comprimento da embarcação.

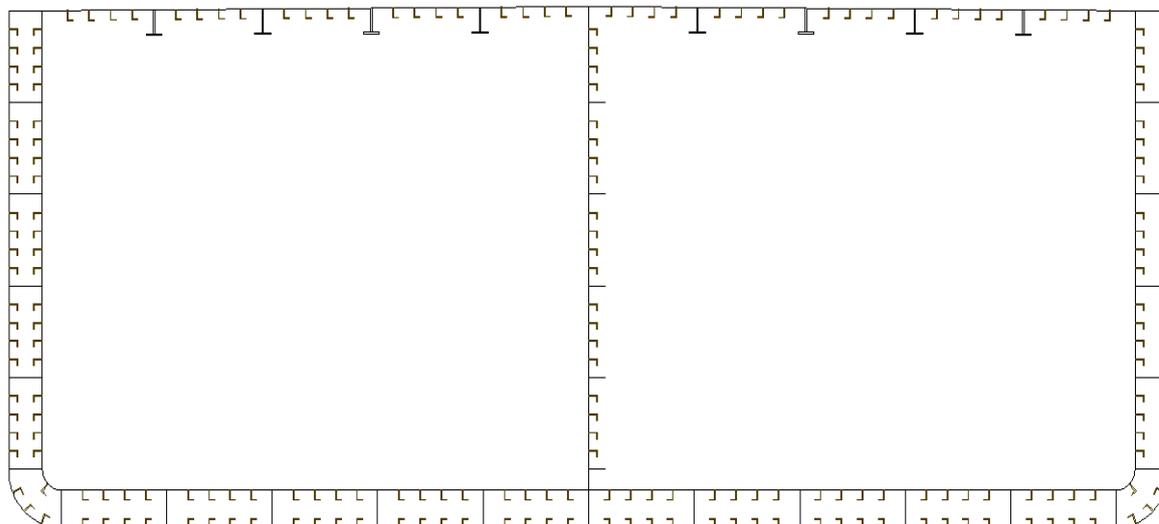
de estabilidade transversal. Tal efeito é agravado ainda mais quando o tanque está parcialmente cheio, pois permite uma maior movimentação da carga. Esse problema é habitualmente chamado de efeito de superfície livre.

Com a finalidade de amenizar o efeito de superfície livre no petroleiro, esses tipos de embarcação dispõem de pelo menos uma antepara longitudinal.

A partir dessas definições, no presente trabalho será obedecida a orientação para largura de duplo fundo e duplo costado, enquanto que a quantidade de anteparas longitudinais na embarcação ficará a cargo do projetista e será um dado de entrada definido pelo usuário.

A figura 15 mostra uma típica seção mestra de um petroleiro.

Figura 15 - Seção mestra de petroleiro utilizada na ferramenta de análise



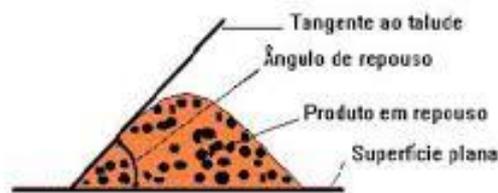
Fonte: O Autor (2016)

3.1.2. A seção mestra de um graneleiro

Graneleiros são embarcações destinadas ao transporte de carga a granel em seus porões de carga. Para atender a carga e descarga de grãos, seus porões possuem grande abertura em suas escotilhas, que se estendem por grande parte do comprimento do navio, evitando que o convés principal contribua efetivamente para a rigidez flexional da seção mestra, portanto, o dimensionamento da sua seção não possui um convés completo.

Ao se carregar o granel no formato sólido no porão de carga, esta acaba não ocupando todo espaço do tanque, formando um ângulo relativo com a horizontal, chamado de ângulo de repouso do talude. Como pode ser visto na figura 16.

Figura 16 - Ângulo de repouso de talude



Silva e Corrêa (2013, p.26)

Analisando o carregamento de grãos no porão de carga, podemos notar que esses grãos não vão ocupar o espaço que fica entre o costado e o convés na parte superior, e, aliando esse fato com a necessidade de uma resposta à rigidez flexional perdida pela existência da escotilha de carga, pode-se aproveitar esse espaço para a adição de reforçadores chamados de tanque de asa. Como grãos transportados por um graneleiro normalmente não ultrapassam um ângulo de repouso de 30°, esse valor é, usualmente, adotado para o dimensionamento do tanque de asa.

Por muitas vezes a carga dessa embarcação é mais pesada que a água e o navio pode ter problemas para atingir a condição de equilíbrio estático. Portanto, para que graneleiros não tenham esses problemas, utilizam-se espaços destinados apenas à flutuação, os chamados tanques de bojo, que também servem para aumentar a rigidez flexional da seção mestra.

Em um graneleiro, não se deve ter reforçadores longitudinais no costado, para não haver acúmulo de grãos em cima do reforçador. Portanto, no costado teremos apenas reforçadores leves na parte interna dos tanques de bojo e de asa.

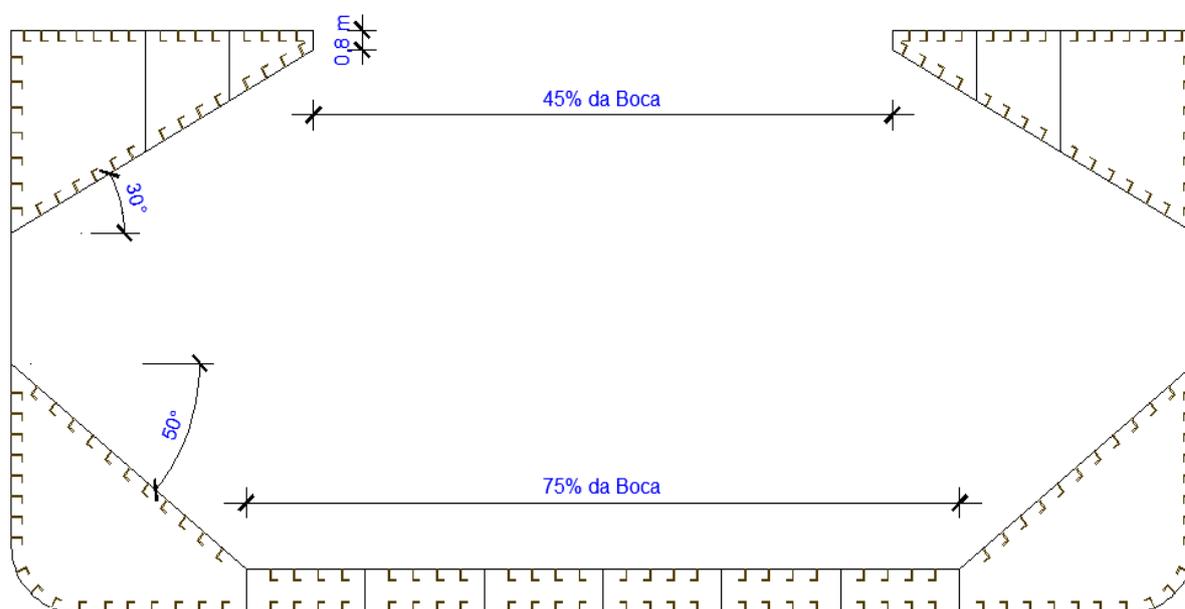
A partir da IACS (2014), a equação 4 descreve a altura do duplo fundo para graneleiros.

$$H_{DB} = \text{mínimo} \left(\frac{B}{20}; 2 \right) \quad [\text{m}] \quad (4)$$

A despeito da equação 4, o valor mínimo do duplo fundo de graneleiros é de 0,76 m (IACS, 2014).

Todo dimensionamento utilizado no presente trabalho pode ser visualizado na figura 17, assim como as proporções de cada tanque já citado.

Figura 17- Seção mestra de graneleiro utilizada na ferramenta de análise



Fonte: O Autor (2016)

Nota-se que foi deixada a distância entre o tanque de asa e o convés com um valor fixo de 800 mm, independentemente do tamanho da embarcação estudada.

Ao analisar o costado da seção mestra do graneleiro na figura 16, nota-se que o alto espaçamento entre cavernas poderia causar uma unidade de chapeamento de dimensões elevadas, potencializando tensões terciárias, podendo causar efeitos de flambagem nas chapas. Para amenizar tais problemas, graneleiros comumente possuem cavernas com dimensionamento próprio no costado, estas são chamadas cavernas de costado.

No presente trabalho, tais cavernas foram dimensionadas de modo que tenham 1/3 do tamanho de uma caverna comum, e seu espaçamento, é dado de entrada na planilha, quando utilizado o graneleiro.

3.1.3. A seção mestra de um porta contêiner

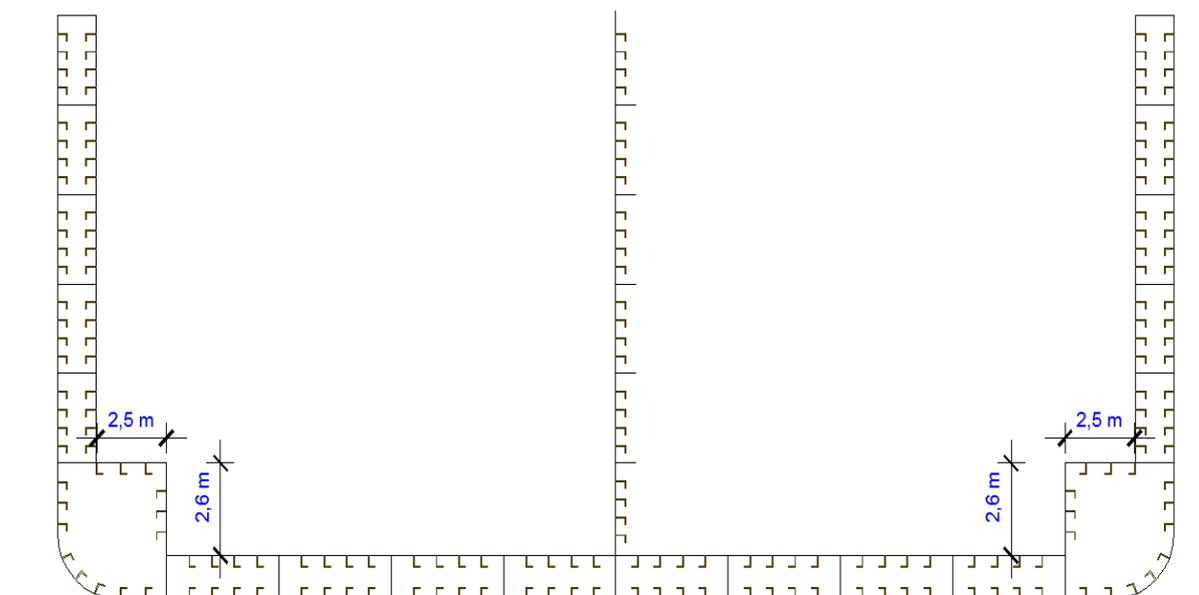
Desde o final dos anos 1950, o contêiner revolucionou o transporte por via marítima e terrestre de carga geral em todo o mundo. A embarcação especializada no transporte de contêiner é um elemento chave num sistema intermodal desenvolvido para eficientemente transportar contêineres pelo oceano (LAMB, 2004).

Para se adaptar ao transporte desse tipo de embalagem de uma forma com que seu carregamento e descarregamento seja fácil e rápido, porta contêineres não contam com um convés contínuo, o que pode gerar problemas na elaboração de seu projeto estrutural.

A fim de contrapor a deficiência de rigidez que a falta de convés implica, porta contêineres possuem tanto duplo fundo quanto duplo costado. Além disso, com o bojo curvo, a embarcação poderia perder espaço de carga devido ao formato do contêiner, portanto, se faz necessário projetar o bojo com um formato retangular, e de preferência, contando com a largura do container.

Todo o dimensionamento da seção mestra utilizado no presente trabalho está representado na figura 18.

Figura 18 - Seção mestra de porta contêiner utilizada na ferramenta de análise



Fonte: O Autor (2016)

Considerou-se o transporte de contêineres tradicionais de 20 e 40 pés, com uma largura de 2,44 metros e altura de 2,59 metros. Contudo, independentemente do tamanho da embarcação analisada, o bojo terá uma medida horizontal de 2,5 metros e 2,6 metros na vertical.

A disposição dos reforçadores, em todas as seções mestras, assim como a quantidade da antepara longitudinal, serve apenas de maneira ilustrativa, visto que o primeiro será encontrado como objetivo deste trabalho e o segundo será dado de entrada inserido pelo usuário na planilha de análise.

3.2. APLICAÇÃO DA NORMA DA ABS

Um dos objetivos de uma sociedade classificadora é verificar a integridade estrutural do navio, através do desenvolvimento e aplicação de regras próprias e pela verificação do cumprimento de regulamentos internacionais e/ou nacionais em nome da bandeira (IACS, 2011).

Deste modo, para a realização do projeto de uma embarcação mercante, é necessário que ela atenda todas as normas de uma classificadora autorizada a desempenhar o papel de estado de bandeira.

Por se tratar de uma das classificadoras mais reconhecidas na América, e também a proximidade com as normas técnicas para projeto estrutural fornecida pela empresa, para o desenvolvimento proposto foram escolhidos os regulamentos da ABS como restrições a serem seguidas na ferramenta. Portanto, a partir do livro de regras para embarcações de aço “*Part 3 – Hull Construction and Equipment*”, pode-se tirar todo o dimensionamento do projeto estrutural no capítulo 2 - “*Hull Structures and Arrangements*”.

Como o objetivo principal desse trabalho é a obtenção da melhor configuração de seção mestra para uma embarcação mercante, foram utilizadas normas apenas referentes às partes integrantes daquela, como espessuras de chapeamentos a meia nau, módulo de seção dos reforçadores longitudinais e o módulo requerido da seção mestra, assim como o momento fletor em ondas, importante para determinar a tensão primária atuante.

Para elementos estruturais que não entram no processo de otimização, como as anteparas transversais, foram realizadas aproximações, pois um dimensionamento mais refinado desses reforçadores não acarretaria em mudanças no objetivo do trabalho. Consideram-se anteparas transversais como uma chapa, com espessura dada como a máxima encontrada entre as espessuras de chapa da seção mestra, com um fator multiplicativo de 1,3 referente ao corrugado³.

A ABS utiliza em suas normas algumas variáveis que condizem com as dimensões do navio, suas definições estão presentes no capítulo 1 do mesmo livro. O L a ser utilizado nas equações condiz com o comprimento entre perpendiculares, a incógnita d , o calado de projeto e D_s o pontal.

³Antepara cujo perfil é ondulado, gerando uma maior resistência. Comumente utilizado na construção naval nos dias atuais.

3.2.1. Espessuras de chapas

Para a espessura do fundo, foi utilizado a regra 3.13, da seção 2. Onde define-se que a espessura do chapeamento do fundo (t) a meia nau para embarcações com o cavernamento longitudinal, não poderá ser menor que o obtido a partir das seguintes equações.

$$t_{fundo} = \left(\frac{s}{671}\right) * \sqrt{(L - 18,3) * \left(\frac{d}{D_s}\right)} + 2,5 \quad [mm] \quad (5)$$

$$t_{fundo} = \left(\frac{s}{508}\right) * \sqrt{(L - 62,5) * \left(\frac{d}{D_s}\right)} + 2,5 \quad [mm] \quad (6)$$

$$t_{fundo} = \left(\frac{s}{661}\right) * \sqrt{(L + 105) * \left(\frac{d}{D_s}\right)} + 2,5 \quad [mm] \quad (7)$$

Onde a equação (5) é utilizada para embarcações com L menor que 122 metros, a equação (6) para embarcações com L entre 122 e 305 metros e a equação (7) para embarcações com L maior que 305 e menor que 427 metros.

A incógnita s das equações é o espaçamento longitudinal entre reforçadores presentes na chapa do local dimensionado, tal incógnita aparece também nas formulações para espessuras de chapas em outras partes da seção mestra.

Para a espessura do costado foi utilizado a regra 3.9, da seção 2. Onde define-se que a espessura mínima do costado a 40% do comprimento L (t), para embarcações com até 427 metros, deverá ser obtida a partir das seguintes equações.

$$t_{costado} = \left(\frac{s}{645}\right) * \sqrt{(L - 15,2) * \left(\frac{d}{D_s}\right)} + 2,5 \quad [mm] \quad (8)$$

$$t_{costado} = \left(\frac{s}{828}\right) * \sqrt{(L + 175) * \left(\frac{d}{D_s}\right)} + 2,5 \quad [mm] \quad (9)$$

Onde a equação (8) é utilizada para embarcação com o L menor que 305 metros e a equação (9) para embarcações entre 305 e 427 metros.

Para a espessura do convés foi utilizada a regra 3.9, da seção 3. Onde a espessura do convés a meia nau (t) não poderá ser superior ao valor obtido a partir das seguintes equações.

$$t_{convés} = \frac{s*(L+48,76)}{26*L+8681} \quad [mm] \quad (10)$$

$$t_{convés} = \frac{24,38*s}{1615,4-1,1*L} \quad [mm] \quad (11)$$

Onde a equação (10) é utilizada para embarcações com o L menor que 183 metros e a equação (11) para embarcações com o L maior que 183 metros e menor que 427 metros.

A espessura do duplo fundo (t) é definida a partir da regra 9.1 da seção 4, onde não poderá ser inferior a obtida a partir da seguinte equação, para embarcações com L inferior a 427 metros.

$$t_{df} = 37 * L * 10^3 + 0,009 * s - c \quad [mm] \quad (12)$$

Onde c é equivale a 1,5 para embarcações com cavernamento longitudinal.

Segundo o item 3.15 da seção 2, a espessura de quilha de placa plana, é 1,5 milímetro maior que a espessura do casco de fundo associado ao perfil. No presente trabalho, será utilizado o mesmo critério para escoas.

A espessura do bojo foi aproximada para a mesma medida utilizada no chapeamento do fundo, assim como a do duplo bojo será a mesma definida para o duplo fundo.

Vimos que para diferentes comprimentos de embarcação, a norma sugere diferentes tipos de equações. Para que o dimensionamento ocorra de maneira automática e atenda diferentes tamanhos de navios, encontra-se condições “se” na planilha de acordo com o comprimento entre perpendiculares da embarcação fornecido pelo usuário, permitindo a utilização da equação correta.

3.2.2. Módulo de Seção dos reforçadores

A norma também impõe equacionamentos para o módulo de seção dos reforçadores, com base no chapeamento a qual este reforçador estará ligado, baseado na distância longitudinal “ s ”, e a distância transversal entre seus suportes “ l ”, definida como a distância entre anteparas para reforçadores pesados e entre cavernas para leves.

Reforçadores pesados que serão ligações entre duplo casco, são considerados como apenas uma chapa de ligação com espessura referente a 1,5 mm a mais que a chapa de casco solidário ao reforçador, e seu modulo de seção é desconsiderado na análise.

A partir do item 11.3 da seção 4, é definido que cada reforçador que será associado ao chapeamento do fundo, não poderá ter um módulo de seção menor que o obtido a partir da equação:

$$SM = 7,8 * c * h * s * l^2 \quad (12)$$

Onde c é definido como sendo 1,3 e h é a distância da quilha até a altura de linha de carga, ou $2/3$ da distância até o convés, o que for maior. Considera-se a altura da linha de carga como sendo o calado, portanto, é inserido no valor de h uma função “máximo” entre o valor do calado e o valor de $2/3$ do pontal, para assim, utilizar o valor correto.

Para reforçadores localizados no teto do duplo fundo, o item 11.5 da seção 4, diz que o módulo de seção desses reforçadores deverá ser no mínimo 85% necessário para longitudinais de fundo. Portanto, o valor mínimo é utilizado no dimensionamento deste perfil.

Para o modulo de seção de reforçadores longitudinais de costado e convés, a mesma equação de fundo (11) é utilizada, mudando apenas os valores dos espaçamentos longitudinais e transversais, como as constantes c e h .

É possível determinar a partir do item 3.1 da seção 7 o dimensionamento para longitudinais de costado e convés, com o valor da constante c de 1 para reforçadores no costado e 0,585 para o convés.

Para reforçadores no costado, a constante h é definida como o valor máximo entre o valor do calado menos a altura do duplo fundo ou $2/3$ da linha do reforçador até o convés. Para reforçadores no convés, o valor de h é definido como sendo o valor de $p/7,04$, onde p é a pressão exercida no local. Foi considerado a pressão referente a um metro de coluna d’agua, portanto, o valor de h no convés é de 1,39.

3.2.3. Momento fletor em ondas

A ABS não sugere equações para o cálculo do momento fletor em aguas calmas, porém, através de uma distribuição de pesos e flutuação fornecida pelo usuário é possível determinar o momento fletor em águas calma analiticamente. Todo procedimento é descrito na seção 3.4.1.

Para a obtenção da parcela de momento fletor em ondas, foi utilizada o item 3.5.1 da seção 1, onde o valor do momento fletor em ondas, expresso em kN.m, pode ser obtido a partir das seguintes equações:

$$M_{ws} = -k_1 * C_1 * L^2 * B * (Cb + 0,7) * 10^{-3} \quad (13)$$

$$M_{wh} = k_2 * C_1 * L^2 * B * Cb * 10^{-3} \quad (14)$$

Onde M_{ws} corresponde a parcela de momento em ondas de alquebramento, e M_{wh} corresponde a parcela de tosamento.

As constantes k_1 e k_2 são definidas como 110 e 190 respectivamente. A constante C_1 presente nas equações varia de acordo com a embarcação de análise, conforme visto na tabela 1.

Tabela 1 - Valores da constante C_1 nas equações de momento em ondas

Valor utilizado	Comprimento da embarcação
$10,75 - \frac{(300 - L)^{1,5}}{100}$	$90 > L > 300$ m
10,75	$300 > L > 350$ m
$10,75 - \frac{(L - 350)^{1,5}}{150}$	$350 > L > 500$ m

Fonte: O Autor (2016)

Da mesma forma que acontece com as espessuras, é necessário colocar uma condição “se” para que na planilha seja utilizada a equação correta.

3.2.4. Módulo de Seção mestra mínimo e requerido

Com base no capítulo 2, seção 1, item 3.7.1(b), o módulo de seção mestra a meia nau não poderá ser menor que o obtido pela seguinte equação:

$$SM_{mín} = C_1 * C_2 * L^2 * B * (Cb + 0,7) \quad [cm^2.m] \quad (15)$$

Onde C_1 é obtido a partir da tabela 1 e C_2 é equivalente a 0,01.

A norma ainda exige que o módulo da seção mestra seja superior ao módulo de seção requerido, definido no item 3.7.1(a) da seção 1. Onde diz que o módulo de seção mestra também não poderá ser inferior ao valor obtido a partir da equação:

$$SMreq = \frac{Mt}{fp} \quad [cm^2 \cdot m] \quad (16)$$

Onde fp é uma constante referente a tensão nominal admissível, considerado 17,5 kN/cm². O valor de Mt é referente ao momento fletor total, que corresponde a soma algébrica do momento fletor em aguas calmas com a flexão induzida por ondas. Utiliza-se o maior somatório obtido, entre ondas de tosamento e alquebramento.

3.3. PARAMETROS DE ENTRADA NA FERRAMENTA

Os parâmetros de entrada da ferramenta de análise são inseridos nos campos em cor branca, os quais são mostrados na figura 19.

Figura 19 - Parâmetros de entrada da ferramenta de análise

Parametros de entrada	
Tipo embarcação	
Peso bruto (dwt)	t
Loa	m
Lpp	m
Boca	m
Pontal	m
Cb	-
Cm	-
Carga no porão	Mpa [N/mm ²]
Carga no convés	Mpa [N/mm ²]
σ_e	Mpa
$\rho_{aço}$	kg/m ³
$E_{aço}$	Mpa
Nº de anteparas longitudinais	-
Número de pás	-
Rotação do propulsor	rpm
Rotação do motor	rpm

Fonte: Elaborado pelo autor

Todos os parâmetros de entrada são direcionados em pelo menos alguma análise durante a planilha, portanto são indispensáveis para o funcionamento da mesma.

Na janela “tipo de embarcação”, o usuário terá fixado apenas três escolhas, são elas os tipos de embarcações analisadas: petroleiro, graneleiros e porta contêiner. Tal cédula é fundamental para que ocorra aplicações de individualidades decorrentes de cada tipo de seção mestra discutidas na fundamentação teórica apresentada.

Como já foi mencionado no item 3.1.1 do presente trabalho, para o dimensionamento do duplo costado, o porte bruto da embarcação entra como variável na equação, portanto, trata-se de um parâmetro de entrada.

Entradas referentes às dimensões principais da embarcação são fundamentais em diferentes cálculos dentro da planilha, como acontece com o coeficiente de bloco (C_b). Além disso, pela utilização do comprimento entre perpendiculares (L_{pp}) ser empregado em cálculos referentes a normas da ABS, e o comprimento de roda a roda (Loa) ser a melhor aproximação para o cálculo da massa total estrutural, as duas medidas referentes ao comprimento são indispensáveis.

Tendo em vista que embarcações desse porte normalmente tem uma seção de formato retangular, com um ângulo nulo entre a chapa do fundo e o plano horizontal, podemos a partir do coeficiente de seção mestra (C_m), realizar cálculos geométricos para determinar o raio de bojo, que é um importante parâmetro para dimensionamento da seção mestra.

Considerando a simplificação de que a curvatura do bojo representa $\frac{1}{4}$ da circunferência de raio de bojo, deduz por geometria o dimensionamento do mesmo, presente na equação 17.

$$R_{bojo} = \sqrt{\frac{B \cdot T \cdot (1 - C_m)}{0,4292}} \quad (17)$$

A partir das análises em situações de ondas de alquebramento e tosamento, onde o calado varia de maneira senoidal ao longo do comprimento, deve-se ajustar o calado para realizar tais análises. Aproximando a seção mestra para meia nau e o comprimento de onda com o comprimento do navio, o calado em ondas é encontrado a partir da equação 18.

$$T_{ondas} = T \pm \frac{Loa}{40} \quad (18)$$

Onde a parcela de $Loa/40$ é somada para onda de alquebramento e subtraída para onda de tosamento.

Como o calado tem influência direta na pressão hidrostática, a variação do mesmo influenciará nas tensões locais que estão sujeitas a tal pressão. Portanto, constantes são criadas dividindo o calado em ondas pelo calado normal, para servir de fatores multiplicativos na composição de tensão em pontos em que estão sujeitos a pressão hidrostática, conforme visto nas equações 19 e 20.

$$Alq = \frac{T_{alquebramento}}{T} \quad (19)$$

$$TOS = \frac{T_{tosamento}}{T} \quad (20)$$

Parâmetros referentes a carga no convés e no porão, são fundamentais para analisar a pressão que será exercida nos reforçadores e na unidade de chapeamento, portanto é necessário que o usuário insira tais dados.

Alguns dados de entrada com relação ao material utilizado na construção são necessários. A tensão de escoamento “ σ_e ” do aço é fundamental para análise do fator de segurança na composição de tensões, assim como a massa específica “ $\rho_{aço}$ ” é parâmetro imprescindível para determinação da massa total do aço. O módulo de elasticidade “ $E_{aço}$ ” é um parâmetro relacionado a rigidez flexional do material, e por ser dado de entrada referente a análise de vibração que será realizada, é necessário que seja também inserido como parâmetro inicial.

A existência da antepara longitudinal na seção mestra será por escolha do usuário, assim como a sua quantidade, na qual deverá ser escolhido entre os números fixadas de 0, 1, 2 ou 3 anteparas.

Para viabilizar a comparação com os modos de vibrar obtidos na análise de vibração da viga navio, unidade de chapeamento e reforçador, são inseridos dados referentes a rotação do propulsor e do motor, assim como o número de pás, que servirá como fator multiplicativo da rotação do propulsor. Tais parâmetros, deverão desviar-se das frequências naturais encontradas na estrutura.

Além dos parâmetros de entradas descritos na figura 19, para realizar a distribuição de carga na embarcação, é necessário inserir dados referentes a grupos de pesos presentes no navio. Como demonstrado na figura 20, são sugeridas estimativas para o peso em aço inicial, *outfit* e superestrutura. Cabe ao usuário copiar o valor sugerido, ou mesmo inserir um valor mais preciso.

Figura 20 - Grupo de pesos de entrada

Pesos adicionais			
Grupo de pesos	Peso [t]	$x_{inicial}$ [m]	x_{final} [m]
Peso em aço			
Sugerido [Watson, 2002]		0	loa
Outfit			
Sugerido [Watson, 2002]		0	loa
Superestrutura			
Sugerido [Amorim 1986]		-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Mesmo que o peso em aço seja calculado posteriormente, além de ser o objetivo do processo de otimização, uma estimativa preliminar do mesmo é necessária para o cálculo do momento fletor da embarcação. Watson (2002) sugere uma estimativa do peso em aço baseado no numeral E, com uma correção para o coeficiente de bloco, conforme mostrado nas equações 18 e 19.

$$W_s = k * E^{1,36} * [1 + 0,5 * (Cb' - 0,7)] \quad (18)$$

$$E = Lpp * (B + T) + 0,85 * Lpp * (P - T) + \sum l_i * h_i \quad (19)$$

Onde k é 0,032 para petroleiros, 0,031 para graneleiros e 0,036 para porta contêineres. O valor de Cb' é o coeficiente de bloco referente a 80% do pontal, porém, será utilizado o Cb de entrada. O valor de $\sum l_i * h_i$ é referente a casarias e superestruturas, como é utilizada outra estimativa para superestrutura, essa parcela será ignorada.

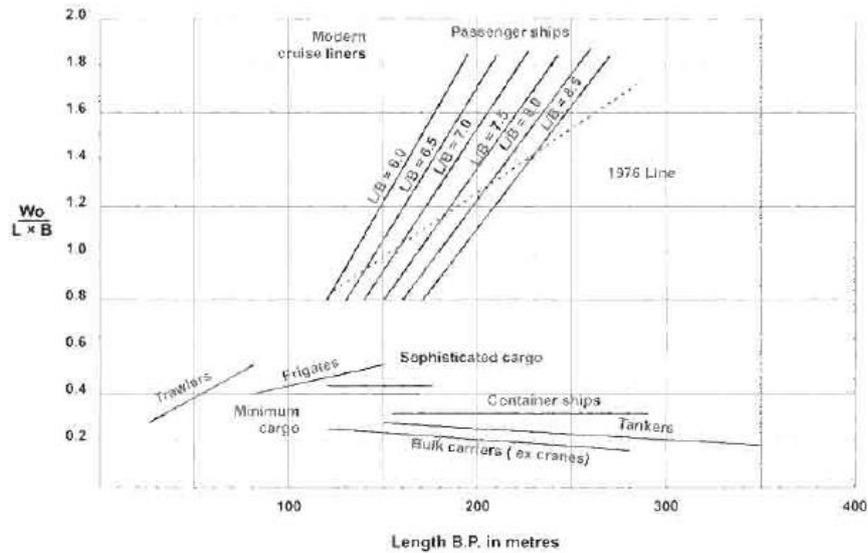
Do mesmo Watson (2002), foi estimado também o peso de *outfit*⁴, considerado através da equação 20.

$$W_o = C_o * Lpp * B \quad (20)$$

O valor de C_o pode ser encontrado graficamente, para diferentes tipos de embarcação, conforme ilustrado na figura 21.

⁴Corresponde ao grupo de pesos de equipamentos de salvatagem, móveis, aparelhos elétricos, pinturas, guindastes e outros mais possíveis.

Figura 21 - Coeficiente de *outfit* para diferentes tipos de embarcações



Fonte: Watson (2002, p.100)

Mesmo as linhas para determinação de C_o para as três embarcações estudadas apresentarem uma pequena inclinação, foram considerados valores fixos de C_o , 0,23 para petroleiros, 0,2 para graneleiros e 0,3 para porta contêineres.

Para sugestão de peso da superestrutura, foi utilizado a tese de Amorim (1983), onde o cálculo para qualquer tipo de embarcação é demonstrado na equação 21.

$$P_{sup} = 160 + 0,0084 * L_{pp} * B \quad (21)$$

Além do peso em si, é necessário inserir valores referentes a posição do peso no navio, como sugestão, o peso de aço e *outfit* pode ser distribuído ao longo do navio todo, começando em zero e terminando em Loa . Para a superestrutura, não existe sugestão de posicionamento.

Para inserção de outros grupos de peso, fica em aberto na planilha mais sete grupos, onde deverá ser inserido o peso próprio do elemento, assim como sua posição inicial e final.

Por fim, as cédulas referentes a espaçamentos longitudinais e transversais também estão presentes na aba de entrada da planilha, porém, como serão as variáveis no processo de otimização, seus valores não são inseridos pelo usuário, sendo resultados do processo de otimização.

3.4. CALCULO DA TENSÃO PRIMÁRIA

O cálculo da tensão primaria da estrutura pode ser dividido em duas grandes partes. A primeira é a busca pelo momento máximo presente na viga navio, a partir da soma do momento fletor para o mar calmo com a parcela do momento fletor na presença de ondas.

A segunda é referente a propriedades da seção mestra, obtidas distinguindo elemento por elemento na seção para assim encontrar a linha neutra e o momento de inércia total, porém, antes disso, é necessário realizar a escolha dos reforçadores da seção.

3.4.1. Momento fletor em águas calmas

Para o cálculo do momento fletor máximo em águas calmas, foi realizado um processo onde se divide a embarcação metro a metro em todo seu comprimento, para assim encontrar o peso e a flutuação exercida sobre cada trecho de navio. Com isso, pode-se traçar a curva de carga resultante da embarcação, obtida pela soma dessas duas componentes.

Ao se encontrar a distribuição de carga, pode-se através de um processo de integração achar a curva de força cortante, para assim encontrar através de outra integração a distribuição de momento fletor ao longo da viga.

Na planilha desenvolvida, a curva de momento fletor é obtida a partir dos componentes de peso informados nos dados de entrada. Primeiramente realiza-se uma distribuição de peso por metro de cada componente, dividindo o peso total do componente pela diferença entre a sua posição final e inicial na embarcação. Para a distribuição ocorrer de maneira automática, uma coluna por elemento é criada, para então ser inserida em cada unidade de metro de Loa, uma função “se”, que fará com que só preencha valores dentro do intervalo de atuação do elemento.

Após distinguir o peso que estará presente em cada metro de comprimento, realiza-se uma soma para cada medida. Assim, se encontra a distribuição de carregamento da embarcação ao longo do comprimento.

Para determinar a curva de flutuação deve-se levantar a curva de área em cada posição longitudinal do navio, que representa a área submersa da baliza. Como já discutido na seção 2.2, encontrar essa curva pode ser um processo bem complicado, e como a ferramenta desenvolvida visa o projeto de embarcações de seção prismática e de formato simples, uma maneira eficiente e simplificada de obter a flutuação ao longo do comprimento consiste na multiplicação do calado, boca e coeficiente de forma na posição analisada.

O calado para cada posição de comprimento x dependerá do ângulo de trim resultante, e sua equação é expressa abaixo.

$$T(x) = T_{m\u00e9dio} + \left(\frac{Loa}{2} - x\right) * \tan(trim) \quad (22)$$

Com base na equa\u00e7\u00e3o 22, se for aplicado um trim alto, o calado em uma regi\u00e3o distante a meia nau poder\u00e1 exceder tanto o pontal da embarca\u00e7\u00e3o, quanto apresentar um valor negativo. Portanto, fun\u00e7\u00f5es “se” s\u00e3o inseridas de maneira a limitar o calado entre zero e o pontal.

Na medida em que a posi\u00e7\u00e3o x analisada est\u00e1 afastada do corpo m\u00e9dio paralelo da embarca\u00e7\u00e3o, esta sofrer\u00e1 uma perda de flutua\u00e7\u00e3o, devido ao levante de popa e proa, redu\u00e7\u00e3o da boca e curvatura mais acentuada do bojo.

Afim de obter um fator de corre\u00e7\u00e3o na flutua\u00e7\u00e3o fora do corpo m\u00e9dio paralelo, que ser\u00e1 chamado de FC_F , foi utilizado um arranjo de uma embarca\u00e7\u00e3o do tipo petroleiro, presente na literatura Lamb (2004), que pode ser visualizado no anexo A. A partir desse arranjo, foram efetuadas aproxima\u00e7\u00f5es para tais medidas que afetam na flutua\u00e7\u00e3o, encontrando assim um fator de corre\u00e7\u00e3o para cada posi\u00e7\u00e3o x de comprimento da embarca\u00e7\u00e3o. Como a planilha funcionar\u00e1 para embarca\u00e7\u00f5es de diferentes medidas, o fator foi aplicado em porcentagem de comprimento, e pode ser visualizado na tabela 2.

Tabela 2 - Corre\u00e7\u00e3o da flutua\u00e7\u00e3o em rela\u00e7\u00e3o ao comprimento

% do Loa da embarca\u00e7\u00e3o	Fator de corre\u00e7\u00e3o na flutua\u00e7\u00e3o (FC_F)
1%	0.0000
3%	0.1012
5%	0.1805
8%	0.3956
10%	0.6096
15%	0.7636
20%	0.8820
23%	0.9405
Entre 24% e 78%	1 (Corpo m\u00e9dio paralelo)
79%	0.9247
82%	0.8990
85%	0.8250
90%	0.6391
93%	0.4667
95%	0.3400
97%	0.1380
99%	0.0330
100%	0.0000

Fonte: O Autor (2016)

A varia\u00e7\u00e3o da boca em cada comprimento x ser\u00e1 inserida apenas na rela\u00e7\u00e3o de corre\u00e7\u00e3o, e al\u00e9m disso, aplica-se a multiplica\u00e7\u00e3o do coeficiente de se\u00e7\u00e3o mestra (C_m) para cada posi\u00e7\u00e3o,

de modo que, no corpo médio paralelo, na ausência de correção ($FC_F = 1$), a área de flutuação é aproximada a multiplicação da boca pelo calado e pela correção de C_m , conforme proposto na equação:

$$B(x) = T(x) * B * C_m * FC_F(x) \quad (23)$$

Porém, antes de obter o momento máximo, é necessário realizar as condições de equilíbrio da viga navio. Para isso, um botão com uma macro⁵ acoplada é adicionada a planilha, com sequencias de entrada que realizam o procedimento de equilibrio da viga-navio. O botão é nomeado como “calcular tensões” e localiza-se na aba de entrada da planilha.

As sequencias de entrada da macro acoplada ao botão calcular tensões pode ser visualizadas na tabela 3.

Tabela 3 - Sequencias de entrada da macro "calcular tensões"

Comando	Função correspondente
<code>Range("B45").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("B9")</code>	Igualar flutuação e carga através da variação do calado
<code>Range("B49").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("B51")</code>	Igualar LCB e LCG através da variação do ângulo de trim

Fonte: O Autor (2016)

A cédula B45 corresponde à diferença entre o somatório da flutuação e carga ao longo do comprimento, e através da mudança da cédula B9 correspondente ao calado. O comando faz com que este somatório chegue ao valor de zero. Da mesma forma ocorre a igualdade do valor de LCB e LCG, onde a cédula B49 corresponde à diferença entre LCB e LCG e a cédula B51 corresponde ao ângulo de trim.

Porém, como já citado no presente trabalho, o equilíbrio da viga navio é um processo iterativo, onde a realização de uma condição de equilíbrio poderá interferir na outra.

Para que ocorra a convergência entre os dois comandos, as sequencias de entrada da macro são realizadas cinco vezes, valor que é suficiente para obter valores próximos de zero em ambas as condições de equilíbrio.

⁵Sequencias de comandos e funções armazenadas que podem executar sempre a mesma tarefa de maneira rápida. A macro gravada no excel, armazena as informações a cada etapa realizada a medida que o usuário vai executando as ações.

Sendo assim, após a realização do equilíbrio da viga, retira-se o valor máximo absoluto na curva de momento fletor em águas calmas, para que somado com a parcela em ondas, obter o valor máximo de momento fletor na qual a embarcação está sendo submetido.

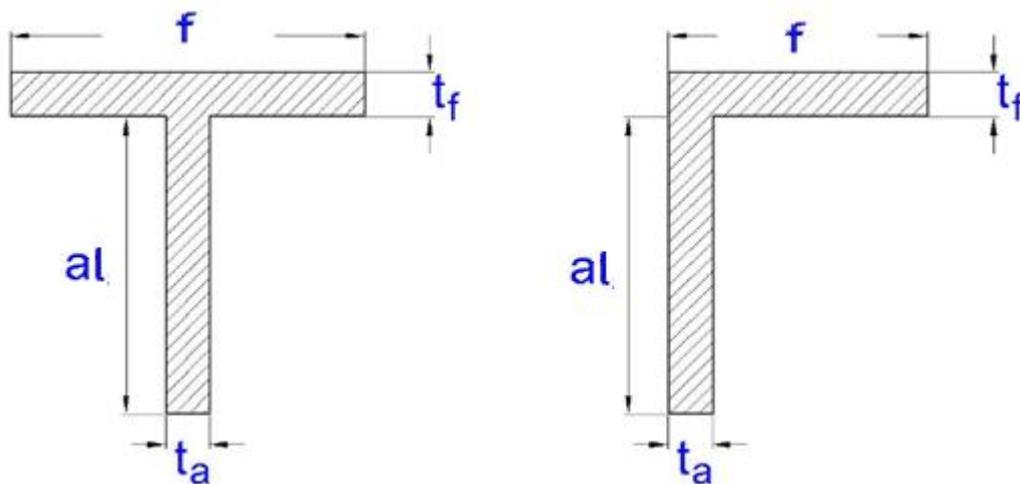
Como convenção de sinal, adota-se que valores positivos de momento fletor correspondem a situação de tosamento, enquanto valores negativos representam o alquebramento. A computação dos sinais é de suma importância para que a soma algébrica entre o máximo momento fletor em águas calmas com a parcela em ondas seja realizada de maneira correta.

3.4.2. Seleção dos reforçadores

Para obter as propriedades da seção mestra, antes é necessário realizar a seleção dos reforçadores longitudinais presentes na seção mestra. O dimensionamento de quilhas e escoas não será realizado, pois esses perfis serão chapas únicas ligando o casco externo e interno. Já para os reforçadores leves e sicordas, deve-se selecionar perfis com módulo de seção maior que o calculado pela norma.

Para isso, criou-se um catalogo de reforçadores, baseados em perfis (“L” e “T”). Os desenhos dos reforçadores utilizados no presente trabalho podem ser visualizados na figura 22.

Figura 22 - Típicos reforçadores utilizados



Fonte: O Autor (2016)

A partir das dimensões da alma e flange mostrados na figura 22, encontra-se o valor respectivo da área, linha neutra e inercia. Após isso, valores referentes a chapa interligada ao reforçador são adicionados nestes cálculos, como espessura e espaçamento entre reforçadores, que servirá como um flange extra, abaixo do reforçador. Então, novos valores de área, linha

neutra e inercia são calculados, e o valor do módulo de seção para o reforçador pode ser obtido com base na equação 24.

$$SM_{ref} = \frac{Inercia}{Máximo (LN_{perfil}; t_{chapa} + a_l + t_f - LN_{perfil})} \quad (24)$$

Onde os valores de Inercia e LN_{perfil} presentes na equação são referentes ao conjunto reforçador e chapa, enquanto que a espessura t_{chapa} refere-se a chapa colaborante.

A partir da criação do catálogo, é necessário que a seleção do reforçador ocorra de maneira automática. Para isso, os reforçadores são colocados de maneira crescente no valor de módulo de seção projetado para leves de fundo, e então, seleciona-se o perfil que seja um valor imediatamente maior que o valor calculado na norma.

3.4.3. Propriedades da seção mestra

A seção mestra é composta por reforçadores e chapas que estão dispostas em diferentes posições, tanto na longitudinal quanto na transversal, e em alguns casos, em uma posição inclinada com a horizontal.

Deste modo, para realizar o cálculo de linha neutra, momento de inercia total e módulo de seção projetado precisa-se dividir a seção mestra em elementos cujo propriedades de momento de inercia são conhecidas e facilmente calculadas, como de um retângulo.

Porém, como visto na seção 3.1, as seções mestras estudadas têm suas particularidades, visto que alguns elementos são presentes em somente um ou dois casos de seção. Deste modo, além de distinguir o elemento analisado, deverá analisar a quantidade presente na seção mestra de interesse.

Afim de tornar-se um processo automatizado, todos os elementos presentes nas três seções são expostos, e a partir da escolha do tipo de embarcação selecionada na planilha, condições “se” fazem com que se selecione elementos apenas referentes ao tipo de seção mestra definido pelo usuário.

Toda a divisão de elementos realizadas no presente trabalho pode ser visualizada na tabela 4, assim como as condições particulares de cada um dos tipos de navio considerados.

Tabela 4 - Divisão de elementos da seção mestra de petroleiro, graneleiro e porta contêiner

Elemento	Petroleiro	Graneleiro	Porta contêiner
Chapa de convés	Sim	55% da boca	Não
Chapas de costados	Sim	Sim	Sim

Chapas de duplos costados	Sim	Não	Sim
Chapas de fundo	Sim	Sim	Sim
Chapas de duplo fundo	Sim	75% da boca	Sim
Chapas de bojo circular	Sim	Sim	Sim
Chapas de duplo bojo circular	Sim	Não	Não
Sicordas em L ou T	Sim	Não	Não
Escoas	Sim	Não	Sim
Quilha central	Sim	Sim	Sim
Demais quilhas	Sim	Sim	Sim
Reforçadores leves no convés	Sim	Sim	Não
Reforçadores leves no costado e duplo costado	Sim	Só no costado	Sim
Reforçadores leves no fundo	Sim	Referentes a 75% da boca	Sim
Reforçadores leves no duplo fundo	Sim	Referentes a 75% da boca	Sim
Reforçadores leves no bojo	Sim	Sim	Sim
Reforçadores leves no duplo bojo	Sim	Não	Não
Chapas de tanques de asa	Não	Sim	Não
Chapas de tanques de bojo	Não	Sim	Não
Reforçadores tanque de asa	Não	Sim	Não
Reforçadores tanque de bojo	Não	Sim	Não
Sicordas Graneleiro	Não	Sim	Não
Ligação convés/tanque de asa	Não	Sim	Não
Duplo bojo vertical	Não	Não	Sim
Duplo bojo horizontal	Não	Não	Sim
Antepara longitudinal	0,1,2 ou 3, com base no dado de entrada		

Fonte: O Autor (2016)

Como a presença de antepara longitudinal é dado de entrada, funções “se” são aplicadas para definir a quantidade presente. Assim sendo, foi utilizado como aproximação nos cálculos a consideração de que uma antepara equivale a um costado com reforçadores leves e escoas com metade do comprimento, tanto na massa, quanto na inércia.

A quantidade de reforçadores presentes foi calculada a partir do espaçamento entre eles e as dimensões principais da embarcação. Porém, esse valor tem que dar um número inteiro, pois não existe metade de um reforçador.

Para reforçadores leves, aproximou-se para baixo, utilizando a função “inteiro” na planilha. Nos reforçadores pesados, adotou-se que para valores com menos de 10% de diferença entre o valor pela função “inteiro” e o valor real do espaçamento, arredondaria para o menor valor, caso contrário, mais um perfil pesado era adicionado. O uso dessa abordagem conservadora apenas na variável referente ao espaçamento dos perfis pesados deve-se ao fato de que esses representam grande parte da rigidez da estrutura, conforme descreve Chaves (2013).

A partir da subdivisão dos elementos da seção mestra apresentados na tabela 4, o primeiro passo é o cálculo da linha neutra total, com base na equação 25.

$$Z_{LN} = \frac{\sum A_i \cdot Z_i}{\sum A_i} \quad (25)$$

A equação acima consiste basicamente em um cálculo de uma média ponderada, onde soma-se a posição de cada elemento multiplicada pela sua respectiva área ($\sum A_i * Z_i$), e divide-se pelo somatório das áreas na seção ($\sum A_i$).

Ao se encontrar a posição da linha neutra, calcula-se o momento de inercia de cada elemento referente este eixo, considerando-se tanto a inercia própria quanto a de transferência.

No cálculo da inercia própria, os elementos foram aproximados para seções de formatos básicos, porém algumas considerações foram desenvolvidas para facilitar o procedimento. Os reforçadores idênticos localizados sobre um convés e fundo, foram considerados como um único elemento no cálculo do momento de inércia de transferência, enquanto que reforçadores idênticos em um costado, foram agrupados para cálculos de inercia próprio e separados nos cálculos da inercia de transferência.

A partir da linha neutra e da inercia total da seção, podemos obter o módulo de seção mestra projetado a partir da equação 26.

$$SM_{proj} = \frac{I_{total}}{Máximo (P;P-LN)} \quad (26)$$

O valor do módulo de seção projetado é obtido através da divisão da inercia total pelo valor máximo entre a distância da linha neutra do convés e do fundo da seção. Para a seção mestra ser aprovada pela norma, tal valor não poderá ser menor que o módulo da seção requerido pela norma, obtido a partir das equações 15 e 16.

De posse de todos esses dados, a tensão primária no fundo em uma altura z de 0, pode ser encontrada a partir da equação 27.

$$\sigma_1 = \frac{Mmáx * Z_{LN}}{I_{total}} \quad (27)$$

Para encontrar a tensão primária considerando a ação da ondas, basta inserir a parcela referente ao tosamento ou alquebramento no somatório de $Mmáx$. Para localizar tensões referentes a outra posição z, diminui-se o valor da posição no valor da linha neutra (Z_{LN}), assim podemos encontrar a tensão primária para qualquer ponto na seção mestra.

3.5. CALCULO DA TENSÃO SECUNDÁRIA

A partir dos dados de entrada inseridos, e do dimensionamento do reforçador em cada seção já realizado, realiza-se o cálculo da secundária pesada e leve, em todas as partes da seção mestra.

Primeiramente, determina-se o valor da distribuição de carga, através da equação 28.

$$q = p * B' \quad (28)$$

Onde p é a pressão atuante no reforçador, que pode ser hidrostática, dependente do calado ou de carga, inserido como dado de entrada. B' é a largura de carga, utilizada como o espaçamento entre perfis de mesmo tipo.

Para obter a pressão atuante, verifica-se a qual carga o reforçador estará exposto. Reforçadores leves no fundo e costado, estarão sujeitos a pressão hidrostática, assim como perfis posicionados no duplo estarão sujeitas a pressão exercida pela carga no porão, enquanto que reforçadores no convés receberão a carga aplicada sobre o convés.

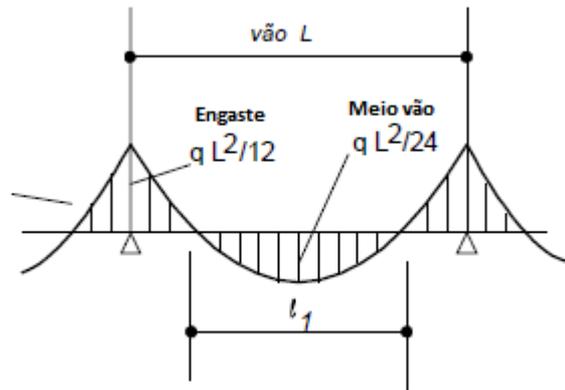
Nesse momento, a análise em reforçadores que recebem somente a pressão hidrostática é realizada para o calado em mar calmo, e as correções “Alq” e “Tos” serão aplicadas apenas na composição.

Para quilhas e escoas, que ligam o casco interno ao casco externo, onde recebe-se tanto a pressão hidrostática quanto a de carga, as constantes “Alq” e “Tos” são aplicadas nesse momento, para que a correção da constante não multiplique também o valor relacionado a carga do porão.

Caso algum valor referente a carga no porão e no convés, inserido como dado de entrada, seja nulo, considera-se um valor referente a pressão exercida por uma coluna de 1 metro d’agua neste valor.

Determinado a pressão atuante, é definido o momento fletor no perfil, o qual tem um comportamento quadrático para carga uniforme ao longo do comprimento (L), com máximo junto aos engastes e ao meio vão, como pode ser visualizado na figura 23.

Figura 23 - Distribuição de momento fletor ao longo do comprimento do perfil

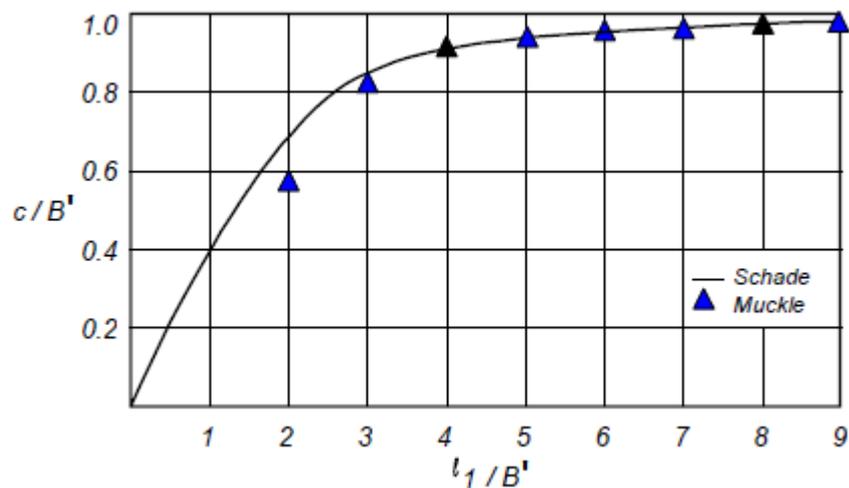


Fonte: Augusto (2004, p. 22)

O momento fletor no meio vão corresponde à metade do valor do engaste, porém, torna-se importante analisá-lo, pois, como visto na figura 23, ocorre uma mudança de sinal, invertendo o valor da distribuição de tensão ao longo da seção.

Para o cálculo da chapa colaborante foi utilizado uma análise gráfica proposta por *Shade* (1951), como mostrado na figura 24.

Figura 24 - Gráfico de *Shade* para largura de chapa colaborante



Fonte: Augusto (2004, p.22)

Como pode ser visto na figura 23, o coeficiente l_1 refere-se a distância entre os pontos de momento nulo no perfil, correspondente a 0,578 do comprimento L .

Para tornar o processo de obtenção da largura de chapa colaborante automático, o gráfico da figura 24 foi aproximado por equações que descrevam seu comportamento, que podem ser visualizadas abaixo, a partir de $\frac{l1}{B'}$ analisado.

$$\frac{c}{B'} = 1,2 * 10^{-5} * \left(\frac{l1}{B'}\right)^6 - 7 * 10^{-4} * \left(\frac{l1}{B'}\right)^5 + 0,0076 * \left(\frac{l1}{B'}\right)^4 - 0,0329 * \left(\frac{l1}{B'}\right)^3 + 9 * 10^{-4} * \left(\frac{l1}{B'}\right)^2 + 0,4173 * \left(\frac{l1}{B'}\right) + 0,0058 \quad \text{Para } \frac{l1}{B'} < 4,5 \quad (29)$$

$$\frac{c}{B'} = 0,9 + 0,015 * \left(\frac{l1}{B'} - 4,5\right) \quad \text{Para } 4,5 > \frac{l1}{B'} > 9 \quad (30)$$

$$\frac{c}{B'} = 1 \quad \text{Para } \frac{l1}{B'} > 9 \quad (31)$$

Após isso, a medida da chapa colaborante é acoplada ao perfil selecionado e cálculos referentes a linha neutra e momento de inercia são realizados. Afim de facilitar os cálculos, divide-se o perfil em alma, flange e chapa colaborante.

Porém, ao analisar a chapa colaborante para o perfil pesado, nota-se que reforçadores leves estão presentes dentro dessa medida, os quais não podem ser desprezadas nos cálculos. Portanto, para obtenção da linha neutra e inercia nos perfis pesados, são adicionados os perfis leves presentes na medida referente a chapa colaborante acoplada ao reforçador pesado.

O cálculo da tensão secundária além de ser realizado no engaste e meio vão, é realizado na parte inferior e superior do perfil, obtido a partir das equações 32 e 33, respectivamente.

$$\sigma_2 = \frac{M * LN_{perfil}}{Inercia} \quad (32)$$

$$\sigma_2 = \frac{M * (a + t_{chapa} + t_f - LN_{perfil})}{Inercia} \quad (33)$$

Onde t_{chapa} refere-se a espessura da chapa associada, a é altura da alma do perfil e t_f a espessura da flange do perfil, ou em casos de duplo fundo, a espessura da chapa do casco. Com base nas equações 32 e 33 e a partir de interpolações, pode-se determinar a tensão secundária em qualquer altura do perfil analisado.

3.6. CALCULO DA TENSÃO TERCIARIA

Com base na imagem 10, o cálculo da tensão terciaria é obtido a partir da equação 34.

$$\sigma_3 = k * p * \left(\frac{b}{t}\right)^2 \quad (34)$$

Onde k é obtida de maneira gráfica a partir da imagem 10 referente ao lado do chapeamento analisado, p é a pressão de carga na chapa, b é referente ao lado menor e t é a espessura da unidade de chapeamento.

Como acontece no gráfico de chapa colaborante, afim de tornar o processo automatizado, aproxima-se o gráfico por equações polinomiais, visualizadas em 35 e 36.

$$k_a = 0,0484 * \left(\frac{a}{b}\right)^6 - 0,3319 * \left(\frac{a}{b}\right)^5 + 0,8147 * \left(\frac{a}{b}\right)^4 - 0,8654 * \left(\frac{a}{b}\right)^3 + 0,4005 * \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 0,0011 * \frac{a}{b} + 0,3119 \quad (35)$$

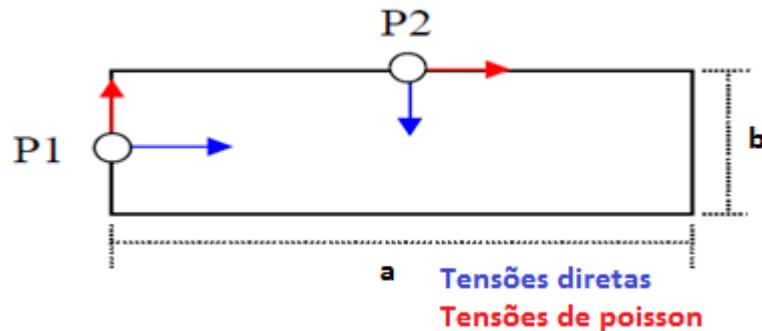
$$k_b = 0,0018 * \left(\frac{a}{b}\right)^5 - 0,0097 * \left(\frac{a}{b}\right)^4 - 0,0151 * \left(\frac{a}{b}\right)^3 + 0,0093 * \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 0,0197 * \frac{a}{b} + 0,3139 \quad (36)$$

Onde k_a corresponde ao parâmetro para o lado maior a e k_b refere ao lado menor b. Para valores de $a/b > 1,7$, k_a equivale a constante de 0,5, e para valores de $a/b > 2$, k_b equivale a 0,34.

A equação 34 resulta nas tensões diretas, direcionadas ao centro da chapa. Assim, para o ponto intermediário no lado maior da chapa (P2), a tensão encontrada é transversal a embarcação, na qual não fará parte da composição do presente trabalho. A sua componente longitudinal é encontrada através da multiplicação da tensão direta pelo coeficiente de Poisson, que estabelece uma relação entre deformações ortogonais. Na teoria de pequenas deflexões em placas, o coeficiente de Poisson para metais é considerado 0,3.

As tensões diretas e as correspondentes tensões de Poisson, nos pontos onde foram analisadas as tensões terciarias na unidade de chapeamento, são mostradas na figura 25.

Figura 25 - Tensões diretas e de Poisson



Fonte: O Autor (2016)

Assim, com base na figura 25, observa-se que a composição de tensões longitudinais incluirá a tensão direta no ponto 1 e a tensão correspondente ao efeito Poisson no ponto 2.

Foram analisadas unidades de chapeamento no fundo, duplo fundo, costado, duplo costado e convés.

Ao analisarmos uma unidade de chapeamento, com pressão uniformemente distribuída ao longo de uma de sua face, pode-se notar que a face onde estará recebendo a pressão, sofrerá com uma compressão em sua região central, e tracionará regiões próximas ao engaste com o perfil. Ao analisar a face contrária, nota-se que os sinais da tensão entre tração e compressão são invertidos.

3.7. COMPOSIÇÃO DE TENSÕES

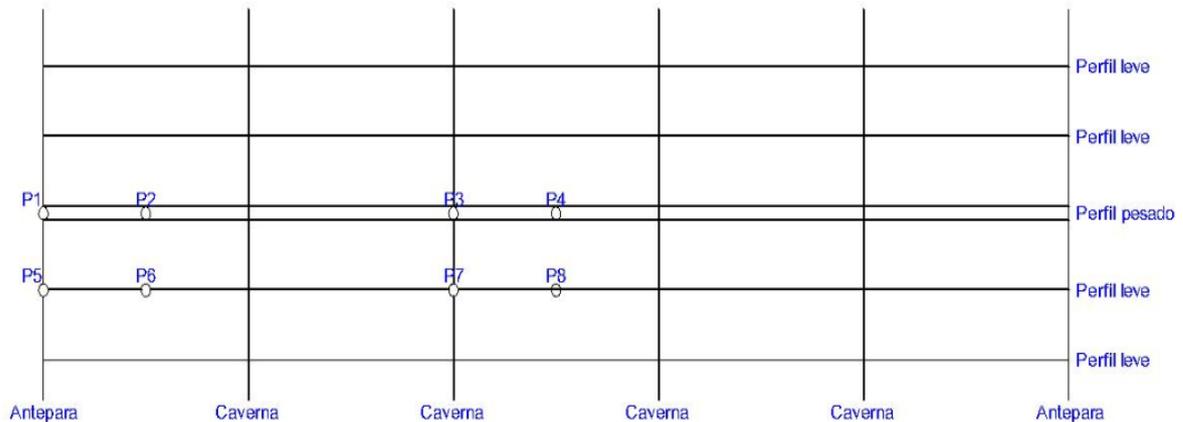
Para encontrar a máxima tensão longitudinal, foi realizado uma composição em pontos em que se considera uma variação de comportamento nas tensões primárias, secundárias e terciárias.

Sabe-se que a tensão primária varia linearmente ao longo do pontal, trocando de sinal na linha neutra da seção mestra. A tensão secundária varia linearmente ao longo da altura do perfil, enquanto que a tensão terciária varia linearmente ao longo da espessura da chapa. Portanto, para cada ponto (x, y, z) existe uma composição diferente de tensão, que poderá alternar os sinais entre os diferentes campos de tensões.

Deste modo, procurou-se realizar uma composição em que englobasse todos os efeitos estudados, considerando pontos localizados no meio vão e engaste da estrutura secundária pesada e leve, variando entre o lado interno e externo da chapa, além de considerar seções no fundo, costado e convés da embarcação.

Em uma vista de topo da estrutura da embarcação (figura 26), pode-se visualizar os pontos escolhidos para serem analisados.

Figura 26 - Pontos analisados no painel estrutural pela vista de topo



Fonte: O Autor (2016)

Pode-se observar que para as tensões secundárias pesadas, os pontos 1, 2, 5 e 6 correspondem a tensões no engaste, enquanto que os pontos 3, 4, 7 e 8 correspondem a tensões no meio vão. Em relação as tensões secundárias leves, os pontos 5 e 7 localizam-se junto ao engaste, enquanto os pontos 6 e 8, são considerados no meio vão.

A partir da hipótese que o reforçador pesado serve como apoio rígido para o reforçador leve, tensões secundárias leves analisadas em cima de um perfil pesado (pontos 1,2,3 e 4) são consideradas como nulas.

Ao analisar a tensão terciária, os pontos 1,3,5 e 7, não estão nem no lado maior nem no lado menor da chapa, encontram-se na quina, onde as tensões longitudinais são muito baixas, aproximando-se de zero. Porém, por conservadorismo, aproxima-se para os valores referentes ao lado menor da chapa.

Na tabela 5 são resumidas as características correspondentes a cada um dos pontos de análise mostrados na Figura 26.

Tabela 5 - Tensões secundárias e terciárias nos pontos na vista de topo

Ponto na vista de topo	σ'_2	σ''_2	σ_3
1	Engaste	0	Lado menor
2	Engaste	0	Lado maior
3	Meio vão	0	Lado menor
4	Meio vão	0	Lado maior
5	Engaste	Engaste	Lado menor
6	Engaste	Meio vão	Lado maior

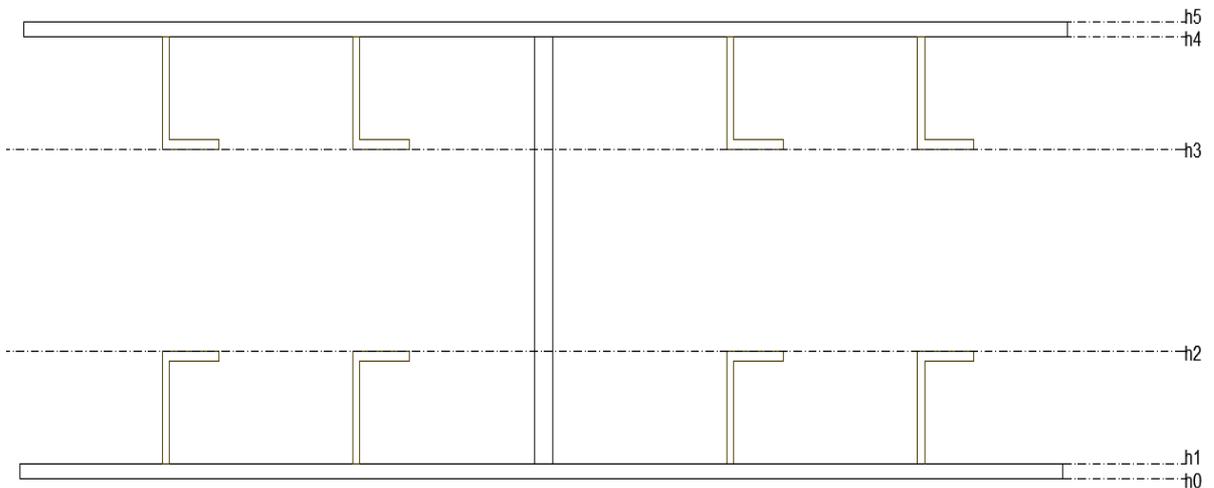
7	Meio vão	Engaste	Lado menor
8	Meio vão	Meio vão	Lado maior

Fonte: O Autor (2016)

Como já ponderado no presente trabalho, além de considerar pontos em uma vista de topo, deve-se considerar diferentes alturas z na análise, uma vez que a variação da altura z modifica todos os campos de tensão analisados.

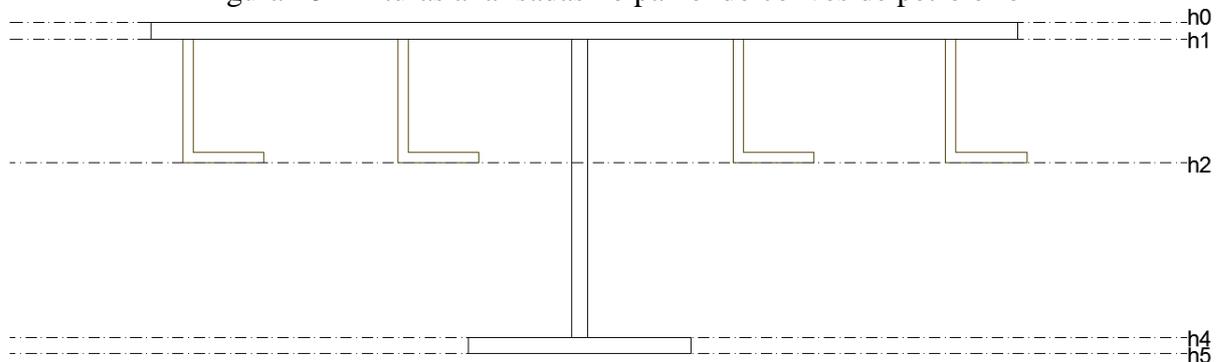
Portanto, os mesmos 8 pontos mostrados na Figura 26 também foram analisados para diferentes alturas “ h ” no painel, como mostrado na figura 27 (para o fundo) e na figura 28 (para o convés).

Figura 27 - Alturas analisadas no painel do fundo



Fonte: O Autor (2016)

Figura 28 - Alturas analisadas no painel do convés de petroleiro



Fonte: O Autor (2016)

Para tensões no costado em embarcações com duplo casco, a análise é realizada da mesma forma que no fundo, onde considera-se a altura h_0 a parte externa do costado, a qual

receberá a pressão hidrostática. Para a simplificação dos cálculos, e agindo de forma conservadora, a pressão hidrostática no costado é considerada a maior atuante na seção, ou seja, em uma altura logo acima do duplo fundo.

No porta contêiner não existe a presença de um convés na seção mestra, portanto, no local a análise é realizada apenas com a tensão primaria. No graneleiro não existe um convés contínuo completo, onde sicordas são ligadas diretamente na chapa do tanque de asa. Além disso, tanques de bojo dificultam uma análise de tensões nas alturas h3, h4 e h5 no costado. Desde modo, análises de tensões secundárias e terciárias no graneleiro, tanto para o costado quanto para o convés, serão realizadas apenas em h0, h1 e h2.

Contudo, a análise do costado de graneleiro citado acima refere-se a parte do costado que se encontra dentro do tanque de bojo. Porém, a partir de que o costado do graneleiro acima do tanque de bojo não possui reforçadores longitudinais, normalmente a sua configuração no local será correspondente a um cavernamento transversal da estrutura, ou seja, a distância entre cavernas (de costado) é inferior a distância entre apoios na longitudinal, que neste caso, serão o local de encontro dos tanques de bojo e de asa com a chapa do costado.

Para o tipo graneleiro, a análise local utiliza uma composição de tensões realizada em 4 outros pontos na estrutura, correspondentes aos 4 pontos de análise na unidade de chapeamento do costado (mostrado na figura 25).

Toda a composição de tensão é realizada para ondas em alquebramento e tosamento. Para pontos no costado e no fundo, nas alturas h0, h1 e h2, a carga exercida sobre reforçadores leves e chapas é toda proveniente da pressão hidrostática. Portanto, tais pontos são multiplicados pelos fatores “Alq” e “Tos”, aplicando assim a correção do calado para a condição de onda considerada.

A partir de toda a análise de tensões realizadas no convés, costado e fundo da embarcação, o valor máximo de tensão, assim como a sua localização é obtido e mostrado na aba principal da planilha.

Com a composição de tensão longitudinal, estima-se um fator de segurança baseado na tensão de escoamento do aço da estrutura.

$$FS = \frac{\sigma_e}{\sigma_1 + \sigma'_2 + \sigma''_2 + \sigma_3} \quad (37)$$

O valor do fator de segurança para a máxima tensão longitudinal também é visualizado na aba principal da planilha, e servirá como restrição no processo de otimização que será realizado.

3.8. CALCULO DA MASSA ESTRUTURAL

Para realização do cálculo da massa estrutural, foi utilizado um procedimento semelhante ao dimensionamento da seção mestra, separando elementos com geometrias definidas e verificando assim seu volume ocupado por todo o comprimento da embarcação.

Em elementos longitudinais e chapas de casco, o volume é encontrado pela simples multiplicação da área transversal na seção mestra pelo comprimento total. Pelo fato de que a curvatura de casco na popa e na proa afete pouco na área transversal do elemento, não foi utilizado nenhum fator de correção.

Em elementos transversais, utilizou-se valores de boca e pontal na seção mestra para calcular o seu volume, para depois multiplicar pela quantidade na longitudinal. Porém, optou-se por corrigir os cálculos com o coeficiente C_b , visto que o contorno do casco influencia consideravelmente os elementos transversais.

Considerou-se todos os espaçamentos entre reforçadores longitudinais, cavernas, anteparas, assim como espessuras de chapa, constantes por todo o comprimento da embarcação.

Tal aproximação pode acarretar em alguns erros nos cálculos, visto que normalmente embarcações tem compartimentos de tamanhos diferentes ao longo do navio, interferindo no número de anteparas calculados. Também, podem existir diferentes espessuras e reforçadores em diferentes compartimentos, em virtude de cargas pontuais ou economia em material em áreas pouco solicitadas.

Porém, são variações que são muito difíceis de estimar, além de não influenciarem no processo de otimização que definirá o arranjo estrutural otimizado para a embarcação.

Por fim, pode-se determinar a massa estrutural, multiplicando o volume do casco pela densidade específica do aço utilizado " $\rho_{aço}$ " definida pelo usuário nos dados de entrada.

3.9. ANALISE DE VIBRAÇÃO NA ESTRUTURA

Para verificar o comportamento dinâmico da estrutura, foram realizadas análises para os 20 primeiros modos de vibrar da viga navio, um reforçador leve no fundo e uma unidade de chapeamento, baseada nas condições de contorno discutidas na seção 2.6 do presente trabalho.

Para vibrações em vigas, Inman (2001) fornece uma equação para vibração vertical.

$$\omega_n = (B_n * L)^2 * \sqrt{\frac{E * I}{\rho * A * L^4}} \quad (38)$$

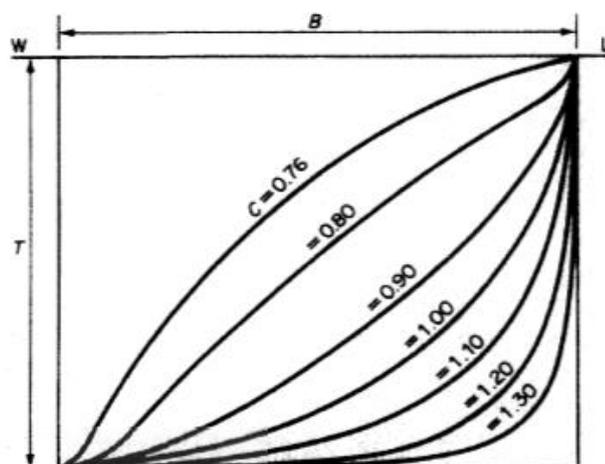
Onde,

- ✓ B_n é uma constante que depende da condição de contorno do sistema.
- ✓ L é o comprimento total da viga;
- ✓ E é o módulo de elasticidade do material;
- ✓ I é o momento de inércia da seção transversal da viga;
- ✓ ρ é a densidade do material;
- ✓ A é a área da seção transversal da viga.

A equação 38 é utilizada tanto para vibração da viga navio, quanto para a unidade de reforçador, mudando o valor da constante B_n , de acordo com a condição de contorno, e os valores de L , I e A , que correspondem a dimensões da viga. A tabela referente aos valores de B_n , retirada de Inman (2001) para diferentes modo de vibrar e condições de contorno está presente no anexo B.

Como já citado no presente trabalho, para vibração na viga navio, é necessário utilizar uma correção referente a massa adicional. É razoável supor que a massa adicionada dependerá da esbeltes da seção na direção do movimento, ou seja, a proporção entre a boca e o calado da embarcação (TUPPER, 2013). O coeficiente de massa adicional é obtido a partir da relação de boca sobre calado, como mostrado na figura 29.

Figura 29 - Coeficiente de massa adicional em função de B/T



Fonte: Tupper apud Lewis (2013, p.288)

A figura 29 corresponde a coeficiente de massa adicional para embarcações que tenham valores de B/T entre 2 e 3,5, e foram utilizados valores referentes a uma constante de C=1,30. Para embarcações fora deste intervalo, foram utilizadas outras imagens de estimativas do coeficiente de massa adicional, mostradas no anexo C.

A vibração para chapas apoiadas também é descrita por Inman (2001), onde a rigidez e a frequência natural são mostradas nas equações 39 e 40, respectivamente.

$$D' = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (39)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{D'}{\rho \cdot h}} * \left[\left(\frac{m \cdot \pi}{a} \right) + \left(\frac{n \cdot \pi}{b} \right) \right] \quad (40)$$

Onde,

- ✓ D' é a rigidez a flexão de uma placa retangular;
- ✓ h é a espessura da chapa;
- ✓ ν é o coeficiente de Poisson, no valor de 0,3;
- ✓ m, n são referentes ao modo de vibrar;
- ✓ a, b corresponde ao lado maior e menor da chapa, respectivamente.

A partir do equacionamento apresentado, calcula-se os 20 primeiros modos de vibrar da viga navio, de um reforçador leve típico e de uma unidade de chapeamento típica. Os resultados são comparados com os dados de entrada da planilha referentes a rotação do propulsor e do motor, para assim, verificar se a embarcação sofrerá excessiva vibração estrutural.

4. PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

A partir do desenvolvimento da planilha de síntese, optou-se por realizar dois modelos de otimização, que se diferenciam entre si pela quantidade de variáveis e restrições no processo. O primeiro modelo utiliza as espessuras da seção mestra como o mínimo sugerido pela norma ABS, onde a planilha calcula automaticamente o mínimo. Já para o segundo modelo, optou-se por variar as espessuras, considerando os valores da norma como restrições do processo.

O objetivo dessas duas análises é confrontar diferentes abordagens de uso da otimização no projeto estrutural de embarcações baseado em normas de Sociedades Classificadoras.

Para aplicar um processo de otimização, deve-se conhecer as relações de causa e efeito entre variáveis de entrada, restrições e o objetivo de interesse. Deste modo, todos os procedimentos para os dois tipos de otimização são descritos nos próximos itens, assim como seu conjunto de variáveis, restrições e seu modelamento matemático.

Foi utilizado o programa modeFRONTIER, que além de ser uma robusta ferramenta de otimização, consegue acoplar ao processo diversos outros programas, entre eles o Microsoft Excel, onde foi realizada a ferramenta de síntese. A partir dos algoritmos de otimização presentes no programa, optou-se por utilizar o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA II), que se trata de um algoritmo genético de seleção não dominada. A ideia por trás deste procedimento é um método de classificação utilizado para enfatizar pontos bons, em conjunto com um método de nicho, que é utilizado para manter subpopulações estáveis e manter a diversidade da população (SRINIVAS, 1994).

A diferença deste procedimento para um algoritmo genético qualquer está apenas na seleção dos indivíduos, os quais são ordenados com base no nível de dominância dos indivíduos. As soluções não-dominadas recebem altos valores de aptidão. Tal aptidão é a mesma para todos os indivíduos não dominados, garantindo assim que todos possuam o mesmo potencial reprodutivo (TANCREDI, 2008).

Para a geração da população inicial foi utilizado a sequência SOBOL, que consiste em um procedimento de quase aleatoriedade. Os indivíduos nesse tipo de sequência se evitam um

dos outros, objetivando assim preencher uniformemente todo o espaço amostral de variáveis (modeFRONTIER, 2013).

4.1. MODELO MATEMÁTICO DE OTIMIZAÇÃO: TIPO 1 - ESPESSURAS COMO MÍNIMO DA ABS

Para o primeiro modelo, preferiu seguir com as espessuras na seção mestra como as mínimas sugeridas pela norma ABS, fazendo com que o conjunto de variáveis da otimização sejam apenas referentes ao espaçamento entre reforçadores longitudinais leves e pesados, assim como distância entre cavernas.

Para não gerar valores impraticáveis de espaçamentos entre reforçadores, não foi utilizada como variáveis a distância entre perfis pesados, e sim a quantidade de perfis leves entre perfis pesados. Isso faz com que os valores de espaçamento entre pesados seja sempre maior que leves, ainda mais, sejam múltiplos entre si, o que normalmente acontece na prática.

Assim, o espaçamento entre reforçadores pesados é gerado automaticamente na planilha, como sendo a multiplicação entre o espaçamento dos leves pelo número de leves mais 1.

A mesma forma acontece para as cavernas, preferiu-se utilizar a variável como o número de cavernas entre anteparas, e não a distância entre tais. Fazendo assim, tem-se valores de espaçamento entre cavernas e anteparas múltiplos, o que normalmente acontece na prática também.

Para reforçadores do teto do duplo fundo, variou-se apenas a quantidade de elementos, com o espaçamento sendo calculado direto na planilha, pela divisão da distância entre quilhas pelo número de elementos. Isso é realizado para haver concordância entre valores com o fundo, visto que os reforçadores pesados que os limitam são os mesmos.

Na equação 41 é apresentado o conjunto de variáveis agrupadas em um vetor X.

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) \quad (41)$$

Onde,

- ✓ x_1 é o número entre cavernas;
- ✓ x_2 é o espaçamento entre perfis leves no fundo;
- ✓ x_3 é o espaçamento entre perfis leves no costado;
- ✓ x_4 é o espaçamento entre perfis leves no convés;
- ✓ x_5 é o número de perfis leves no fundo entre quilhas;

- ✓ x6 é o número de perfis leves no duplo fundo entre quilhas;
- ✓ x7 é o número de perfis leves no costado entre escoas;
- ✓ x8 é o número de perfis leves no convés entre sicordas.

As restrições acopladas ao processo consistem no fator de segurança e no módulo de seção mestra requerido pela norma da ABS.

A restrição de fator de segurança foi aplicada a cédula que contempla o fator para a máxima tensão encontrada, e foi determinado que o fator de segurança deverá ser maior que 1,25, conforme a equação:

$$g_1(X) = \frac{\sigma_e}{\sigma_1(X) + \sigma'_2(X) + \sigma''_2(X) + \sigma_3(X)} \geq 1,25 \quad (42)$$

Para a restrição do modulo de seção mestra, criou-se uma cédula que calcula a diferença entre o modulo de seção projetado e o módulo de seção requerido. Restringiu tal cédula para que encontre valores maiores que 0.

$$g_2(X) = SMproj(X) - SMrequerido \geq 0 \quad (43)$$

As duas restrições têm dependência direta com todas as variáveis do processo. Visto que o cálculo do fator de segurança é referente a um máximo de tensão em todas as seções, e o módulo de seção projetado utiliza os espaçamentos para calcular a quantidade de reforçadores na seção mestra.

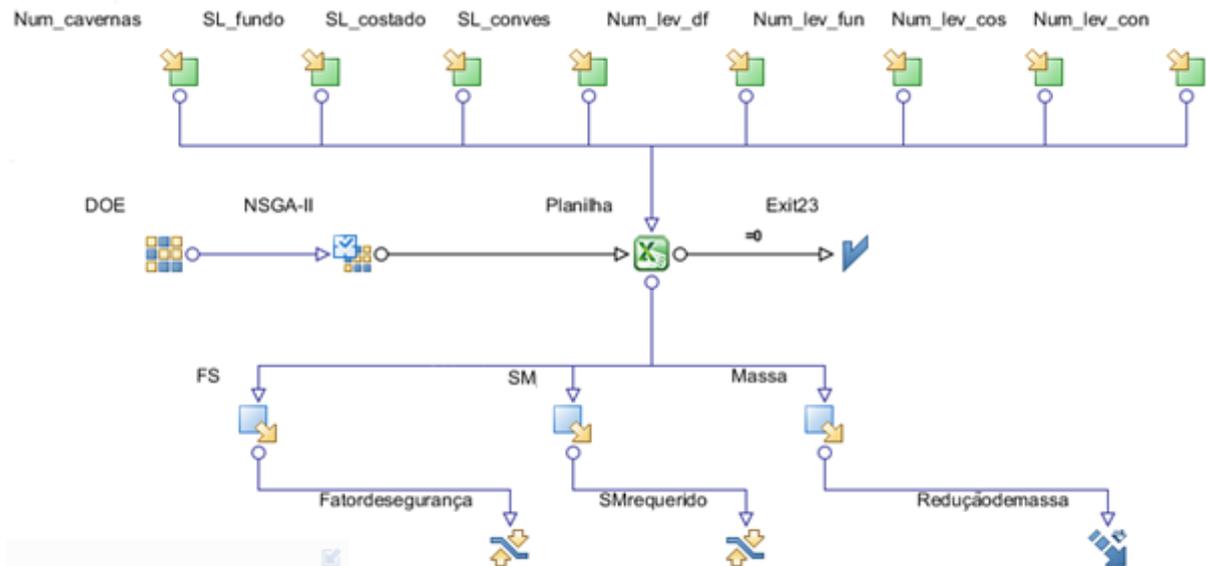
Portanto, para aplicar o objetivo de otimização, tem-se que minimizar a massa estrutural $f(X)$ de modo que respeite as restrições impostas por $g_1(X)$ e $g_2(X)$.

$$\text{mín}[f(X)] \quad \text{tal que } g_1(X) \geq 1,25 \text{ e } g_2(X) \geq 0 \quad (44)$$

Apesar de as funções de restrição não influenciarem diretamente no cálculo da função objetivo, para que uma solução seja viável ela terá que atender as restrições. Deste modo, as funções restrições criam um espaço restrito de projeto, com um mínimo local da função objetivo.

O fluxograma do processo de otimização, aplicado no programa modeFRONTIER, pode ser visualizado na figura 30.

Figura 30 - Esquemático da otimização tipo 1



Fonte: O Autor (2016)

Onde os ícones da figura 30 correspondem a:

- ✓ Num_cavernas é o número de cavernas entre anteparas;
- ✓ SL_fundo é o espaçamento entre levas no fundo;
- ✓ SL_costado é o espaçamento entre levas no costado;
- ✓ SL_convés é o espaçamento entre levas no convés;
- ✓ Num_lev_df é o número de levas no duplo fundo entre quilhas;
- ✓ Num_lev_fun é o número de levas no fundo entre quilhas;
- ✓ Num_lev_cos é o número de levas no costado entre escoas;
- ✓ Num_lev_con é o número de levas no convés entre sicordas.
- ✓ FS é o fator de segurança
- ✓ SM é o módulo de seção projetado

4.2. MODELO MATEMÁTICO DE OTIMIZAÇÃO: TIPO 2 - ESPESSURAS COMO VARIÁVEIS DO PROCESSO

O segundo modelo além de manter as mesmas variáveis do primeiro, traz as espessuras da seção ao conjunto de variáveis do processo, fazendo com que a norma da ABS passe a fazer parte do conjunto de restrição do projeto.

O conjunto de variáveis e restrições do tipo 1 são mantidos, da mesma forma a maneira como foi adotado os espaçamentos e quantidade de elementos. Porém, deve-se adicionar as

novas variáveis e restrições ao processo. O novo vetor de variáveis pode ser visualizado na equação abaixo.

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}) \quad (45)$$

Onde,

- ✓ x_1 a x_7 iguais ao do modelo tipo 1.
- ✓ x_8 é a espessura da chapa do fundo;
- ✓ x_9 é a espessura da chapa do duplo fundo;
- ✓ x_{10} é a espessura da chapa do costado;
- ✓ x_{11} é a espessura da chapa do convés.

Além das restrições referentes ao fator de segurança e ao módulo de seção mestra, restrições referentes a espessuras mínimas da norma ABS são agora acopladas. Para adicionar essas restrições, foram criadas novas cédulas a planilha referentes a diferença entre a espessura de projeto e a espessura mínima da norma. Essas cédulas são a restrição, e seu valor deverá ser maior do que 0.

$$g_3(X) = \text{Espessura}_{\text{fundo}} - t_{\text{fundo}}(x_2) \geq 0 \quad (46)$$

$$g_4(X) = \text{Espessura}_{\text{duplo fundo}} - t_{\text{duplo fundo}}(x_6; x_2) \geq 0 \quad (47)$$

$$g_5(X) = \text{Espessura}_{\text{costado}} - t_{\text{costado}}(x_3) \geq 0 \quad (48)$$

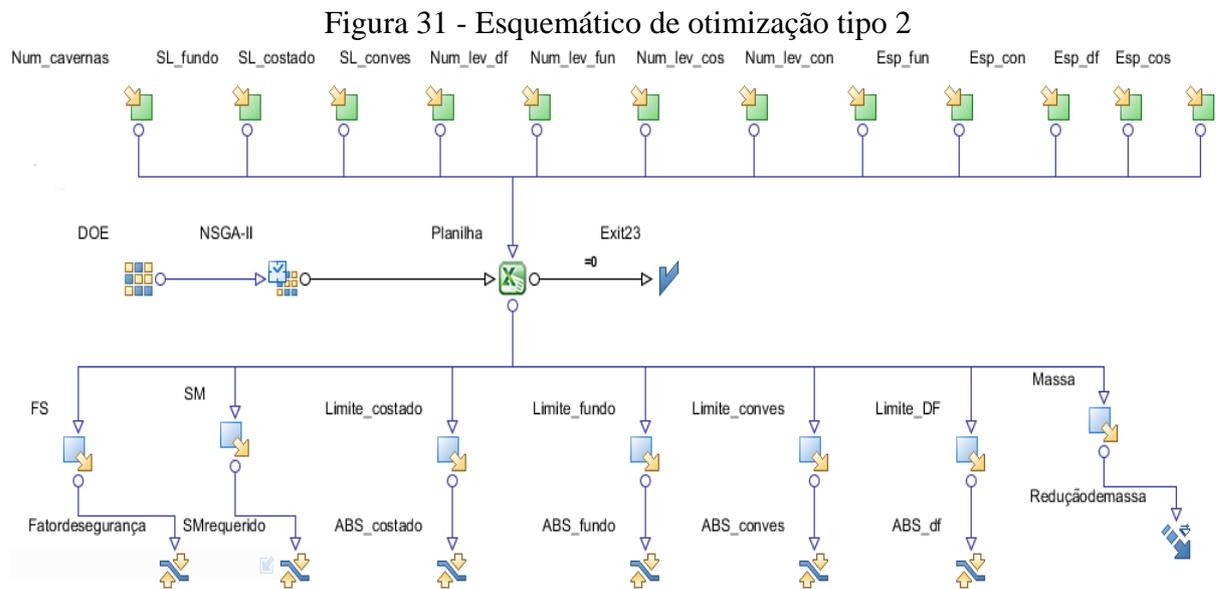
$$g_6(X) = \text{Espessura}_{\text{convés}} - t_{\text{convés}}(x_4) \geq 0 \quad (49)$$

As restrições de espessuras têm dependência direta com apenas uma variável, referente ao espaçamento entre perfis leves do local de análise.

Do mesmo modo que no tipo 1, para aplicar o objetivo, minimiza-se a massa estrutural $f(X)$ de modo que respeite as restrições impostas por $g_1(X)$, $g_2(X)$, $g_3(X)$, $g_4(X)$ e $g_5(X)$ e $g_6(X)$.

$$\begin{aligned} \min[f(X)] \quad & \text{tal que } g_1(X) \geq 1,25, g_2(X) \geq 0, g_3(X) \geq 0, g_4(X) \geq 0, g_5(X) \geq 0 \\ & 0 \text{ e } g_6(X) \geq 0 \end{aligned} \quad (50)$$

Como também acontece no tipo 1, as funções variáveis apenas restringem o valor de mínimo da função objetivo, porém, não tem nenhuma interferência direta sobre o cálculo da função. O fluxograma do processo de otimização aplicado ao programa modeFRONTIER é mostrado na figura 31.



Fonte: O Autor (2016)

Os mesmos termos de ícones do tipo 1 são utilizados para variáveis e restrições comuns nos dois processos, os demais correspondem a:

- ✓ Esp_fun é a espessura da chapa no fundo;
- ✓ Esp_con é a espessura da chapa no convés;
- ✓ Esp_df é a espessura da chapa no duplo fundo;
- ✓ Esp_cos é a espessura da chapa no costado;
- ✓ ABS_costado refere-se à restrição no valor da espessura da norma para o costado;
- ✓ ABS_fundo refere-se à restrição no valor da espessura da norma para o fundo;
- ✓ ABS_convés refere-se à restrição no valor da espessura da norma para o convés;
- ✓ ABS_df refere-se à restrição no valor da espessura da norma para o convés.

5. ESTUDO DE CASO

Nesta etapa, foi realizado um estudo de caso para uma embarcação já existente. Primeiramente insere-se os dados da embarcação na planilha, após isso realiza processos de otimizações para os dois tipos, para enfim discutir os resultados encontrados.

5.1. DADOS DA EMBARCAÇÃO UTILIZADA

Utilizou-se o petroleiro *Elka Leblon*, de propriedade da *European Navigation Inc* e sob a bandeira da Libéria. A embarcação foi construída no final de 2012, e está sob contrato da empresa brasileira Petrobras, para transportar o petroleiro produzido no Brasil.

Todos os dados da embarcação foram retirados do Significant Ships of 2012 (2013), e a partir do arranjo da embarcação, foi realizado um escalonamento para definir a distribuição de pesos e a distância entre anteparas, definida como 29,28 m. Todos os dados de entrada, foram inseridos na planilha e podem ser visualizados na figura 32, assim como o arranjo e demais informações da embarcação são ilustrados no anexo D.

Figura 32 - Dados de entrada referentes ao petroleiro *Elka Leblon*

Parametros de entrada		Pesos adicionais			
Tipo embarcação	Petroleiro	Grupo de pesos	Peso [t]	X _{inicial} [m]	X _{final} [m]
Deslocamento	182644.0 t	Peso em aço			
Peso bruto (dwt)	154844 t	Sugerido [Watson, 2002]	22460.68	0	278.3
Loa	278.3 m	Outfitting			
Lpp	264 m	Sugerido [Watson, 2002]	2957.064	0	278.3
Boca	48.7 m	Superestrutura		14.11	50.85
Pontal	23.6 m	Sugerido [Amorim 1986]	272.37	-	-
Calado	15.90 m	Motorização	2109.89	15.41	51.74
Cb	0.83 -	Tanque	4565	31.36	50.85
Cm	0.99 -	Carga	150279	50.85	251.86
Carga no porão	0.16 Mpa [N/mm ²]	Carga	0	0	0
Carga no convés	0 Mpa [N/mm ²]	Carga	0	0	0
σ_e	355 Mpa	Carga	0	0	0
$\rho_{aço}$	7.86 kg/m ³	Tanque	0	0	0
$E_{aço}$	210000 Mpa				
Nº de anteparas longitudinais	1 -				
Número de pás	4 -				
Rotação do propulsor	82 rpm				
Rotação do motor	82 rpm				

Fonte: O Autor (2016)

Para o grupo de pesos, foram utilizados valores sugeridos de Watson (2002) e Amorim (1986) no peso em aço, superestrutura e *outfit*, e a partir do valor fornecido de peso leve da embarcação, foi determinado o valor da motorização a partir da diferença entre o peso leve e a soma das estimativas desses três pesos.

Foram divididos os pesos em mais 2 grupos. O primeiro é referente aos tanques de diesel, óleo pesado e água, que foram colocados juntos, sendo seus pesos dados fornecidos na publicação de referência. O outro grupo é a carga da embarcação, que foi estimada pela diferença entre o porte bruto e o peso dos tanques da embarcação.

O valor do C_m e do número de pás não foram fornecidos, portanto, usou-se aproximações com valores que se encontram normalmente em petroleiros semelhantes. O calado apresentado é resultado do equilíbrio gerado pela planilha, como explicado na seção 3.3.

Para a carga no porão, considerou que os porões fossem encheidos até 75% de sua capacidade, e não adotou carga nenhuma no convés.

O tipo de aço utilizado na construção da embarcação também não foi informado, portanto, procurou-se em catálogos de chapas de aço naval para consultar suas propriedades. Optou-se por utilizar um aço regido pela norma ASTM e que comumente é utilizado por estaleiros. Deste modo foi considerado o aço AH-36 que possui limite de escoamento de 355 MPa.

5.2. PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO PARA A EMBARCAÇÃO DE ESTUDO E RESULTADOS

A partir de todos os dados inseridos na planilha de síntese de tensões, são realizados os processos de otimizações para a embarcação estudada. Primeiramente, foi realizado o processo para 20 gerações nos dois casos, o intervalo inicial e o passo das variáveis pode ser visualizado na tabela 6.

Tabela 6 - Intervalos e passos iniciais das variáveis

Variável	Intervalo inicial de otimização	Passo
Número de cavernas	3 a 19	1
Espaçamento de perfis leves	0,5 a 1,5 m	0,05 m
Número de perfis leves entre perfis pesados	1 a 15	1
Espessuras de chapas (Para o tipo 2)	10 a 25 mm	0,25 mm

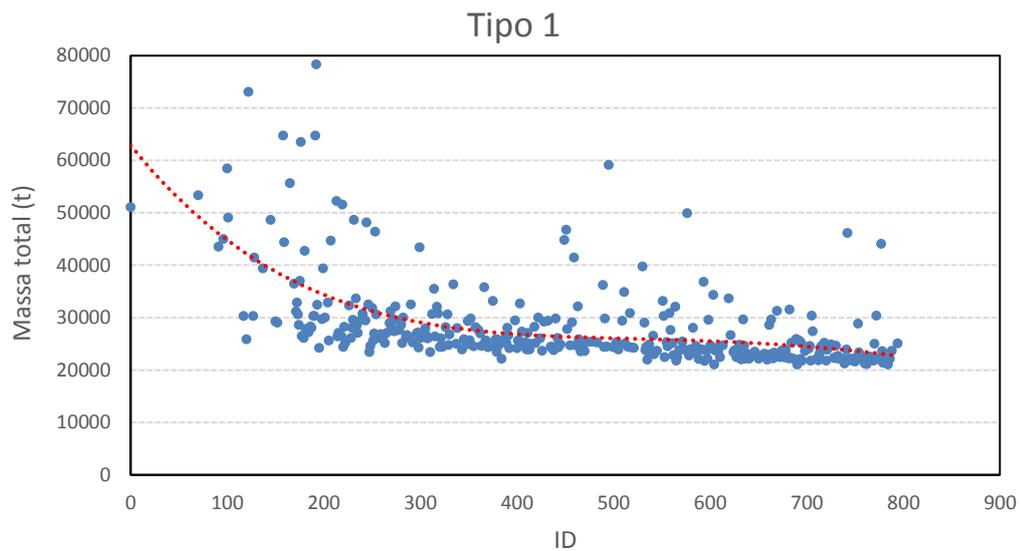
Fonte: O Autor (2016)

Os limites de variação para as variáveis foram definidos analisando arranjos estruturais de semelhantes, caso a otimização convirja para a fronteira, a mesma poderá ser expandida, após uma análise mais refinada. Optou-se por não trabalhar com espessuras inferiores a 10 mm, pelo porte da embarcação.

Para o primeiro processo com 20 gerações, foram gerados via SOBOL 40 indivíduos iniciais para o processo tipo 1 e 70 indivíduos iniciais para o processo tipo 2. Gerou-se desta maneira visando a maior quantidade de variáveis inseridas no tipo 2, na qual poderia demorar mais para convergir em soluções ótimas.

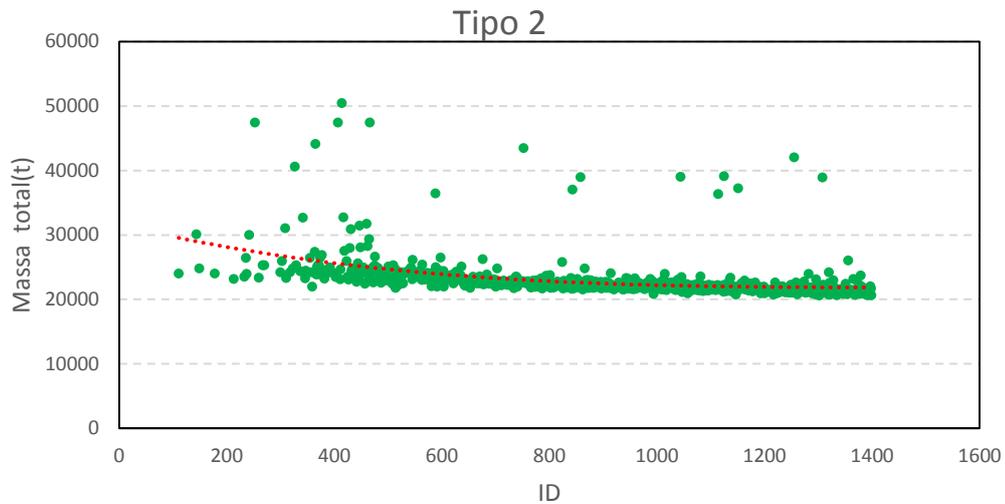
A variação da massa ao longo do processo para o tipo 1 e 2 pode ser visualizada na figura 33 e 34, respectivamente.

Figura 33- Variação da massa ao longo do processo de otimização tipo 1 para 20 gerações



Fonte: O autor (2016)

Figura 34 - Variação da massa ao longo do processo de otimização tipo 2 para 20 gerações

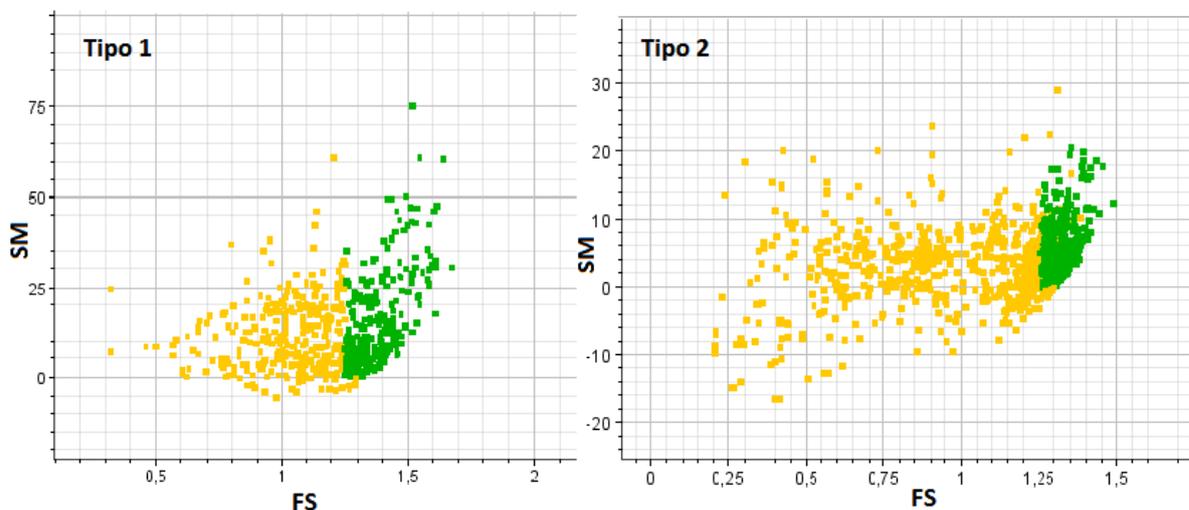


Fonte: O Autor (2016)

Os gráficos gerados nas figuras 33 e 34 apresentam apenas as soluções viáveis ao processo, ou seja, que passaram pelas restrições impostas no procedimento. Pode-se notar que para o tipo 2 o procedimento demorou até encontrar soluções viáveis, obtendo a primeira solução apenas próximo ao 100º indivíduo, enquanto o tipo 1 gerou soluções viáveis já nos indivíduos iniciais. Isto deve-se ao número de variáveis e restrições maiores no tipo 2, o que pode demorar mais para encontrar uma solução viável.

A figura 35 ilustra todas as soluções do processo, em amarelo estão soluções inviáveis e em verde soluções viáveis, que atingiram as duas restrições.

Figura 35 – Soluções viáveis e inviáveis no procedimento, a partir das restrições

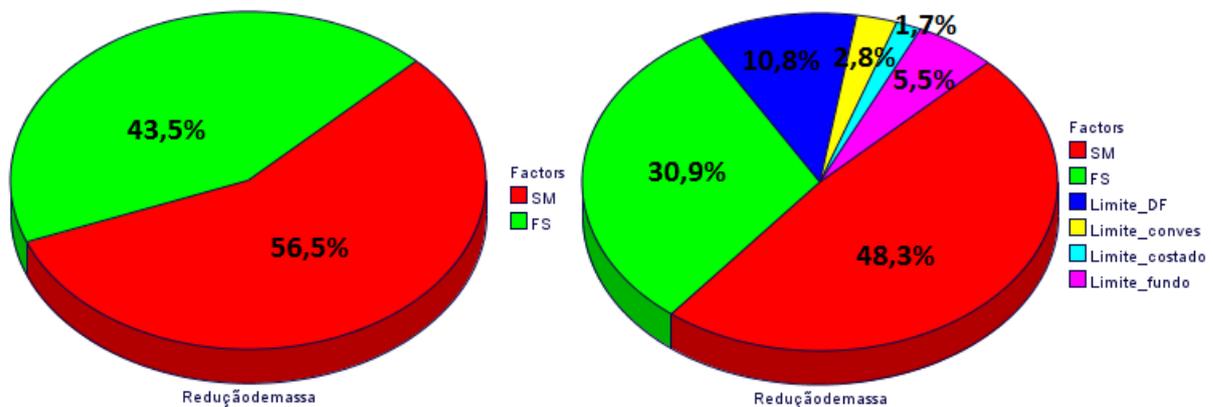


Fonte: O Autor (2016)

Ao analisar a figura 35, pode-se notar que a restrição que impôs uma maior dificuldade às soluções foi atingir o fator de segurança imposto. Por dispor de duplo fundo e costado além de reforçadores em todas seções, petroleiros normalmente não tem dificuldades em atingir o módulo de seção requerido, o que já não acontece para graneleiros e porta contêineres.

Porém, quando se analisa a interferência das restrições no objetivo, se nota que mesmo impondo a maior dificuldade em encontrar soluções, a restrição do fator de segurança tem uma parcela menor de influência na redução de massa comparado com a restrição de módulo de seção, como pode ser visualizado na figura 36.

Figura 36 - Influência das restrições no objetivo



Fonte: O Autor (2016)

A partir da figura 36, nota-se que a maior influência no objetivo de redução de massa no tipo 1 é no módulo de seção, pois reduzindo o módulo de seção mestra, a massa também será reduzida. Para o tipo 2, observa-se ainda as interferências geradas pelas restrições de espessuras de chapas, destacando-se a influência de 10,8 % no limite da espessura do duplo fundo.

Optou-se por seguir com o processo de otimização até que o resultado ótimo no programa fosse repetido nas respostas com menor massa, ou seja, até a convergência da solução.

Sendo assim, ao analisar os resultados do processo realizado com 20 gerações (ver apêndice A), o resultado claramente não convergiu. Portanto, realizou um novo processo com 60 gerações, e a partir do comportamento de cada variável (ver apêndice B), foi afunilado o intervalo de otimização de cada variável para onde estivesse encaminhando para o objetivo. Teve-se cuidado para não eliminar picos de ótimos de cada variável, para que nenhuma possível solução seja eliminada do processo. Os intervalos de otimização utilizados nos dois tipos de otimização, podem ser visualizados na tabela 7.

Tabela 7 - Intervalo de otimização para variáveis no processo de 60 gerações

Variável	Intervalo (tipo 1)	Intervalo (tipo 2)
Número de cavernas entre anteparas	3 a 15	5 a 12
Espaçamento entre leves no fundo (m)	0,5 a 1	0,5 a 1
Espaçamento entre leves no costado (m)	0,5 a 1,5	0,5 a 1
Espaçamento entre leves no convés (m)	0,5 a 1,5	0,5 a 1
Número de perfis leves no fundo entre quilhas	1 a 10	1 a 13
Número de perfis leves no duplo fundo entre quilhas	2 a 12	1 a 15
Número de perfis leves no costado entre escoas	1 a 12	2 a 15
Número de perfis leves no convés entre sicordas	1 a 10	1 a 13
Espessura do fundo (mm)	-	16 a 25
Espessura do duplo fundo (mm)	-	16 a 25
Espessura do costado (mm)	-	16 a 26
Espessura do convés (mm)	-	16 a 25

Fonte: O autor (2016)

Observa-se ainda que nesse processo de otimização foram utilizados 60 e 80 indivíduos na população inicial, para o tipo 1 e 2, respectivamente. O processo do tipo 1 convergiu para um resultado único, com repetições de uma solução em suas respostas de menor massa, porém, para o tipo 2 teve de ser realizado mais um processo, com 80 gerações, aproximando também o intervalo de variáveis, para assim obter a convergência. Os resultados ótimos, para os dois tipos de otimização podem ser visualizados na tabela 8.

Tabela 8 - Resultados ótimos encontrados nos dois procedimentos após 50 gerações para o tipo 1 e 80 gerações para o tipo 2

Variável/Parâmetro	Tipo 1	Tipo 2
Número de cavernas entre anteparas	6	8
Espaçamento entre leves no fundo (m)	0,5	0,5
Espaçamento entre leves no costado (m)	0,5	0,6
Espaçamento entre leves no convés (m)	0,8	0,7
Número de perfis leves no fundo entre quilhas	2	9
Número de perfis leves no duplo fundo entre quilhas	2	9
Número de perfis leves no costado entre escoas	6	14
Número de perfis leves no convés entre sicordas	5	11
Espessura do fundo (mm)	13,97	14,75
Espessura do duplo fundo (mm)	12,77	19,00
Espessura do costado (mm)	12,54	18,25
Espessura do convés (mm)	14,72	18,75
Massa estrutural total (t)	20463,38	19324,31

Fonte: O Autor (2016)

Considera-se que os dois processos apresentaram uma única solução. Visto que somente quando o arranjo tem variável de valor muito próximo do arranjo otimizado o valor da massa chega perto do ótimo.

A tabela 8 mostra os resultados ótimos encontrado no programa para o passo inicial sugerido, porém, ao diminuir o passo, pode-se encontrar resultados ainda mais precisos. Para

variáveis referentes a número inteiro, o resultado encontrado já está condizente ao melhor parâmetro, pois o único passo possível da variação é 1, assim o resultado encontrado já é o ótimo para a variável.

A partir disso, fixa-se os valores de número de cavernas e reforçadores leves entre perfis pesados, retirando-os do conjunto de variáveis, e varia os demais parâmetros em um passo menor, dentro do intervalo na qual a variável já foi estudada. Os novos passos de variação, assim como o intervalo, podem ser visualizados nas tabelas 9 e 10, para o tipo 1 e 2, respectivamente.

Tabela 9 - Intervalo de variação e passo para otimização tipo 1 com passo reduzido

Variável	Intervalo de variação	Passo
Espaçamento entre leves no fundo (m)	0,5 a 0,55	0,005
Espaçamento entre leves no costado (m)	0,5 a 0,55	0,005
Espaçamento entre leves no convés (m)	0,75 a 0,85	0,005

Fonte: O Autor (2016)

Tabela 10 - Intervalo de variação e passo para otimização tipo 2 com passo reduzido

Variável	Intervalo de variação	Passo
Espaçamento entre leves no fundo (m)	0,5 a 0,55	0,005
Espaçamento entre leves no costado (m)	0,55 a 0,65	0,005
Espaçamento entre leves no convés (m)	0,65 a 0,75	0,005
Espessura do fundo (mm)	14,5 a 15	0,05
Espessura do duplo fundo (mm)	18,75 a 19,25	0,05
Espessura do costado (mm)	18 a 18,5	0,05
Espessura do convés (mm)	18,5 a 19	0,05

Fonte: O Autor (2016)

O processo foi realizado com 50 gerações e 40 e 50 indivíduos iniciais, para o tipo 1 e 2 respectivamente. Como o número de variáveis é pequeno, justamente como o intervalo de variação, não demorou muito para que os dois casos convergissem para os valores ótimos, mostrados na tabela 11.

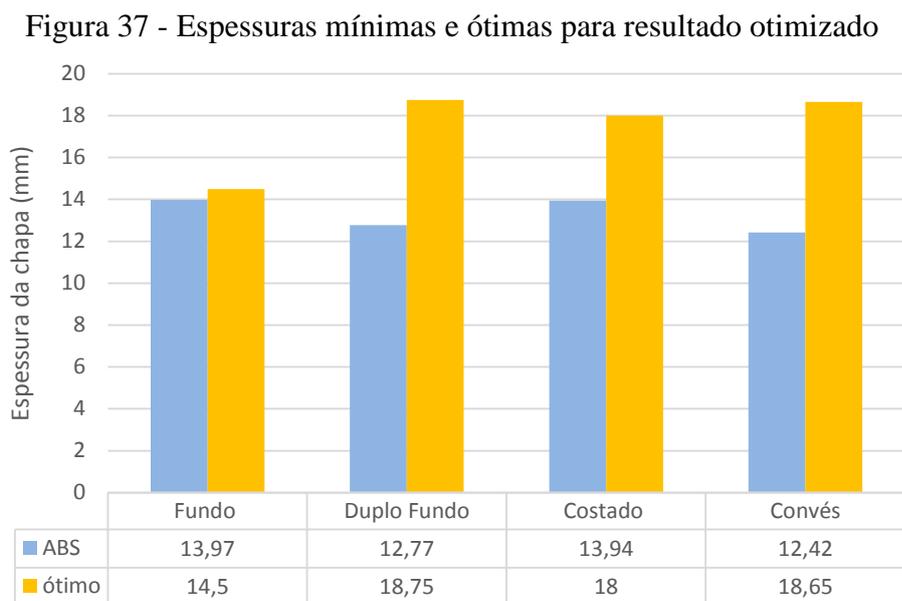
Tabela 11 - Resultado final de otimização

Variável/Parâmetro	Tipo 1	Tipo 2
Espaçamento entre leves no fundo (m)	0,50	0,50
Espaçamento entre leves no costado (m)	0,50	0,57
Espaçamento entre leves no convés (m)	0,775	0,675
Espessura do fundo (mm)	13,97	14,50
Espessura do duplo fundo (mm)	12,77	18,75
Espessura do costado (mm)	12,54	18,00
Espessura do convés (mm)	14,26	18,65
Massa estrutural total (t)	20378,25	19215,49

Fonte: O Autor (2016)

Ao analisar os resultados das otimizações nos dois tipos, o valor do objetivo encontrado quando se utiliza as espessuras de chapas na seção mestra como uma variável na otimização foi cerca de 5,71% mais baixo que quando utilizado espessuras como o mínimo da norma.

Restrições impostas no tipo 2 referentes a espessuras de chapas ficaram com uma relativa margem acima das espessuras calculadas como mínimas por norma, com os espaçamentos resultantes, como mostra a figura 37.



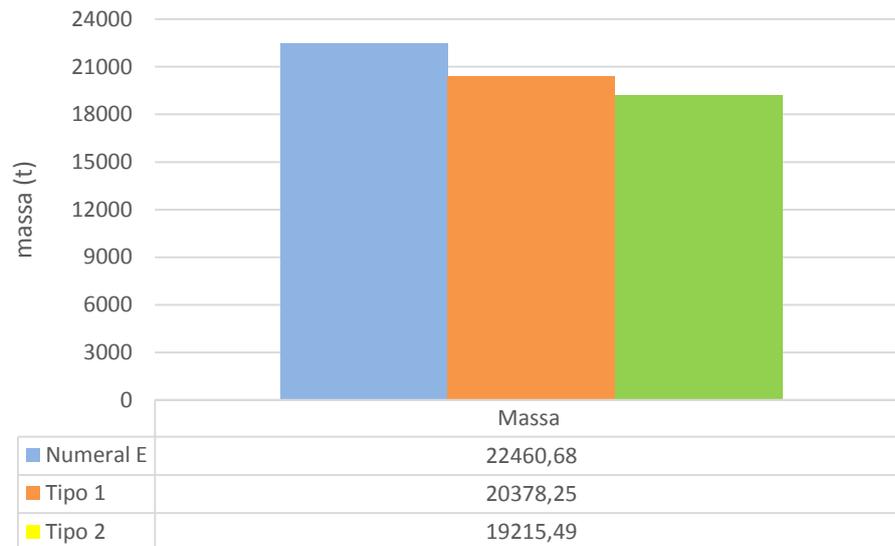
Fonte: O Autor (2016)

Isso mostra que ao aumentar a espessura da chapa, o módulo de seção do conjunto (reforçador + chapa) aumentará, fazendo com que seja feita uma seleção de um reforçador menor, e essa contraposição de massa, onde obtém-se uma chapa mais espessa com um reforçador menor, mostrou-se até um certo ponto, benéfica ao longo do processo de otimização.

Importante observar o alto valor da espessura do convés como o baixo valor do fundo, comparados com a norma. Isso se deve a tentativa no processo de otimização em atingir o módulo de seção com maior facilidade, visto que ao aumentar a espessura no convés e diminuir a do fundo, na mesma medida aumenta-se a linha neutra da embarcação, fazendo com que ela se aproxime da meia nau e diminuindo assim o denominador da equação de módulo de seção projetado (equação 24), resultando em valores maiores do mesmo.

Os resultados obtidos nos dois processos de otimização são comparados com o método do numeral E de Watson (2002), onde obteve-se no tipo 2 um resultado de 14,45% menor que o numeral E, como mostrado na figura 38.

Figura 38 - Comparativo de resultados de otimizações com Numeral E



Fonte: O Autor (2016)

A partir dos dados referentes a solução ótima inseridos na planilha, pode-se observar o local onde observou-se a máxima tensão, conforme mostrado na figura 39.

Figura 39 - Pior condição de tensão para os arranjos estruturais otimizados

Pior condição de tensão (Tipo 1)		Pior condição de tensão (Tipo 2)	
Painel da secção	Fundo	Painel da secção	Fundo
Altura no painel	h4	Altura no painel	h1
Local no painel	Ponto 1	Local no painel	Ponto 3
Condição de onda	Alquebramento	Condição de onda	Alquebramento
$\sigma_{\text{longitudinal total}}$	-281,37 Mpa	$\sigma_{\text{longitudinal total}}$	-282,92 Mpa
σ_1	-107,21 Mpa	σ_1	-136,19 Mpa
σ'_2	-90,74 Mpa	σ'_2	-54,30 Mpa
σ''_2	0,00 Mpa	σ''_2	0,00 Mpa
σ_3	-83,42 Mpa	σ_3	-92,42 Mpa
Fator de segurança	1,2617 -	Fator de segurança	1,2548 -

Fonte: O Autor (2016)

Mesmo que a maior solicitação de tensões seja no fundo, encontra-se também resultados de tensões que resultam em fator de segurança muito próximo de 1,25 no convés e no costado (ver Apêndice C). Os resultados dos 2 tipos ainda diferenciam na altura e no ponto do painel. Enquanto o resultado do tipo 1 encontra-se no ponto 1 em uma vista de topo, no engaste do perfil pesado e no lado interno da chapa do duplo costado (altura h4), a maior solicitação para o tipo 2 encontra-se no meio vão do perfil pesado e no lado interno da chapa do fundo.

Para a análise de vibração na estrutura, foram comparados os parâmetros de entrada referentes a rotação do motor, rotação do propulsor, e número de pás vezes a rotação do propulsor com os cálculos dos modos de vibrar da estrutura para o arranjo ótimo (tipo 2). Podemos visualizar na tabela 13, os 4 primeiros modos de vibrar da viga navio, reforçador leve de fundo e unidade de chapeamento.

Tabela 12 - 3 primeiros modos de vibrar para estrutura otimizada

	Viga navio [rpm]	Reforçador leve de fundo [rpm]	Unidade de chapeamento [rpm]
1º modo de vibrar	155,88	97,33	275,43
2º modo de vibrar	429,67	389,34	1101,73
3º modo de vibrar	842,36	876,01	2478,90
4º modo de vibrar	1392,46	1557,35	4406,93

Fonte: O Autor (2016)

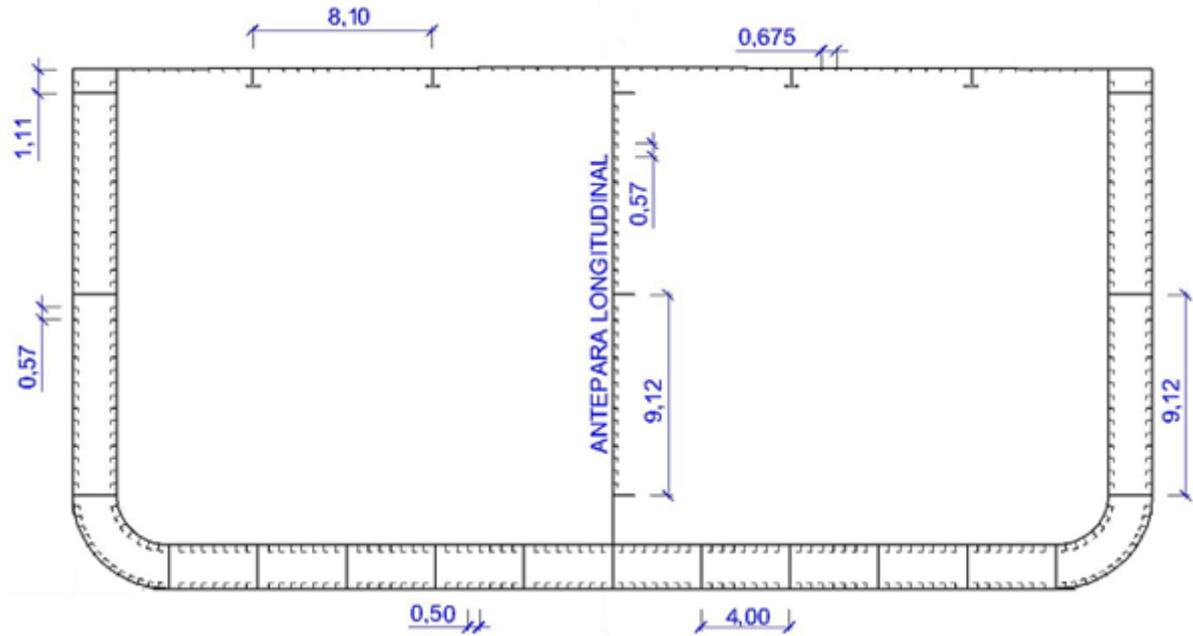
Como a rotação do motor e do propulsor é de 82 rpm, e o número de pás vezes a rotação do propulsor corresponde a 328 rpm, algumas frequências naturais da estrutura se aproximam delas (1º modo do reforçador no fundo e 1º de vibrar da unidade de chapeamento), o que poderia causar problemas com batimento⁶, levando a fadiga da estrutura.

Porém, normalmente a solução mais eficiente, ou seja, de menor custo, não é mudar o dimensionamento estrutural, e sim rever o dimensionamento do propulsor e do motor, para fugir das frequências naturais da estrutura. Portanto, optou-se por não tornar problemas com vibração como restrição do processo de otimização, e sim fazer uma análise posterior afim de verificar possíveis problemas que podem ser corrigidos em fases posteriores do projeto da embarcação.

O arranjo estrutural otimizado pode ser visualizado na figura 40, e a partir da tabela 14 podemos verificar as dimensões dos reforçadores presentes na seção mestra.

⁶Iteração simples de duas frequências naturais similares. Diferentemente da ressonância, batimento é um evento transitório e possui um grau destrutivo menor.

Figura 40 - Seção mestra com parâmetros otimizados



Fonte: O Autor (2016)

Tabela 13 - Dimensão dos reforçadores no arranjo estrutural ótimo

Reforçador	al (mm)	t _a (mm)	f (mm)	t _r (mm)
Leve de fundo	269	11,6	211	18,8
Leve de costado	232	10,5	192	17,7
Leve de convés	88,9	6,35	63,5	6,35
Leves duplo fundo	300	10	178	12,8
Sicordas	737,1	61,43	572,4	110,7

Fonte: O Autor (2016)

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um processo de otimização aplicado ao projeto estrutural para seções mestras típicas de petroleiros, graneleiros e porta contêineres.

A metodologia proposta consistiu no desenvolvimento de uma planilha que determina as tensões máximas existentes na estrutura, por meio da composição de tensões em diversos pontos da seção mestra. Em razão das restrições das normas implementadas, a planilha desenvolvida é limitada a embarcações com o comprimento de perpendiculares entre 90 e 427 metros.

A planilha apresentou resultados satisfatórios para petroleiros e graneleiros, porém quando se trabalhou com porta contêineres, ao utilizar espessuras mínimas da norma, foram relatados alguns problemas para atingir o módulo de seção requerido pela ABS. Para corrigir esse problema, sugere-se que sejam utilizadas espessuras maiores que a norma, principalmente para chapas de costado e duplo costado. Com isso, aumenta-se o momento de inércia da seção, além de aproximar a linha neutra da seção a meia nau, alcançando assim resultados maiores no módulo de seção projetado.

Mesmo desacoplado ao processo de otimização, a planilha pode ser utilizada para avaliação estrutural de embarcações de grande porte, pois com apenas alguns dados de entrada, a ferramenta realiza uma robusta síntese de tensões, obtendo-se como saída todas as solicitações estruturais presentes na seção mestra do navio analisado, além do comportamento vibratório da viga-navio, unidade de reforçador leve do fundo e unidade de chapeamento.

Após a síntese de tensões, foi acoplado à planilha um método de otimização baseado no algoritmo genético NGS2. Este algoritmo se mostrou um procedimento eficiente, visto que proporcionou resultados satisfatórios ao objetivo proposto com um baixo custo computacional.

É importante observar que duas abordagens distintas de otimização foram consideradas. Na primeira as espessuras do chapeamento é obtida diretamente da norma, enquanto que na segunda, as espessuras são consideradas variáveis de projeto limitadas pelas restrições da norma.

A metodologia desenvolvida foi aplicada ao projeto estrutural do navio petroleiro *Elka Leblon*, que possui 278,3 metros de comprimento, 48,7 metros de boca e 23,6 metros de pontal.

Como resultado do processo de otimização, obteve-se uma estrutura ótima com valores de espessuras de seção mestra superiores ao mínimo sugerido por norma, mostrando que nem sempre o caminho para a menor massa estrutural é a escolha de uma espessura mínima. Isso ocorre pois ao se aumentar esse parâmetro, pode-se utilizar um reforçador menor neste mesmo local, ocasionando em uma contraposição de massa que reduz a massa total da estrutura.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se inserir parâmetros no processo de otimização referente ao custo e tempo de trabalho, visto que são parâmetros que movem hoje em dia o mercado da indústria naval.

Para isso, devem ser inseridos dados referentes a despesas de construção que a estrutura poderia apresentar, visto que ao aumentarem o número de reforçadores, aumenta a quantidade de cordões de solda e pode acarretar também em uma maior mão de obra, ou maior tempo de serviço no estaleiro. Além disso, o custo de uma chapa não é o mesmo de um perfil, o que pode acarretar estruturas com maior massa e com menor custo de construção.

Ademais, aconselha-se a realização de simulações computacionais para a estrutura otimizada, com isso pode-se obter resultados mais precisos acerca dos esforços presentes em toda a estrutura.

REFERÊNCIAS

American Bureau of Shipping (ABS) – “**American Bureau of Shipping. Hull Construction and Equipment. Rules for Building and Classing - Steel Vessels, Part 3, February 2016**”, – Fevereiro de 2016.

AUGUSTO, O.B. **A estrutura secundária do navio**. São Paulo: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004a.

AUGUSTO, O.B. **A estrutura terciária do navio**. São Paulo: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004b.

AUGUSTO, Oscar Brito. **Projeto Racional Otimizado e Automatizado da Estrutura de Embarcações**. 1996. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. Cap. 01.

BARABANOV, N; V. **Structural Design of Sea-Going Ships**. Hardcover, 1966.

FIGUEIREDO, Silvia Ramscheid. **Modelo numérico unidimensional para análise de vibração do casco de um navio petroleiro**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FONSECA, M. M. **Arte Naval**. 7. ed, Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2005.

HUGHES, O.F; PAIK, J.K. **Ship Structural Analysis and Design**. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.

INMAN, Daniel J.; SINGH, Ramesh Chandra. **Engineering vibration**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

IACS. **Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers**. London Uk: Copyright, 2014. Disponível em: <http://www.iacs.org.uk/document/public/Publications/Common_rules/PDF/1._Harmonised_CSR_Original_1st_January_2014_Issue_pdf2316.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2016.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF CLASSIFICATION SOCIETIES (IACS). **Classification Societies - What, Why and How?**. 2011. Disponível em: <http://www.iacs.org.uk/document/public/explained/class_whatwhy&how.pdf >. Acesso em 20.out.2016

JURAS, Ilidia da Ascensão Garrido Martins. **Medidas de prevenção de acidentes com navios petroleiros**. 2002.

LAMB, Thomas et al. (Ed.). **Ship design and construction**. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2004.

LEWIS, E.V. **Principles of Naval Architecture: Stability and Strength**. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.

MARINE Traffic. 2007. Disponível em:

<<https://www.marinetraffic.com/ais/details/ships/305654000>>. Acesso em: 08 set. 2016.

MARPOL, International Convention for the Prevention of Pollution from Ships. 1973

MARTINS, R.S.M. **Desenvolvimento de uma ferramenta para suporte na análise de tensões longitudinais em estruturas de embarcações convencionais de grande porte.**

2014. 56 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Naval, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

MATHAI, Alice; GEORGE JOHN, P.; JACOB, Jini. Direct Strength Analysis of Container Ships. **International Journal of Engineering Research and Development (IJERD) ISSN**, p. 98-106.

MODEFRONTIER. **User Manual** versão 4.5.4. ESTECO, Trieste, Italy, (2013).

MOLINER, Lucas de. **Estudo do comportamento vibratório de uma embarcação em escala reduzida.** 2014. 59 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Naval, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

MOURA, Livia Laranjeira da Rocha. **Área efetiva no cisalhamento em modelos unidimensionais para predição de frequências naturais de vibração de navios.** 2014. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Cap. 02.

RAO, Singiresu. **Vibrações mecânicas.** Tradução de Arlete Simille Marques. 4. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2008.

SIGNIFICANT SHIPS OF 2011. London Uk: The Royal Institution Of Naval Architects, jan. 2012. Anual.

SIGNIFICANT SHIPS OF 2012. London Uk: The Royal Institution Of Naval Architects, jan. 2013. Anual.

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

SILVA, J. S.; CORRÊA, P. C. Estrutura, composição e propriedades dos grãos. 2013.

SRINIVAS, Nidamarthi; DEB, Kalyanmoy. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. **Evolutionary computation**, v. 2, n. 3, p. 221-248, 1994.

TANCREDI, T. P. **Otimização Multidisciplinar Distribuída aplicada a Projetos de Engenharia.** 2008. 190 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Cap. 2.

TANCREDI, T.P. **A estrutura primária do navio.** São Paulo: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

TUPPER, Eric Charles. **Introduction to naval architecture.** Butterworth-Heinemann, 2013.

WATSON, David GM. **Practical ship design**. Gulf Professional Publishing, 2002.

VAN MANEN, J. D.; VAN OSSANEN, P. Principles of Naval Architecture, Second Revision, Volume II: Resistance, Propulsion, and Vibration. **Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, New Jersey USA**, 1988.

APÊNDICE A – Resultados com menor massa estrutural no processo de 20 gerações

Tabela A1 – Resultados dos arranjos com menores massa para o tipo 1

Num_cavernas	Num_lev_con	Num_lev_c os	Num_lev _df	Num_lev_f un	SL_conves	SL_costado	SL_fundo	Massa
6	5	6	5	4	0,7	0,55	0,5	21019,95
6	5	6	5	4	0,7	0,55	0,5	21019,95
6	5	6	5	4	0,7	0,55	0,5	21019,95
6	5	7	2	2	0,55	0,55	0,5	21098,15
6	5	5	2	2	0,55	0,55	0,5	21173,62
6	5	5	6	4	0,7	0,55	0,5	21223,18
6	5	2	5	4	0,7	0,5	0,5	21322,00
6	5	2	5	4	0,7	0,55	0,5	21548,19
10	5	2	6	2	0,55	0,55	0,5	21691,18
6	5	2	5	4	0,55	0,5	0,5	21723,56
6	5	2	5	4	0,55	0,5	0,5	21723,56
6	5	2	5	4	0,55	0,5	0,5	21723,56
6	6	2	5	4	0,55	0,6	0,5	21729,42
6	6	2	5	4	0,55	0,6	0,5	21729,42
6	6	2	5	4	0,55	0,6	0,5	21729,42
8	6	2	5	2	0,55	0,55	0,5	21837,42
8	5	2	5	2	0,55	0,5	0,5	21945,19
8	5	2	5	2	0,55	0,5	0,5	21945,19
8	5	2	5	2	0,55	0,5	0,5	21945,19
8	5	2	5	2	0,55	0,5	0,5	21945,19

Tabela A2 – Resultados dos 20 arranjos com menores massa para o tipo 2

Num_cavernas	Esp_con	Esp_cos	Esp_df	Esp_fun	Num_lev_con	Num_lev_cos	Num_lev_df	Num_lev_fun	SL_costado	SL_fundo	SL_convés	Massa
9	16,75	19	23,5	19	8	12	3	4	0,65	0,6	0,8	20548,4
9	16,75	19	23,5	18	7	12	4	4	0,65	0,6	0,8	20599,29
7	16,5	18	23,5	19	8	12	3	4	0,65	0,6	0,8	20615,7
7	16,5	19	22,5	19	6	12	3	4	0,65	0,6	0,8	20630,8
9	16,5	19,25	23,5	19	5	12	3	4	0,65	0,6	0,75	20660,29
9	16,75	19	23,5	19	5	12	3	4	0,65	0,6	0,8	20693,12
9	16,75	19,25	23,5	19,5	5	12	3	4	0,65	0,5	0,75	20698,52
9	16,5	19	23,5	19	8	12	4	4	0,65	0,6	0,8	20733,06
9	16,5	19	23,5	19	8	12	4	4	0,65	0,6	0,8	20733,06
9	16,75	19,25	23,5	19,5	5	12	3	4	0,65	0,55	0,75	20753,58
9	16,75	19,25	23,5	19,5	5	12	3	4	0,65	0,55	0,75	20753,58
7	16,5	19	22,5	19	8	10	3	4	0,65	0,6	0,8	20762,93
7	16,5	19	22,25	19,25	8	12	3	4	0,65	0,6	0,8	20771,77
9	16,5	19,25	23,5	19	8	12	3	4	0,65	0,65	0,75	20781,89
7	16,5	19,25	22,5	19	7	12	3	4	0,65	0,6	0,85	20790,11
9	16,5	19,25	23,5	19	8	12	4	4	0,65	0,6	0,8	20794,18
8	16,75	19,25	21,25	19,25	6	12	4	4	0,55	0,5	0,7	20828,43
9	16,5	19	23,5	19	5	12	3	4	0,65	0,6	0,7	20843,14
7	17,5	19	23,75	19	6	12	3	4	0,65	0,6	0,8	20846,87
9	16,5	19	23,5	19	7	12	4	4	0,65	0,6	0,6	20883,02

APENDICE B – Comportamento das variáveis em função da massa no processo de 20 gerações

Figura B.1 – Comportamento do número de cavernas para tipo 1

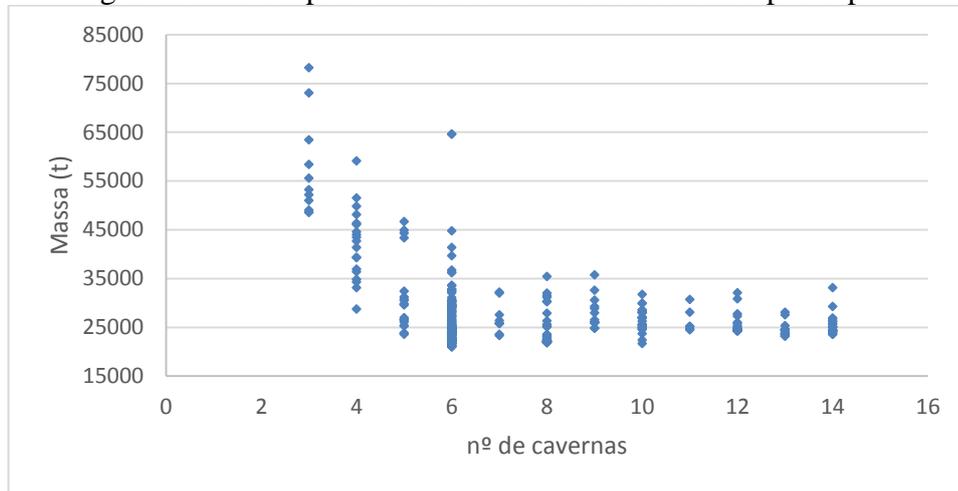


Figura B.2 – Comportamento número de leves no costado entre pesados para tipo 1

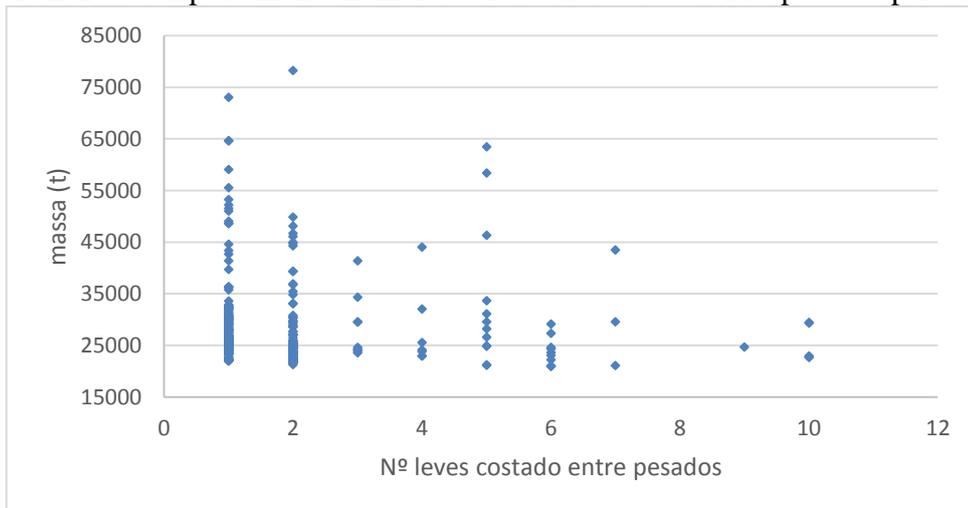


Figura B.3 – Comportamento número de leves no duplo fundo entre pesados para tipo 1

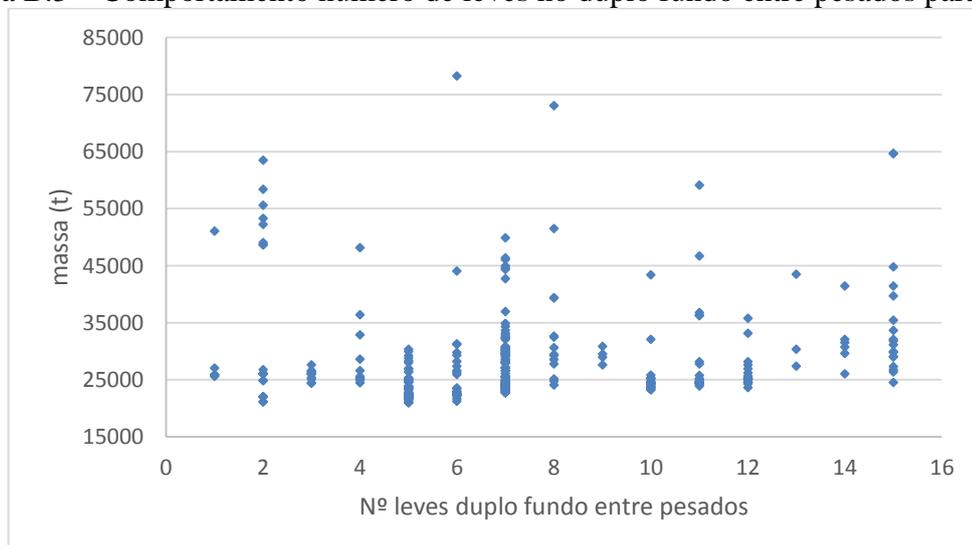


Figura B.4 – Comportamento número de levas no fundo entre pesados para tipo 1

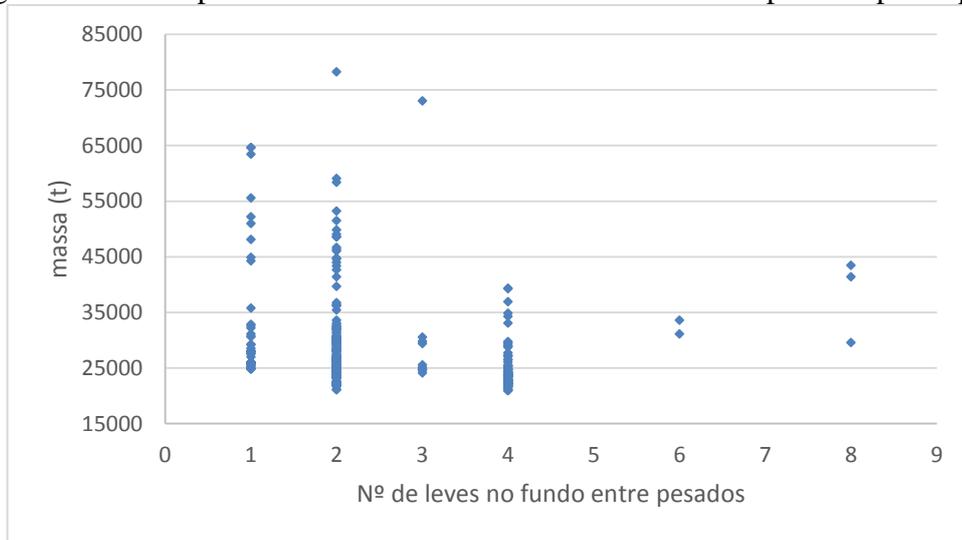


Figura B.5 – Comportamento número de levas no convés entre pesados para tipo 1

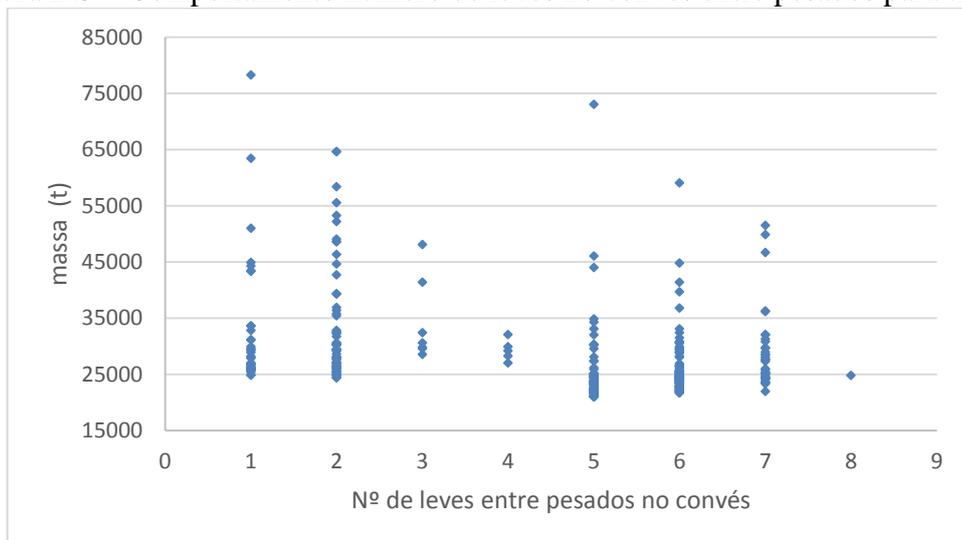


Figura B.6 – Comportamento do espaçamento entre levas no convés para tipo 1

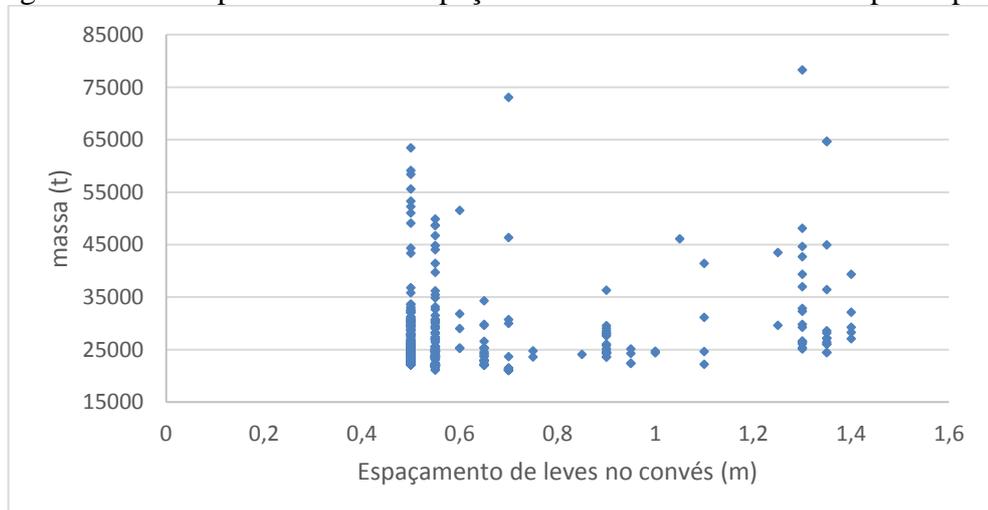


Figura B.7 – Comportamento do espaçamento entre levas no costado para tipo 1

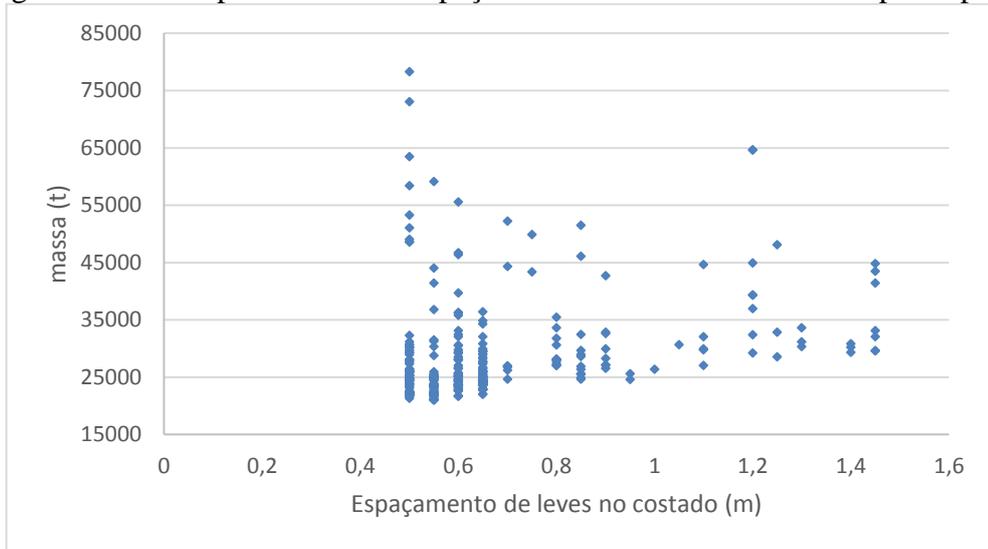


Figura B.8 – Comportamento espaçamento entre levas no fundo para tipo 1

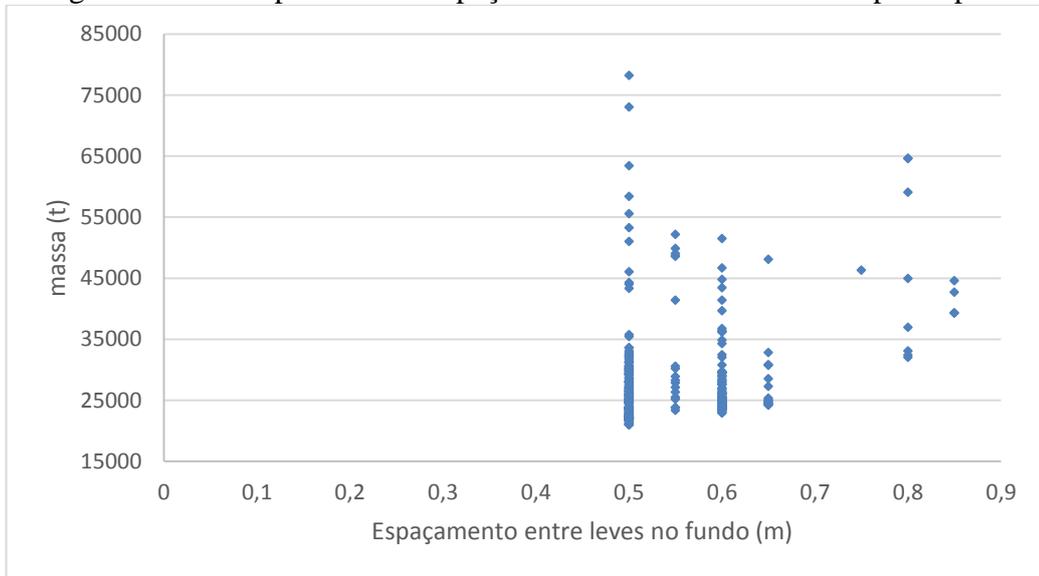


Figura B.9 – Comportamento número de cavernas para tipo 2

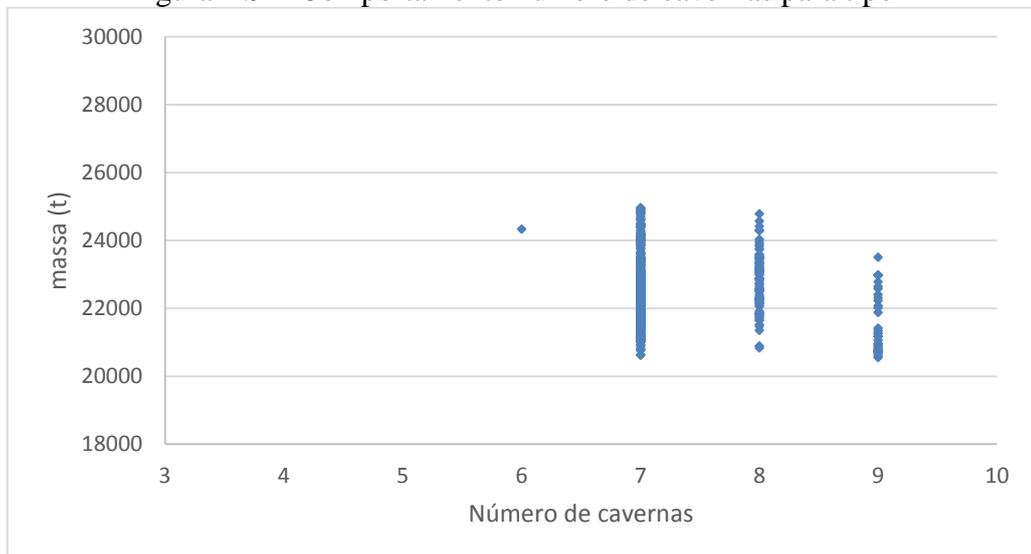


Figura B.10 – Comportamento número de levas no costado para tipo 2

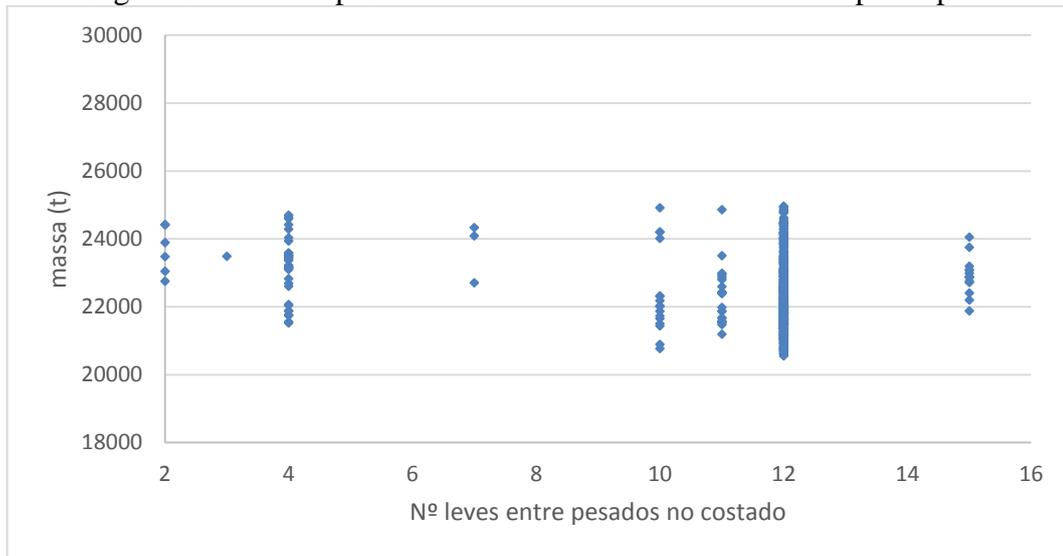


Figura B.11 – Comportamento número de levas no duplo fundo para tipo 2

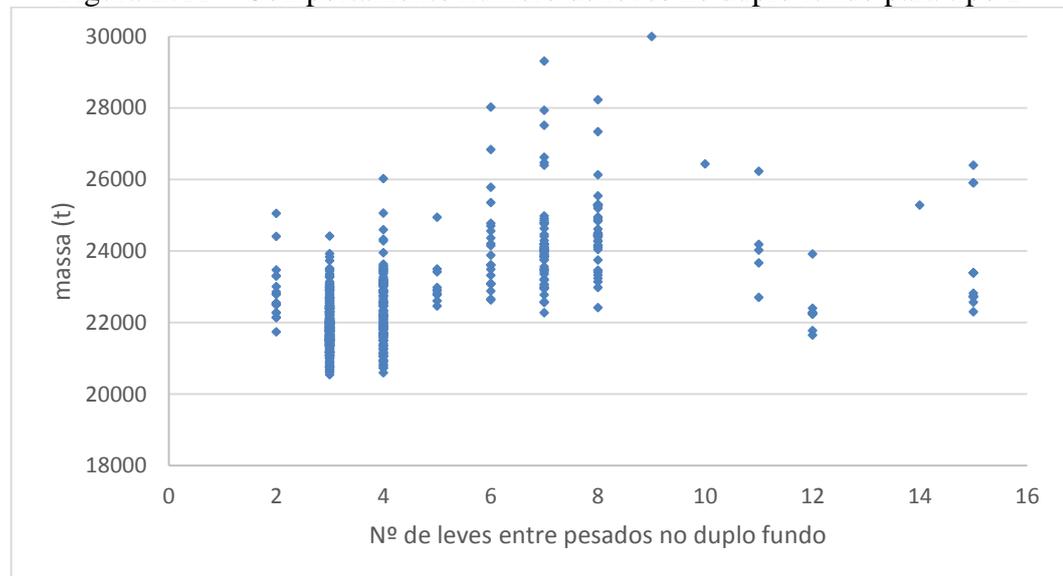


Figura B.12 – Comportamento número de levas no fundo para tipo 2

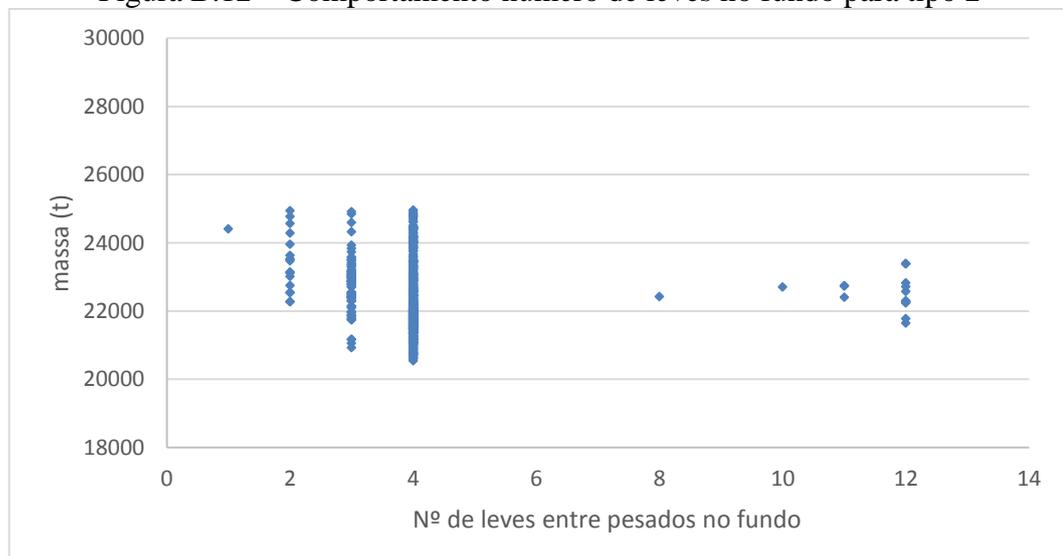


Figura B.13 – Comportamento número de leves no convés para tipo 2

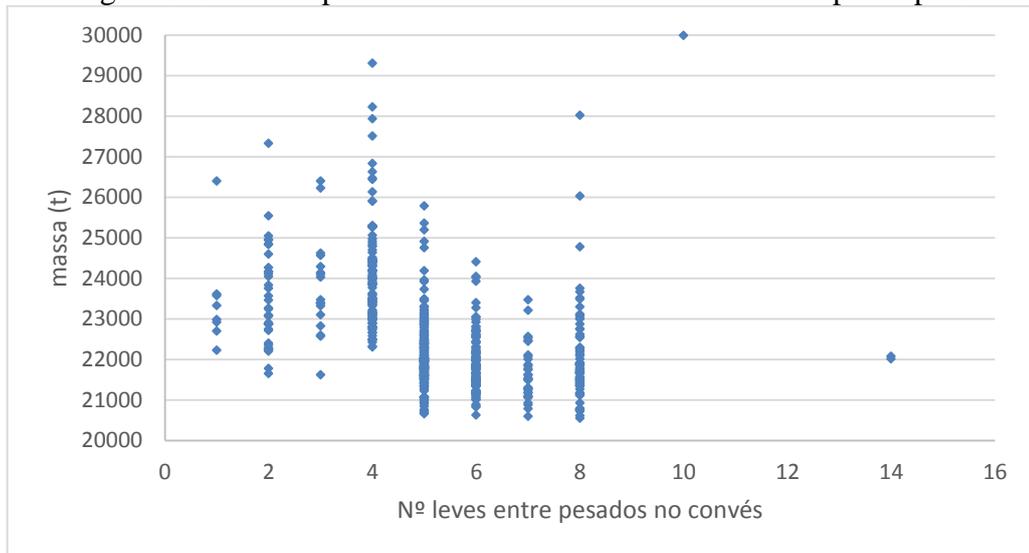


Figura B.14– Comportamento do espaçamento entre leves no convés para tipo 2

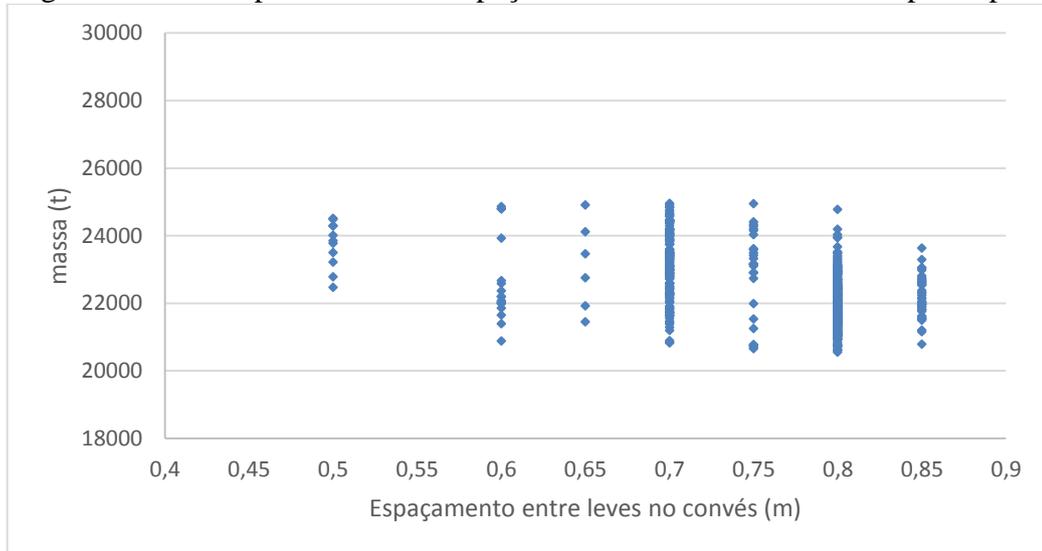


Figura B.15– Comportamento do espaçamento entre leves no costado para tipo 2

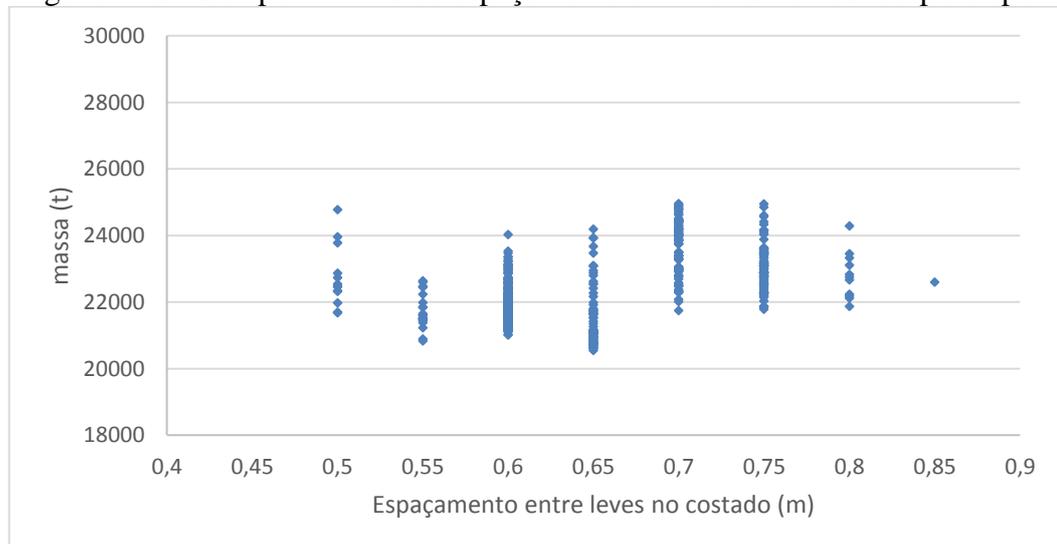


Figura B.16– Comportamento do espaçamento entre levas no fundo para tipo 2

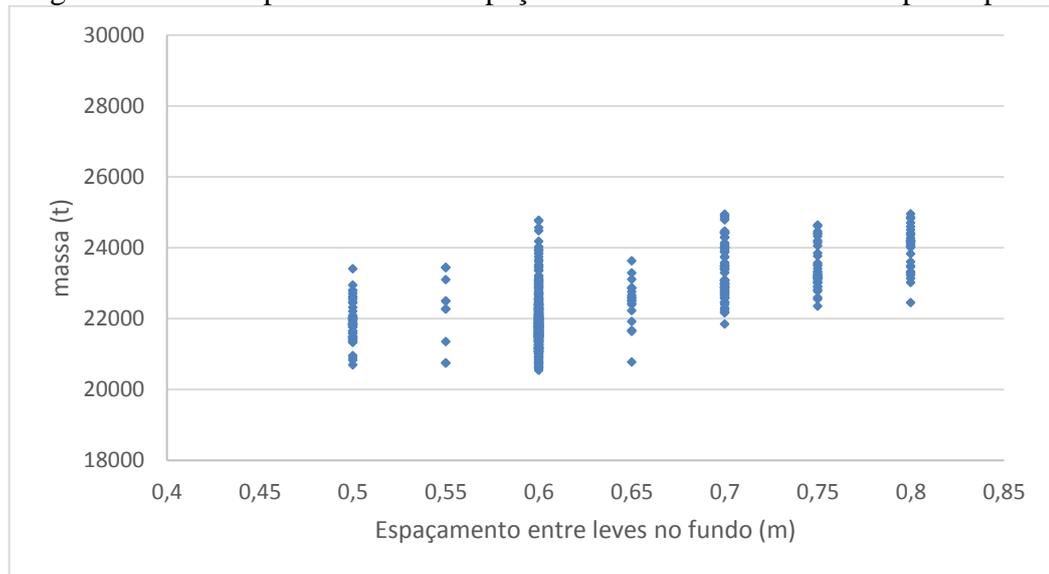


Figura B.17– Comportamento da espessura no fundo para o tipo 2

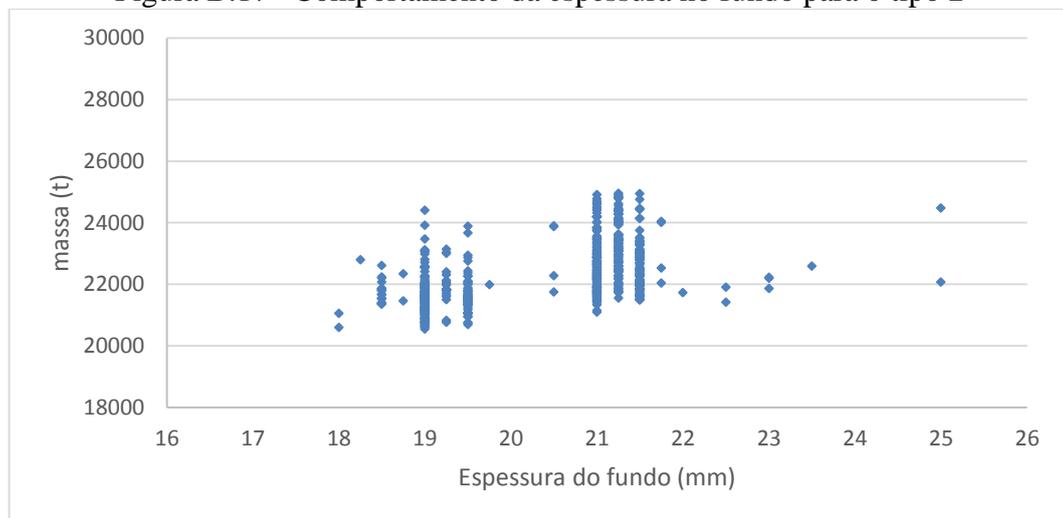


Figura B.18– Comportamento da espessura no duplo fundo para o tipo 2

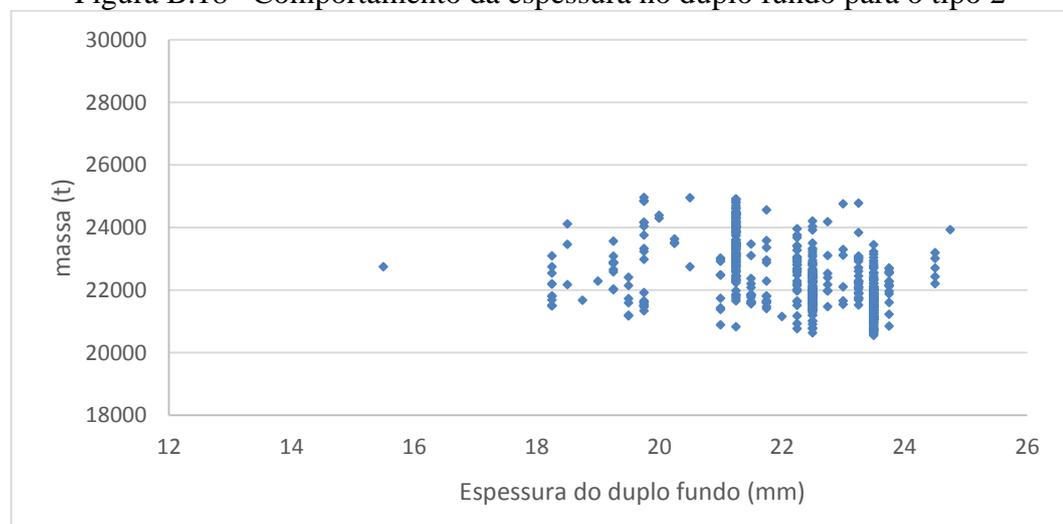


Figura B.19– Comportamento da espessura no costado para o tipo 2

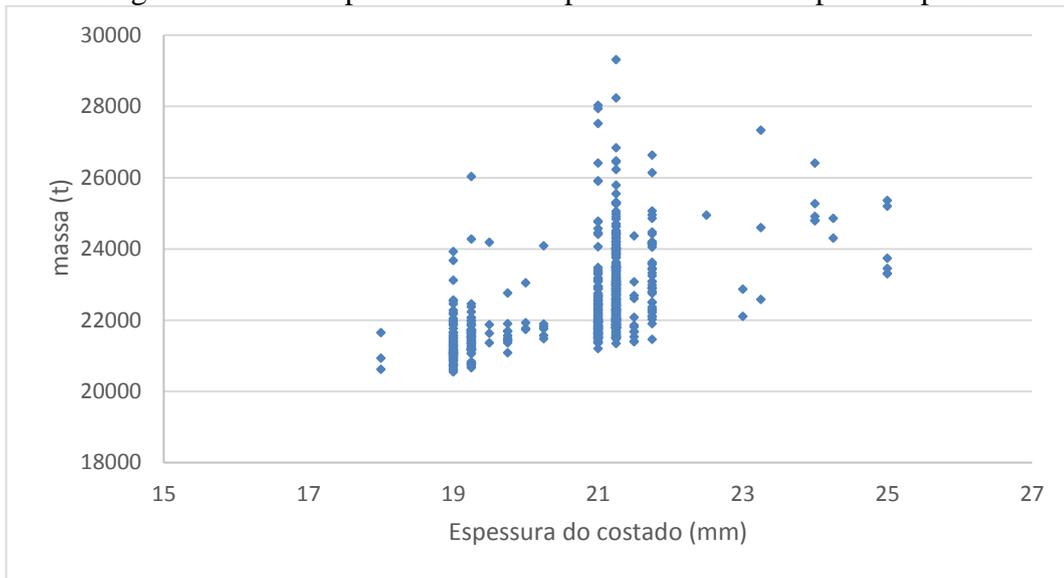
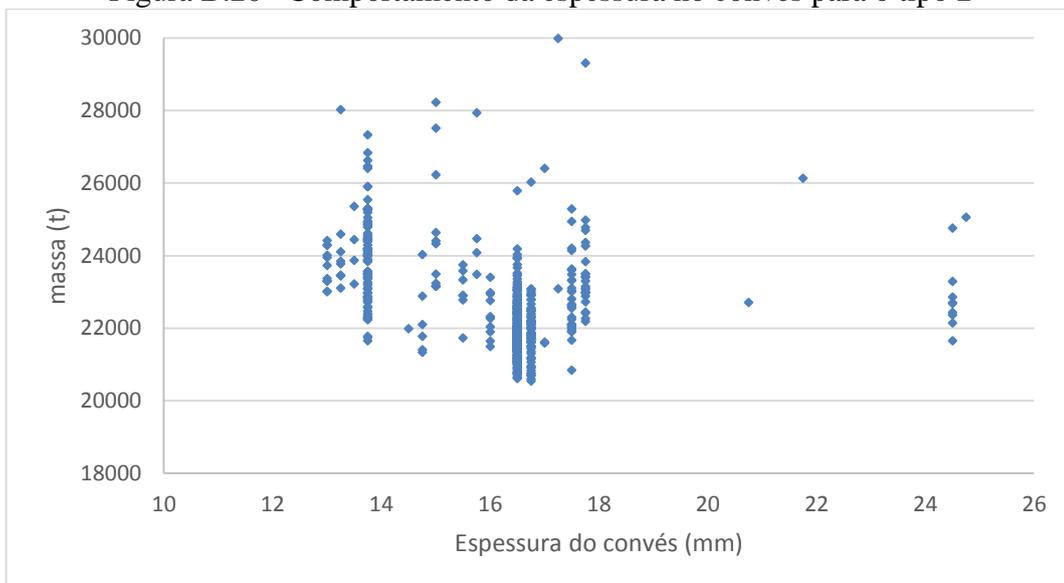


Figura B.20– Comportamento da espessura no convés para o tipo 2



APENDICE C– Máximas tensões encontradas para resultados ótimos

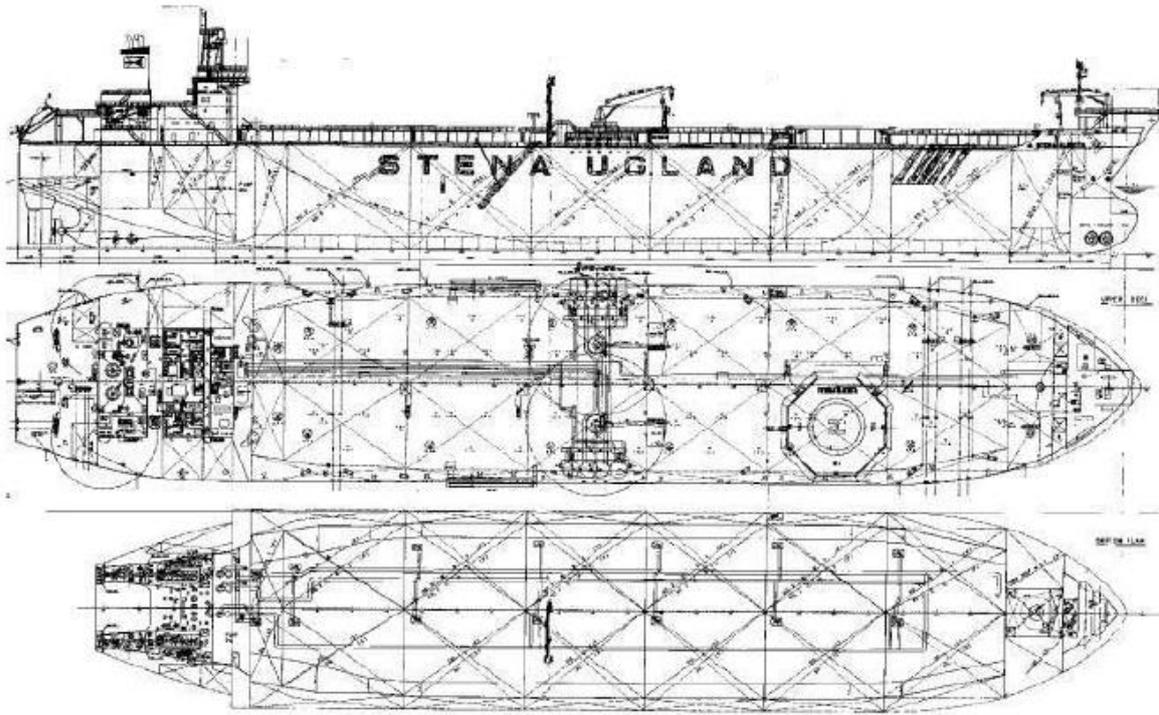
Tabela C1 – Máximas tensões encontradas para o arranjo ótimo na otimização tipo 1

Painel da secção	Local no painel	altura no painel	Condição de onda	$\sigma_{\text{longitudinal total}}$	$\sigma_{\text{longitudinal total}}$	σ_1	σ_2	σ_2	σ_3	FS
Fundo	Ponto 3	h1	Alq	281,37	-281,37	-107,21	-90,74	0,00	-83,42	1,26
Fundo	Ponto 5	h5	Tos	281,16	281,16	24,63	94,44	78,67	83,42	1,26
Costado	Ponto 1	h4	Alq	280,12	-280,12	-107,39	-86,21	0,00	-86,52	1,27
Costado	Ponto 5	h5	Tos	207,99	207,99	24,71	91,44	5,32	86,52	1,71
Convés	Ponto 7	h0	Alq	262,54	262,54	173,04	55,61	23,85	10,04	1,35
Convés	Ponto 7	h2	Tos	129,76	-129,76	-39,36	-17,49	-72,92	0,00	2,74

Tabela C2 – Máximas tensões encontradas para o arranjo ótimo na otimização tipo 2

Painel da secção	Local no painel	altura no painel	Condição de onda	$\sigma_{\text{longitudinal total}}$	$\sigma_{\text{longitudinal total}}$	σ_1	σ_2	σ_2	σ_3	FS
Fundo	Ponto 5	h3	Alq	282,92	-282,92	-136,19	-54,30	0,00	-92,42	1,25
Fundo	Ponto 5	h5	Tos	211,13	211,13	24,69	108,6	39,11	38,68	1,68
Costado	Ponto 7	h2	Alq	277,24	-277,24	-110,09	-38,75	-128,4	0,00	1,28
Costado	Ponto 2	h4	Tos	194,27	-194,27	24,79	-192,4	0,00	-26,67	1,83
Convés	Ponto 7	h2	Alq	275,68	275,68	172,39	41,73	61,56	0,00	1,29
Convés	Ponto 7	h2	Tos	182,79	-182,79	-38,82	-20,86	-123,1	0,00	1,94

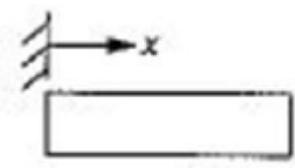
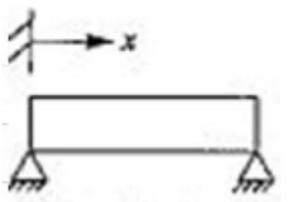
ANEXO A

Figura A.1 – Arranjo do petroleiro utilizado para obtenção do FC_F 

Fonte Lamb (2004, p. 29 – 17)

ANEXO B

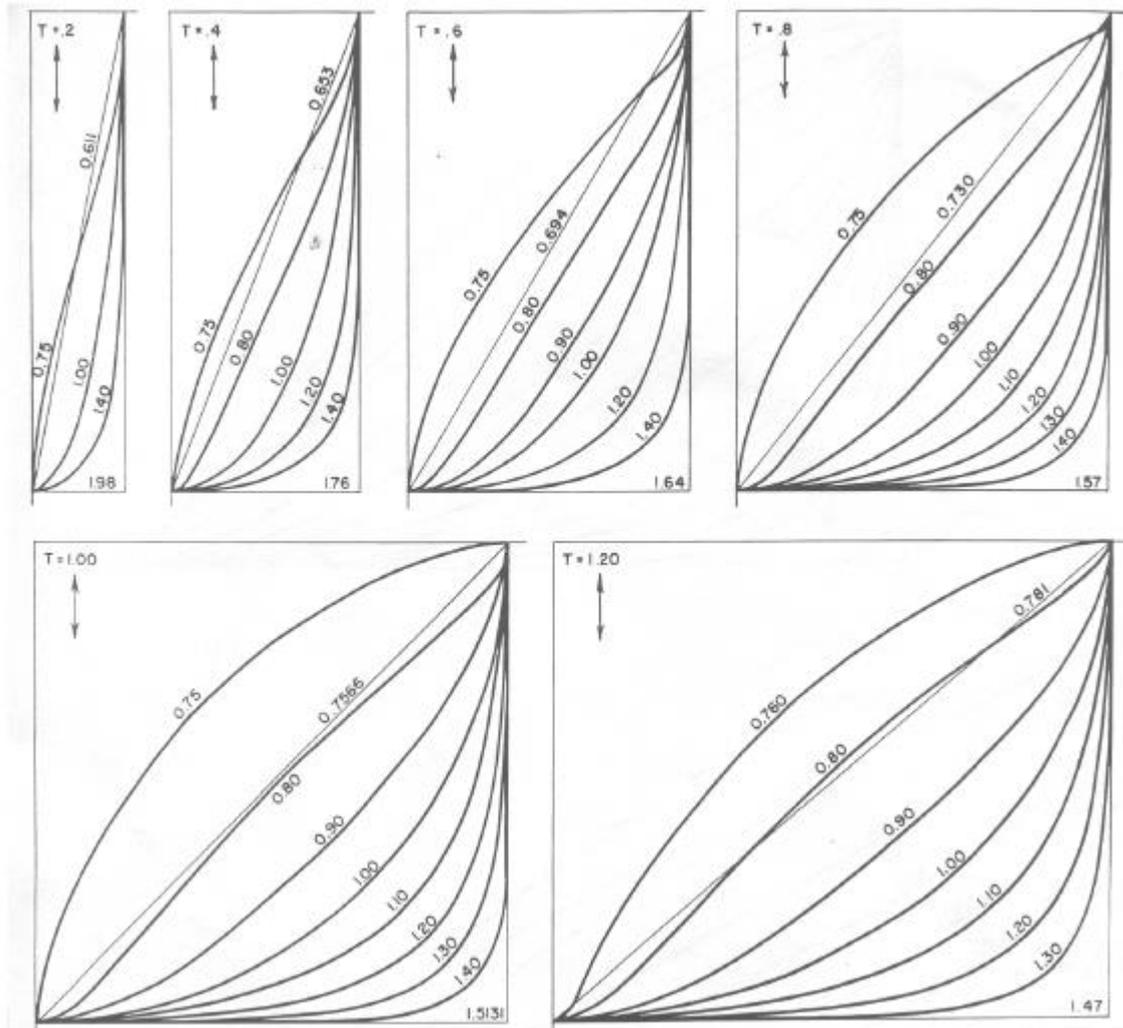
Figura B.1 – Constante B_n para diferentes condições de apoio de vigas sujeitas a vibrações

Condição de apoio	Configuração	n	$B_n L$
Livre-livre		1	4,73004074
		2	7,85320462
		3	10,9956078
		4	14,1371655
		5	17,2787597
		n>5	$\frac{(2n + 1) * \pi}{2}$
Bi-apoiada		-	$n * \pi$

Fonte: Inman (2001, p. 463)

ANEXO C

Figura C.1 – Coeficiente de massa adicional para diferentes valores de Boca sobre Calado



Fonte: VAN MANEN e VAN OSSANEN (1988, p. 722)

ANEXO D

Figura D.1 – Petroleiro *Elka Leblon*

Fonte: Significant Ships of 2012 (2013)

Figura D.2 – Informações sobre o petroleiro *Elka Leblon*

Shipbuilder:	STX Offshore & Shipbuilding Co., Ltd	TECHNICAL PARTICULARS	
Vessel's name:	<i>Elka Leblon</i>	Length oa:	278.30m
Hull No:	S1571	Length bp:	264.00m
Owner/operator:	European Navigation Inc	Breadth moulded:	48.70m
Country:	Greece	Depth moulded	
Designer:	STX Offshore & Shipbuilding Co., Ltd	To upper deck:	23.60m
Country:	Korea	Draught	
Flag:	Liberia	Scantling:	16.60m
IMO number:	9625712	Design:	15.00m
Total number of sister ships already completed (excluding ship presented):	nil	Displacement:	182,644tonnes
Total number of sister ships still on order:	1	Lightweight:	27,800tonnes
Main engine		Deadweight	
Design:	STX-MAN B&W	Design:	135,452dwt
Model:	6S70ME-C8.1 (NOx Tier III)	Scantling:	154,844dwt
Manufacturer:	STX Heavy Industry	Block co-efficient:	0.8333
Type of fuel:	HFO, MDO, MGO	Speed, service:	15.5knots
Output of each engine:	17,525kW x 82rpm	Cargo capacity	
Propeller		Liquid volume:	170,220m ³
Material:	Ni-Al-Bronze	Bunkers	
Designer/manufacturer:	Kawasaki	Heavy oil:	4,553m ³
Fixed/controllable pitch:	Controllable pitch	Diesel oil:	437m ³
Diameter:	8.6m	Water ballast:	54,607m ³
Speed:	82rpm	Daily fuel consumption	
		Main engine only:	55.99tonnes/day
		Auxiliaries:	6.9tonnes/day
		Classification society and notations: ...	DNV, +1A1, Tanker for Oil esp. CSR, Eo, DYNPOS-AUTR, Bow Loading, NAUT-OC, SPM, VCS-2, COAT-PSPC(B), HELDK-SH, CCO, F-AMC, ECA(SOx-A), CLEAN, TMON, OPP-F, Recyclable, AP-2(25%), BIS, BWM-T, BWM-E(s)

Fonte: Significant Ships of 2012 (2013)