

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

Rodrigo Silveira de Magalhães Martins

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA SUPORTE NA
ANÁLISE DE TENSÕES LONGITUDINAIS EM ESTRUTURAS DE
EMBARCAÇÕES CONVENCIONAIS DE GRANDE PORTE**

Joinville, 2014

Rodrigo Silveira de Magalhães Martins

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA SUPORTE NA
ANÁLISE DE TENSÕES LONGITUDINAIS EM ESTRUTURAS DE
EMBARCAÇÕES CONVENCIONAIS DE GRANDE PORTE**

Trabalho de conclusão de curso
submetido ao Programa de Graduação em
Engenharia Naval da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau de
Bacharel em Engenharia Naval.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pontin
Tancredi.

Joinville, 2014

Rodrigo Silveira de Magalhães Martins

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA SUPORTE NA
ANÁLISE DE TENSÕES LONGITUDINAIS EM ESTRUTURAS DE
EMBARCAÇÕES CONVENCIONAIS DE GRANDE PORTE**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Naval, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 29 de junho de 2015.

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca examinadora:

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr. Eng.
Orientador
Universidade de São Paulo

Prof. Carlos Maurício Saccheli, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Vitor Takashi Endo, M. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais, Givaldo e Sílvia Martins, por me darem todo o suporte e carinho necessário durante minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

À meus pais, Givaldo Henriques Martins e Sílvia Valéria Silveira de Magalhães Martins pelo amor incondicional, pela educação e o privilégio do estudo.

À cada membro da família que meu coração escolheu, a Rapeize, pelos anos de amizade e companheirismo, que me deram forças e motivação para chegar até aqui. Em especial aos meus amigos, Juan Carlos Matos, pela positividade e alegria de todos os dias, Fábio Smiderle, João Alexandre Garcia e Giovani Silveira de Magalhães Martins, por terem sido exemplos de dedicação à todo momento, e Eduardo Silveira Arruda Filho, pela sabedoria.

À minha namorada, Danielle Dayane de Oliveira Dutra, por ser minha companheira inquestionável durante a elaboração deste trabalho, sendo compreensiva e incentivando-me em todas as circunstâncias.

Ao meu orientador Thiago Pontin Tancredi, pela inspiração, conhecimento, cobrança, motivação e paciência que me trouxeram até aqui.

Aos professores, que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional durante minha vida acadêmica.

À todos que de alguma forma fizeram parte desta conquista, direta ou indiretamente.

“Wisdom is not a product of schooling, but of the lifelong attempt to acquire it”

Albert Einstein.

RESUMO

O processo de projeto de embarcações pode ser considerado um processo contínuo e sistemático de tomada de decisões a fim de atingir configurações viáveis que atendam aos requisitos estabelecidos. Uma das etapas desse processo é a determinação do arranjo estrutural do navio. O presente trabalho se dedicará a desenvolver uma ferramenta para analisar arranjos estruturais tradicionais navais, compostos por chapas reforçadas por perfis. O modelo de análise comumente utilizado divide a análise em estruturas globais e locais. Com o auxílio do programa Microsoft Excel será elaborada a ferramenta que permitirá a análise da estrutura de embarcações através de métodos analíticos, utilizando modelos classicamente empregados em Mecânica dos Sólidos, sendo interligadas entre si, de modo que se possa obter a composição dos esforços presentes. Um estudo de caso com um navio de estrutura similar ao do petroleiro Prestige, naufragado na Espanha em 2012, é apresentado, com o objetivo de exemplificar a aplicação da ferramenta e permitindo a identificação de possíveis modificações e melhorias estruturais.

Palavras-chave: Arranjo estrutural, Análise Global, Análise Local, Métodos Analíticos, Estruturas Navais.

ABSTRACT

The process of project of vessels can be considerate a continuous process and systematic of make decision in order to achieve viable configuration to attend the requirement established. One of the steps of the process is determining the structural arrangement of a ship. The present term paper will dedicate to develop a tool to analyze naval traditional structural arrangements, compound for plates reinforced by profiles. The analysis model generally used, divide the analyses in global and local structures. With Microsoft Excel support a tool will be generated which will analyze vessels structures by analytical methods, utilizing models classically used in Mechanics of Solids, being interconnected, so that one can obtain the composition of present efforts. A case study will be based on a vessel with structure similar of the oil tanker Prestige, wrecked in Spain in 2012, presented with the objective to exemplify the application of tool and allowing identification of possible modification and structural improvements.

Keywords: Structural arrangement, Global analyze, Local analyze, Analytical methods, Naval Structure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de espiral de projeto de Evans destacando o projeto estrutural	1
Figura 2 - Estrutura do fundo de um navio tanque de casco singelo	2
Figura 3 - Naufrágio do Petroleiro Prestige	3
Figura 4 - Orientação dos módulos de força e momentos	6
Figura 5- Distribuição de tensão na teoria de feixe simples	7
Figura 6 - Modelo de fluxograma de divisão da análise estrutural.....	9
Figura 7 - Viga Navio	10
Figura 8 - Convenção para trim positivo.....	11
Figura 9 - Carregamento devido à ondas de Alquebramento e Tosamento	12
Figura 10 - Exemplo do diagrama de Força Cortante ao longo da viga-navio	13
Figura 11 - Exemplo de diagrama do Momento Fletor ao longo da viga-navio	13
Figura 12 - Representação de perfis leves e pesados	14
Figura 13 - Exemplo de placa e sistema de referência.....	17
Figura 14 - Deflexão máxima em placas retangulares sob pressão uniforme	18
Figura 15 - Tensões em placas retangulares sob pressão uniforme	19
Figura 16 - Distribuições de pressão em placas engastadas	20
Figura 17 - Aba Estrutura Primária.....	22
Figura 18 - Aba Estrutura Secundária Pesada	25
Figura 19 - Gráfico de <i>Schade</i>	26
Figura 20 - Exemplo de seção formada pela chapa colaborante e perfil leve	27
Figura 21 - Exemplo de pontos localizados em diferentes posições no eixo transversal	29
Figura 22 - Aba Estrutura Terciária	31
Figura 23 - Malha refinada para análise de placa	32
Figura 24 - Exemplo de simulação para placa com 1 m de comprimento	34
Figura 25 - Exemplo de simulação para placa com 1,5 m de comprimento	34
Figura 26 - Exemplo de simulação para placa com 2 m de comprimento	34
Figura 27 - Aba Principal	36
Figura 28 - Arranjo Geral do petroleiro Prestige.....	39
Figura 29 - Dados utilizados no estudo de caso	40
Figura 30 - Validade da análise	40
Figura 31 - Diferentes Momentos Fletores do Estudo de Caso.....	41

Figura 32 - Tensão Longitudinal na Estrutura Primária em Alquebramento ($Z = Y = \zeta = 0$) .	41
Figura 33 - Tensão Longitudinal na Estrutura Secundária Pesada em Alquebramento ($Z = Y = \zeta = 0$)	42
Figura 34 - Tensão Longitudinal na Estrutura Terciária em Alquebramento ($Z = Y = \zeta = 0$) .	42
Figura 35 - Tensão Longitudinal Total em Alquebramento	43
Figura 36 - Tensão Longitudinal da Estrutura Primária em Alquebramento para $\zeta = 0,02$ m.	44
Figura 37 - Tensão Longitudinal da Estrutura Secundária Pesada em Alquebramento para $\zeta = 0,02$ m.....	44
Figura 38 - Tensão Longitudinal da Estrutura Terciária em Alquebramento para $\zeta = 0,02$ m	45
Figura 39 - Tensão Longitudinal Total em Alquebramento para $\zeta = 0,02$ m	45
Figura 40 - Tensão Longitudinal da Estrutura Primária em Alquebramento para $\zeta = 2,74$ m.	46
Figura 41 - Tensão Longitudinal da Estrutura Secundária Pesada em Alquebramento para $\zeta = 2,74$ m.....	46
Figura 42 - Tensão Longitudinal Total em Alquebramento para $\zeta = 2,74$ m	47
Figura 43 - Tensão Longitudinal para Estrutura Secundária Leve em Alquebramento para $Y = 7,2$ m.....	47
Figura 44 - Tensão Longitudinal Total em Alquebramento para $Y = 7,2$ m.....	48
Figura 45 - Tensão Longitudinal da Estrutura Terciária em Alquebramento para $Y = 7,65$ m	48
Figura 46 - Tensão Longitudinal Total em Alquebramento para $Y = 7,65$ m.....	49
Figura 47 - Tensão Longitudinal na Estrutura Primária em Alquebramento para $\zeta = 0,02$ m e $Y = 7,65$ m	49
Figura 48 - Tensão Longitudinal na Estrutura Secundária Pesada em Alquebramento para $\zeta = 0,02$ m e $Y = 7,65$ m	50
Figura 49 - Tensão Longitudinal na Estrutura Secundária Leve em Alquebramento para $\zeta = 0,02$ m e $Y = 7,65$ m	50
Figura 50 - Tensão Longitudinal na Estrutura Terciária em Alquebramento para $\zeta = 0,02$ m e $Y = 7,65$ m	51
Figura 51 - Tensão Longitudinal Total em Alquebramento para $\zeta = 0,02$ m e $Y = 7,65$ m	51
Figura 52 - Resultados da Análise na Ferramenta Desenvolvida	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Equações das Áreas e Posições Verticais de Centro de Gravidade	26
Tabela 2: Dados das simulações realizadas	32

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{alma}	Área da Alma
A_{chapa}	Área da Chapa Colaborante
A_{flange}	Área da Flange
a	Maior dimensão de uma unidade de chapeamento
B	Boca da embarcação
b	Menor dimensão de uma unidade de chapeamento
B_l	Distância entre perfis longitudinais leves
B_p	Distância entre perfis longitudinais pesados
$b(x)$	Curva de Flutuação
c	Largura da Chapa colaborante
C_b	Coefficiente de Bloco da embarcação
D	Pontal da Embarcação
E	Módulo de Young
I	Momento de Inércia da Seção Mestra da embarcação
K_a	Coefficiente de pressão em placas retangulares na direção “a”
K_b	Coefficiente de pressão em placas retangulares na direção “b”
L	Comprimento da embarcação na linha d’água
ℓ_1	Variável do modelo de Shade
L_a	Distância entre anteparas transversais
LCB	Posição Longitudinal do Centro de Flutuação
LCG	Posição Longitudinal do Centro de Gravidade
L_h	Distância entre as hastilhas
M	Momento fletor
σ	Tensão longitudinal
$\sigma_{c/c}$	Relação de tensões entre o centro da placa e o centro da aresta b
σ_Y	Tensão longitudinal interpolada em Y
σ_ζ	Tensão longitudinal interpolada em ζ
P	Peso da embarcação
p	Pressão hidrostática
$p(x)$	Curvas de Peso da embarcação

q	Carga linear
T	Calado da embarcação
Y	Direção medida em função da quilha na direção da boca
X	Direção medida a partir da antepara, no sentido longitudinal do navio
Z	Direção medida em função da quilha na direção vertical
Zln	Posição vertical de linha neutra
Zcg	Posição vertical do centro de gravidade
ζ	Posição vertical no painel medida em função da quilha na direção vertical
∇	Empuxo

SUMÁRIO

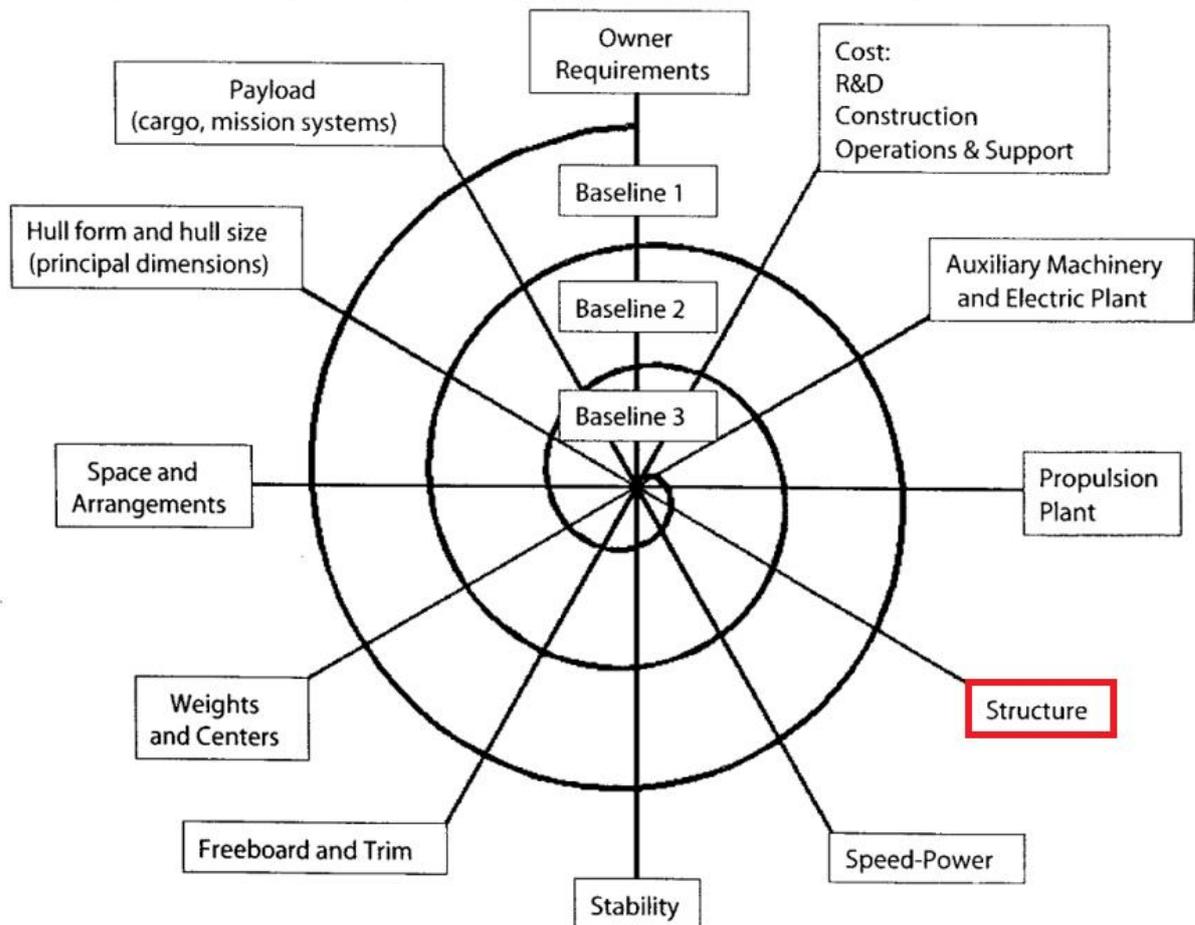
Introdução.....	1
Fundamentação teórica.....	6
2.1 Desacoplamento da análise estrutural de embarcações	6
2.2 Estrutura primária.....	9
2.3 Estrutura secundária.....	14
2.4 Estrutura terciária	17
Desenvolvimento da ferramenta para análise estrutural de embarcações	21
3.1 Aba estrutura primária	21
3.2 Abas estrutura secundária pesada e estrutura secundária leve	24
3.3 Aba estrutura terciária.....	30
3.4 Aba principal.....	35
Estudo de caso	39
4.1 Discussão de resultados	52
Conclusão	54
Referências	55

INTRODUÇÃO

O processo de concepção e análise de uma embarcação pode ser considerado um processo contínuo e sistemático de tomada de decisões a fim de atingir configurações viáveis para a embarcação. Por soluções viáveis, consideram-se aquelas que atendam aos requisitos de projeto estabelecidos e as normas e regulamentos existentes.

Por ser um processo iterativo, usualmente a representação do processo de projeto de navios é feita por meio da Espiral de Evans (Lamb apud Evans, 2003). Uma das etapas desse processo é a determinação do arranjo estrutural da embarcação. Na Figura 1 é mostrado um exemplo de espiral de projeto destacando a etapa de determinação do arranjo estrutural, tópico do presente trabalho.

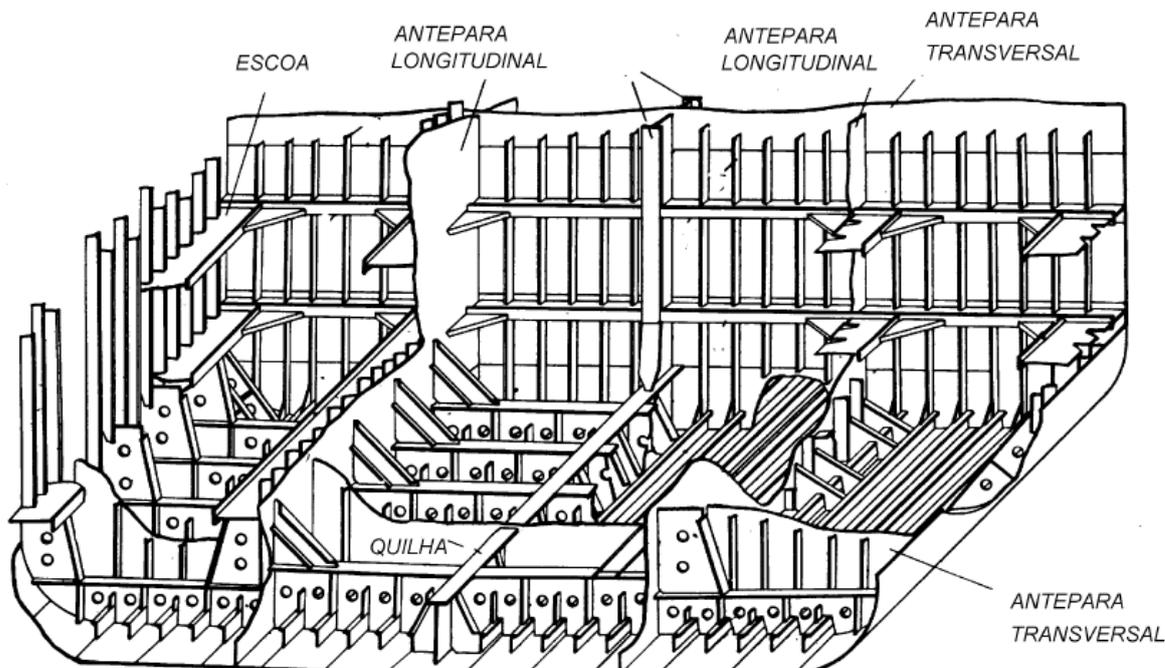
Figura 1 - Exemplo de espiral de projeto de Evans destacando o projeto estrutural



Fonte: Lamb (2003)

O presente trabalho se dedicará a desenvolver uma ferramenta para analisar arranjos estruturais tradicionais navais, ou seja, que utilizam o conceito de painel estrutural, cujo exemplo é mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura do fundo de um navio tanque de casco singelo



Fonte: Augusto (2004)

É interessante observar que esse tipo de arranjo é amplamente utilizado no projeto de estruturas navais, aeroespaciais e ferroviárias, pois, conforme discutido por (Augusto, 2004), são os arranjos com maior eficiência estrutural, quando submetidos à pressão ortogonal ao chapeamento.

Mesmo que um arranjo estrutural mais pesado possa ser mais resistente, pode-se aumentar a eficiência de um projeto estrutural se for considerado que a eficiência estrutural pode ser definida como a relação entre a carga máxima que a estrutura pode suportar (sem falhas estruturais) e o peso da estrutura.

O estudo da distribuição de tensões e da eficiência de estruturas flutuantes tem sido tópico de diversos trabalhos recentes (Chaves; Tancredi; Andrade, 2010; Damiensage; Melin, 2012; Kang; Lee; Kim, 2010), pois a redução do peso estrutural pode, eventualmente, ser associada à redução dos custos de fabricação, custos operacionais e melhor desempenho da embarcação, conforme descreve (Chaves; Tancredi; Andrade, 2010).

Para a análise da distribuição de tensões e da eficiência estrutural de embarcações, é necessária a compreensão de que o comportamento de estruturas flutuantes pode ser dividido em global e local, sendo o global classificado em resistência primária, e o local em resistências secundária (reforçadores) e terciária (chapas).

Esse desacoplamento baseia-se na hipótese de que os raios de curvatura associados aos campos de deformação são de ordem de grandeza diferente; cuja validade será melhor discutida ao longo da fundamentação teórica deste trabalho. No entanto, falhas globais sempre acarretam o comprometimento do meio flutuante, enquanto que falhas locais podem, eventualmente, serem reparadas.

No presente trabalho, a ferramenta para análise estrutural de embarcações utilizará métodos analíticos, com modelos de casca e viga classicamente empregados em Mecânica dos Sólidos. Atenção especial será dada a composição dos diferentes campos de tensão, que respeitará o modelo desenvolvido e apresentado pelos clássicos autores Hughes (2010), Barabanov (1959) e Lewis (1989).

Como exemplo de aplicação do procedimento apresentado neste trabalho, será realizado um estudo de caso do petroleiro monocasco Prestige que naufragou em 2002 a 240 km a oeste de Vigo, Espanha, quando transportava 77 mil toneladas de combustível pesado (Figura 3). O naufrágio ocasionou uma mancha negra após mais de 11 mil toneladas de combustível vazarem no mar, cobrindo aproximadamente 913 km da costa da Galícia.

Figura 3 - Naufrágio do Petroleiro Prestige



Fonte: The Time Europe (2012)

A partir da análise estrutural realizada em uma embarcação semelhante à do petroleiro Prestige, serão discutidos os resultados obtidos e serão propostas, eventuais modificações visando melhorar a eficiência estrutural, buscando a redução de massa ao mesmo tempo em que se busca evitar o colapso da estrutura em embarcações semelhantes. Outros trabalhos recentes foram desenvolvidos na área de estruturas de embarcações utilizando métodos analíticos de análise.

Destacam-se (KOZAK, J.; GORSKI, Z., 2011), que discute a resistência a fadiga em juntas soldadas na secção mestra, utilizando modelos analíticos para determinar os campos de tensão a que as juntas estão submetidas; (DMIENSAGE, J.; MELIN, T., 2012), que tenta estabelecer uma comparação entre os modelos analíticos e os resultados obtidos por simulação computacional de estruturas navais; (SILVA, P.S.B.; VAZ, M. A., 2012), que propõem um método semi-analítico para a estimativa da resistência de painéis enrijecidos; entre outros.

Para fazer a análise das distribuições de tensões nas estruturas será realizada revisão bibliográfica durante todo o trabalho. Ao longo desta revisão serão desenvolvidas, em paralelo, planilhas utilizando o programa *Microsoft Excel* para que seja realizada a análise analítica, efetuando os devidos cálculos de distribuição de tensões baseados nos dados de entrada da embarcação.

Há softwares semelhantes que permitem realizar a análise estrutural ao longo de embarcações como *MARS 2000*, o qual permite a análise ao longo da embarcação baseado na norma *Bureau Veritas Rules*; *NAUTICUS HULL*, que oferece ferramentas para o projeto de estruturas navais pelas normas *IACS Common Structural Rules* e *DNV*; *FPSO EAGLE*, que permite a análise de estruturas de embarcação do tipo FPSO.

Outros softwares como *ANSYS* e *ABAQUS* permitem a análise estrutural de embarcações através o Métodos de Elementos Finitos (MEF), possibilitando uma análise estrutural mais completa, sendo mais complexa e exigindo um grande custo computacional.

Foi utilizado o período de cinco meses para a elaboração da planilha, com as abas de análise da estrutura primária baseada na Teoria Simples de Viga, de estrutura secundária pesada e estrutura secundária leve e de estrutura terciária. Estas abas estarão interligadas entre si na aba principal, de modo que se possa obter a composição dos esforços presentes e por consequência realizar uma análise (global e local) da estrutura de uma embarcação.

Após todas as abas elaboradas, foi realizado um estudo de caso com uma embarcação semelhante ao do petroleiro Prestige, identificando os pontos de máxima tensão. No capítulo 4 foi trabalhado um estudo de caso contendo informações de todo procedimento realizado e os

resultados obtidos, apontando as melhorias identificadas e possíveis pontos para estudos posteriores.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são discutidos os fundamentos teóricos que dão base ao desenvolvimento do presente trabalho.

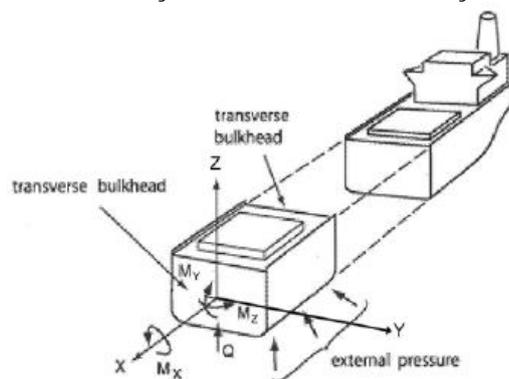
Para realizar a análise de estruturas, pode-se utilizar três abordagens: numérica, experimental e analítica. O presente trabalho utilizará modelos analíticos para realizar uma análise desacoplada dos diferentes elementos que constituem a estrutura de embarcações com base nos modelos tradicionais.

2.1 DESACOPLAMENTO DA ANÁLISE ESTRUTURAL DE EMBARCAÇÕES

Usualmente, pode-se dividir uma análise estrutural em efeitos globais e locais. A análise global de estruturas navais costuma ser denominada estrutura primária da embarcação.

Para um navio, a estrutura primária, de maneira geral, é considerada essencialmente uma viga, cuja análise considera apenas forças e momentos distribuídos ao longo do comprimento. Nesse modelo, o momento de flexão longitudinal, M_y é a componente mais significativa, flexionando a estrutura em torno do eixo Y (figura 4). Este efeito é causado principalmente pelas distribuições de peso e flutuabilidade desiguais ao longo do comprimento do navio, acentuada pela incidência de eventuais ondas do mar.

Figura 4 - Orientação dos módulos de força e momentos

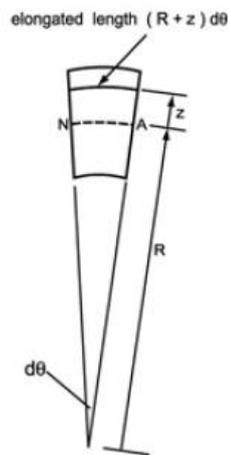


Fonte: Hughes (2010)

O momento de flexão varia ao longo do comprimento do navio, sendo zero nas extremidades e máximo próximo à meia-nau, resultando em um campo de tensões na secção mestra cujos valores, usualmente, são próximos à metade do limite de escoamento do material.

Para a análise pela teoria de vigas simples, é necessário assumir algumas premissas. O plano de seções transversais permanece plano (figura 5); a viga-navio é essencialmente prismática, ou seja, sem aberturas ou descontinuidades; outros modos de resposta às cargas, como por exemplo, deformações e distorções causadas por cisalhamento, não afetam o momento de flexão, podendo ser tratadas separadamente; o material é homogêneo e elástico (Hughes, 2010).

Figura 5- Distribuição de tensão na teoria de feixe simples



Fonte: Hughes (2010)

Sob a ação de um momento de flexão, uma viga é submetida à curvatura de raio R localmente e, se as seções transversais permanecem planas, a tensão longitudinal ε_x em uma seção transversal varia linearmente em relação à direção vertical e está relacionada com R , como a seguir:

$$\varepsilon_x = \frac{(R + z)d\theta - Rd\theta}{Rd\theta} = \frac{z}{R}$$

Assumindo que o material é homogêneo e elástico, pode-se utilizar a Lei de Hook. Assim, considerando-se que não há forças axiais, e utilizando de simplificações matemáticas através do momento de flexão, M_y , encontra-se a equação de tensão normal:

$$\sigma_x = \frac{M_y z}{I}$$

Onde I é o momento de inércia da seção transversal.

Pode-se observar através da equação que a tensão é constante em todo o eixo horizontal e varia linearmente na eixo z . Muitos fatores podem diferir a distribuição real de tensões da distribuição idealizada. Em consequência do cisalhamento transversal, há alguma distorção longitudinal da seção transversal do modelo viga-navio. A carga torcional causará mais distorções, particularmente se houver grandes aberturas no convés.

O fenômeno que resulta em distorções longitudinais da seção transversal fora do plano é denominado empenamento, sugerindo que a primeira premissa não é cumprida. Da mesma forma que a segunda e a terceira hipóteses não são satisfeitas, pois a viga não é prismática e pode ter aberturas e descontinuidades, além da ocorrência de discretização do elemento como anteparas transversais (Hughes, 2010).

Além disso, a estrutura do navio é um conjunto complexo de membros que se intersectam, transversal e longitudinalmente, existindo vários modos de resposta, além da deformação, que afetam a resposta de flexão da viga-navio. Porém, para navios sem grandes alterações na seção transversal, a tensão de flexão longitudinal resultante da viga é muito próxima da idealizada.

Porém, além da estrutura primária, existe a estrutura local, a qual é composta por chapas, hastilhas, anteparas, longarinas, entre outros elementos, cuja deformação não tem efeito expressivo na distribuição dos esforços globais. Isso ocorre porque esses elementos possuem deformação com raios de curvatura de menor ordem de grandeza, permitindo uma análise desacoplada do fenômeno.

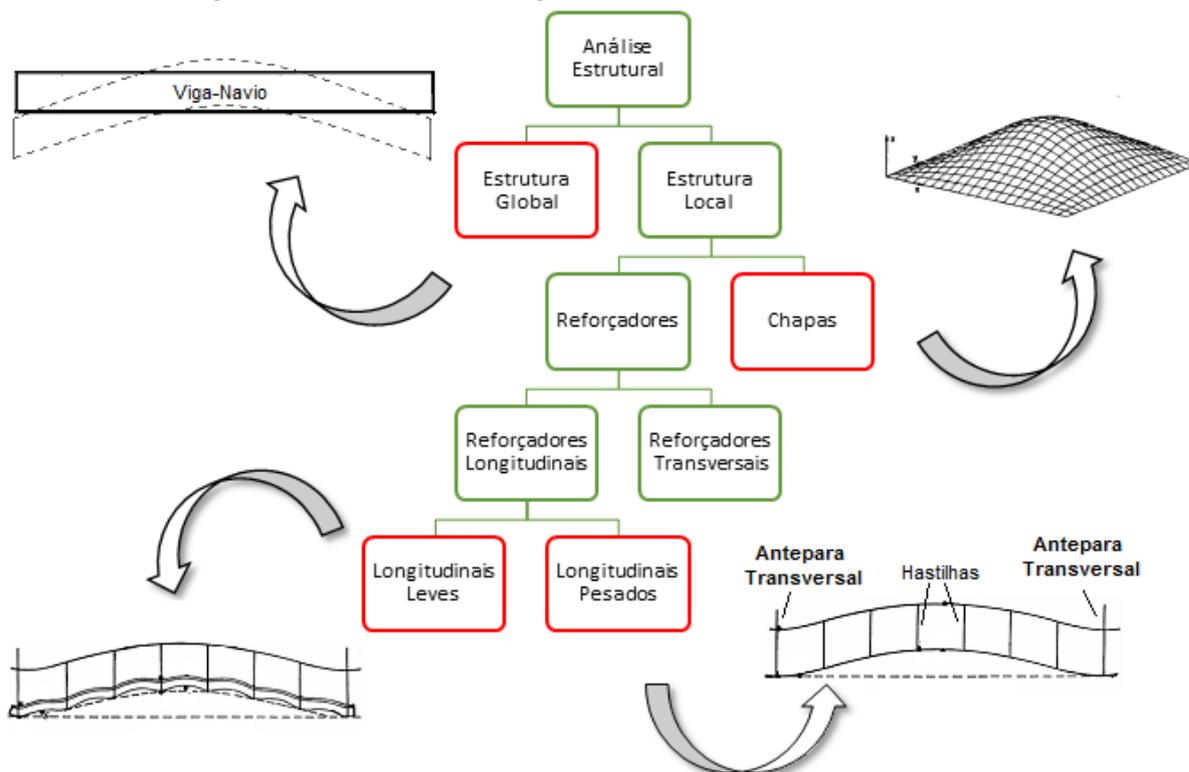
Os elementos denominados de perfis leves e pesados, os quais serão tratados posteriormente, estão sujeitos à flexão em torno do eixo Y , da mesma maneira que a viga-navio. Já as chapas fletem no eixo X e Y , deste modo, a deformação é regida pela equação:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D}$$

Estas placas são limitadas em suas quatro extremidades, possuindo assim quatro condições de contorno, as quais são utilizadas na solução da equação mostrada acima.

A separação das análises fica mais clara observando o fluxograma da Figura 6.

Figura 6 - Modelo de fluxograma de divisão da análise estrutural



Fonte: Elaborado pelo autor

Os itens destacados em vermelho serão melhor discutidos ao longo da fundamentação teórica, e implementados no desenvolvimento da ferramenta de análise no capítulo 3 do presente trabalho.

2.2 ESTRUTURA PRIMÁRIA

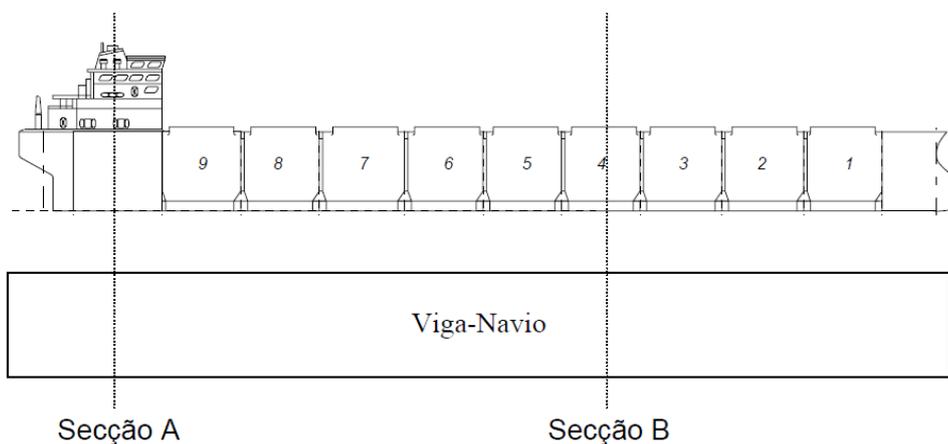
Em relação à estrutura global, em geral, navios de grande porte possuem Comprimento (L) muito maior que a Boca (B) e que o Pontal (D). Por esta razão, a Teoria de Vigas pode ser empregada para a determinação da distribuição das tensões decorrentes dos esforços globais existentes na estrutura.

A Teoria Simples de Vigas nos fornece bons resultados para navios com relação coeficientes L/B e L/D maiores que oito. Para coeficientes menores, o comportamento estrutural começa a sofrer influência da deflexão ocorrida nas outras direções (B e D), e a Teoria de Vigas passa a não mais produzir resultados coerentes com este comportamento (Tancredi, 2004).

Neste modelo de análise deve-se representar o navio como uma viga (denominada viga-navio) que possui comprimento igual ao navio analisado.

Ao longo do comprimento da embarcação, os valores das propriedades (área, inércia e módulo de elasticidade) de cada seção da viga-navio são ajustados para representar, as propriedades do navio analisado. Na Figura 7 é mostrado o processo de construção da viga-navio, destacando-se duas seções distintas. A seção A da viga navio possui as mesmas propriedades que a seção de mesma posição na embarcação original, eventualmente considerando a superestrutura. Enquanto que a seção B possui as propriedades de uma seção típica do corpo médio paralelo do navio.

Figura 7 - Viga Navio



Fonte: Tancredi (2004)

É importante ressaltar que na análise estrutural define-se a área da seção do navio como sendo aquela preenchida por um material estrutural (em geral aço ou alumínio) representada pela espessura do chapeamento e pela seção dos reforçadores longitudinais. Além disso, conforme ressalta Hughes (2010), apenas materiais contínuos por mais de $2/3$ do comprimento do navio devem ser considerados na análise da estrutura primária do navio. Elementos com comprimentos menores do que $2/3$ têm curvatura de deflexão muito menor do que a da viga-navio, não contribuindo efetivamente para a resistência longitudinal da embarcação.

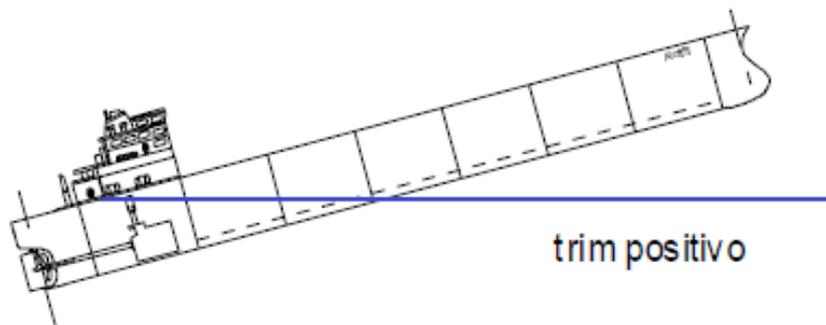
Definido o modelo estrutural da viga-navio, devem-se determinar os carregamentos globais atuantes. Para essa análise, o principal ponto a ser verificado é o equilíbrio do navio na onda. A ausência de equilíbrio acarreta em movimento do navio e não em solicitação (tensão e deformação) estrutural.

Em Mecânica dos Sólidos, uma viga que possui carregamento auto equilibrado é denominada “viga livre-livre”. Deste modo, o navio estará em equilíbrio quando duas condições forem satisfeitas. A primeira condição refere-se à relação entre peso e empuxo, de modo que o empuxo (∇) deve ser rigorosamente igual ao peso do navio (P). A segunda diz respeito à posição longitudinal do centro de gravidade (LCG) e a posição longitudinal do centro de flutuação (LCB), que devem estar localizadas no mesmo eixo vertical do navio.

Em geral, quando a primeira condição não é satisfeita, a diferença entre peso e flutuação resulta em um movimento vertical (*heave*), modificando o calado médio da embarcação. Já uma diferença entre LCB e LCG resulta em um movimento angular (*pitch*) modificando o ângulo de trim do navio.

Para navios convencionais, como um petroleiro, a região da popa costuma ser mais pesada, por consequência da localização da praça de máquinas e da superestrutura, e por esta razão costuma-se adotar por convenção trim com valores positivos para estas embarcações (Figura 5).

Figura 8 - Convenção para trim positivo



Fonte: Tancredi (2004)

Com a modificação do trim, o calado que era considerado constante e igual ao calado médio ao longo do comprimento, deve ser corrigido ao longo da embarcação. Deste modo, a distribuição de flutuação ao longo do comprimento é modificada, alterando também o empuxo e possivelmente fazendo com que a primeira condição de equilíbrio não seja mais satisfeita.

Assim, conforme descrito por (Tancredi, 2004), o equilíbrio de um navio em ondas é um processo iterativo, mas de rápida convergência.

Levantadas as curvas de peso $p(x)$ e flutuação $b(x)$ ao longo da viga-navio, deve-se verificar o equilíbrio ($B = P$). Esta verificação pode ser feita de modo contínuo, ou seja, por integração, ou em intervalos discretos. Mas na prática este processo é sempre feito por integração numérica (Tancredi, 2004).

Verificado o equilíbrio vertical do navio, deve-se calcular o momento do peso para determinação do LCG e o momento de flutuação para determinação do LCB. Pode-se verificar então a segunda condição que se refere à igualdade entre a posição longitudinal do centro de gravidade e a posição longitudinal do centro de flutuação.

Para modelar as ondas do mar, em engenharia de estruturas, o modelo mais comumente utilizado é a representação de ondas regulares utilizando uma função senoidal.

A passagem da onda pelo casco da embarcação ocasiona uma modificação na distribuição do campo de pressões, modificando a distribuição dos esforços ao longo da viga navio. Entre todas as possíveis configurações e posicionamentos de ondas ao longo do casco do navio, existem duas configurações críticas: a onda de Tosamento e a onda de Alquebramento. Na primeira configuração a secção localizada a meia nau encontra-se no vale de uma onda de comprimento igual ao comprimento do navio, enquanto na segunda a secção à meia nau está na crista dessa mesma onda.

Figura 9 - Carregamento devido à ondas de Alquebramento e Tosamento



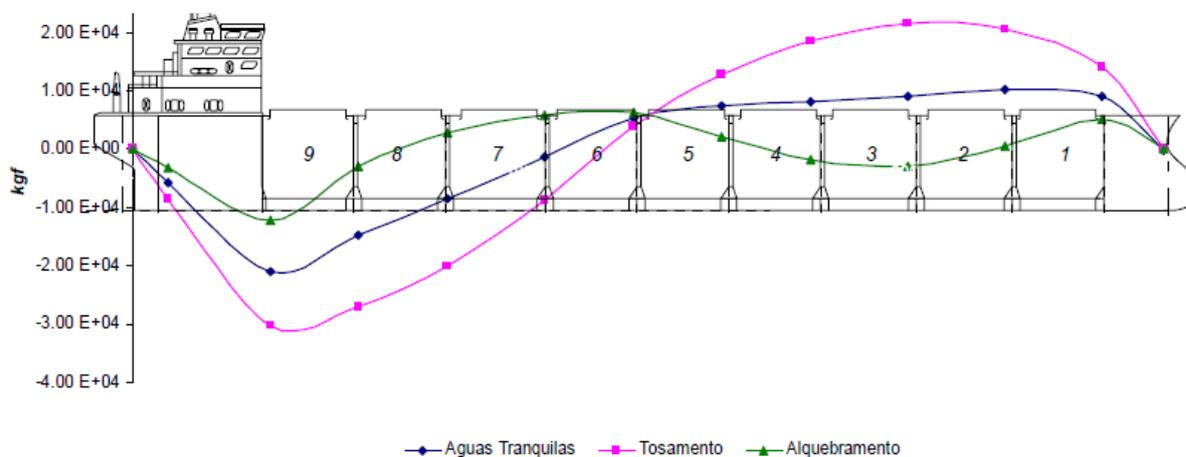
Fonte: Augusto (2004)

Desta forma, podemos reescrever a função que descreve o calado ao longo do comprimento do navio com a correção devido ao trim e à forma de onda, tanto para Tosamento, quanto para Alquebramento. Sendo importante ressaltar que a onda de Alquebramento pode ser modelada através de uma mudança de fase em relação à onda de Tosamento.

Com o equilíbrio do navio determinado, seja para águas tranquilas ou para ondas, pode-se então levantar a curva de carga ao longo da embarcação. Esta curva é obtida através da subtração da curva de flutuação da curva de pesos do navio, a qual representa a solicitação auto equilibrado que atua sobre a viga-navio.

A partir da curva de carga é possível obter-se a distribuição das Forças Cortantes através da integração da curva de carga ao longo da viga-navio, conforme mostrado na Figura 10.

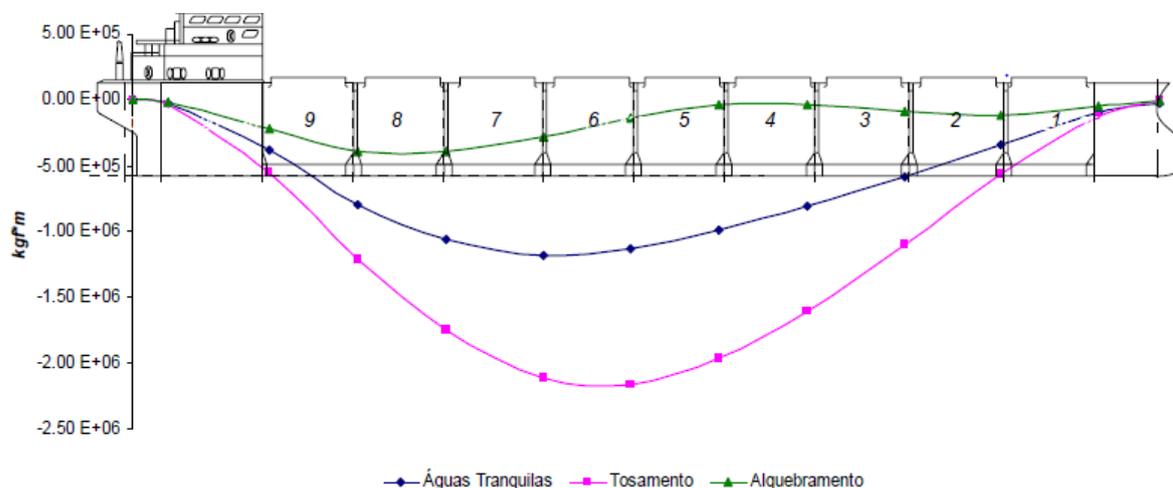
Figura 10 - Exemplo do diagrama de Força Cortante ao longo da viga-navio



Fonte: Tancredi (2004)

Integrando a curva de Forças Cortantes obtém-se a curva de Momento Fletor, exemplificada na Figura 11.

Figura 11 - Exemplo de diagrama do Momento Fletor ao longo da viga-navio



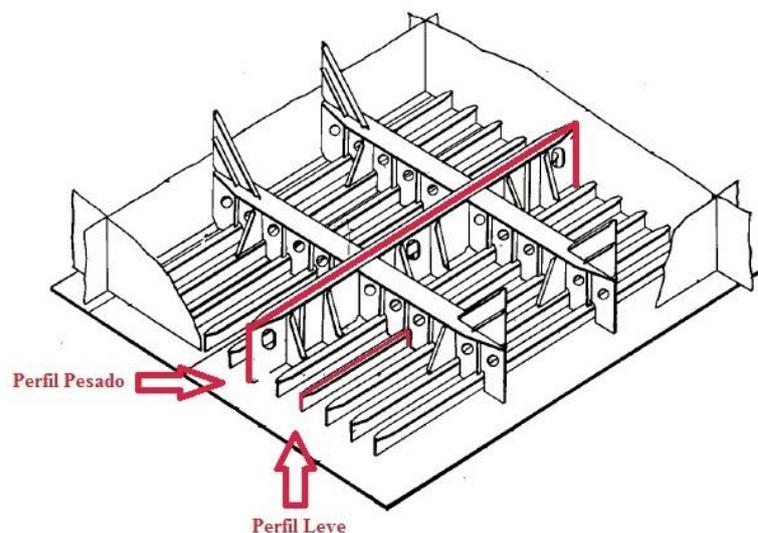
Fonte: Tancredi (2004)

As curvas de Força Cortante e Momento Fletor representam os esforços globais ao longo da viga-navio. Tais curvas permitem determinar as secções submetidas ao máximo momento fletor (em geral próxima à meia nau) e máxima força cortante (geralmente próxima a $\frac{1}{4}$ do comprimento). Porém, nada garante que em um destes pontos encontra-se a máxima sollicitação global, resultante da composição das curvas de força cortante e momento fletor. A localização desta máxima sollicitação não é facilmente determinada, por esta razão, por conservadorismo, considera-se que todas as secções analisadas tenham, simultaneamente, um valor de momento fletor e força cortante similares aos valores extremos calculados no equilíbrio da viga navio.

2.3 ESTRUTURA SECUNDÁRIA

A estrutura secundária de uma embarcação consiste nos reforçadores longitudinais que enrijecem o chapeamento que reveste o casco. Esses reforçadores podem ser classificados em reforçadores leves e reforçadores pesados, com base na razão de rigidez flexional que esses elementos apresentam em relação à rigidez flexional dos anéis transversais. São considerados reforçadores pesados àqueles que têm rigidez flexional próxima à rigidez flexional dos anéis transversais, enquanto que elementos com rigidez flexional com menor ordem de grandeza são considerados reforçadores leves. Esse típico arranjo pode ser visto na Figura 12, onde se representa um painel estrutural localizado entre duas anteparas transversais, destacando-se os reforçadores leves e pesados.

Figura 12 - Representação de perfis leves e pesados



Fonte: Augusto (2004)

Os perfis leves limitam as dimensões das unidades de chapeamento, enrijecendo-as e absorvendo a carga transferida do casco (estrutura terciária) para os reforçadores (estrutura secundária). Os perfis pesados servem de apoio aos perfis leves, recebendo a carga transmitida pelas unidades de chapeamento.

Assim, como foi considerado na modelagem da estrutura primária, os reforçadores longitudinais possuem comprimento muito maior que a largura e a altura, permitindo que sejam utilizados modelos de viga na determinação do campo de tensões decorrente das deformações locais.

Para a análise da secundária, primeiramente determina-se o vão livre de cada reforçador. No perfil leve, esse vão livre é a distância entre duas cavernas (L_h), enquanto que no caso de perfis pesados, o vão livre é a distância entre duas anteparas (L_a).

Diferentemente do modelo de viga livre-livre utilizado na análise da estrutura primária, os reforçadores longitudinais encontram-se vinculados ao restante da estrutura do navio. Nesse caso, devem-se arbitrar as condições de contorno aplicadas nas extremidades dos perfis longitudinais. A estimativa de rigidez à rotação nestas interseções é de difícil determinação, por possuir dependência direta com a geometria do perfil e do carregamento nos porões adjacentes. Deste modo, visando a simplificação de cálculos, pode-se arbitrar as condições como engastamento ou apoio simples. No engastamento considera-se a restrição total ao movimento de rotação, enquanto no apoio simples a restrição é nula à rotação.

Tradicionalmente, considera-se que compartimentos adjacentes tenham carregamentos similares, ocasionando planos de simetria que impedem a rotação da secção 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). Essa condição costuma ser melhor modelada quando se considera um vínculo do tipo engaste.

A rigidez à flexão dos anéis transversais é muitas vezes superior à rigidez à flexão das longitudinais leves, de modo que, os anéis servem de apoio, praticamente sem deslocamento, para os longitudinais leves.

No caso da interação dos anéis com os longitudinais pesados, esta hipótese não é mais válida, pelo fato de os dois tipos de elementos possuírem dimensões e rigidez à flexão muito próximos, tornando difícil distinguir quem serve de apoio para quem. Pode-se admitir que o anel transversal se comporta como um apoio elástico para os reforçadores longitudinais pesados.

Depois se determinam as larguras de carga associadas a cada reforçador longitudinal analisado. Os perfis leves suportam a carga feita pelo chapeamento solidários à eles. Embora

existam diferentes maneiras para se estimar essa largura de carga, uma maneira simples e conservadora, consiste em se considerar que essa largura corresponde à distância entre dois perfis leves, repartindo o carregamento igualmente entre dois reforçadores. Por exemplo, se a distância entre perfis leves é de 1 metro, a largura de carga para cada perfil leve será de 1 metro também, considerando 50 cm de cada lado do perfil. A mesma análise pode ser feita de maneira análoga para o caso de reforçadores pesados.

A Teoria Simples de Viga considera que as secções permanecem planas e ortogonais a linha neutra da viga. No entanto, isso somente é verdade para vigas maciças, onde não existe uma clara diferenciação entre alma e flange. Reforçadores longitudinais tradicionalmente apresentam secções ‘T’, ‘L’ ou ‘Bulbo’; exigindo que a distribuição da tensão secundária seja corrigida para considerar o efeito do empenamento da secção.

Esse efeito é resultante de cargas transversais na alma da viga, que, quando curvadas, alongam e encurtam os extremos superior e inferior da viga, induzindo a deformação no flange resultante do fluxo cisalhante ao longo da secção, usualmente denominado “*shear lag*”.

Tradicionalmente, utiliza-se o modelo de chapa colaborante proposto por H. Schade (1951) e W. Muckle (1967), apud Hughes (1983), para determinar a correção nos campos de tensões secundárias devido ao efeito “*shear lag*”. Essa correção é feita considerando que apenas uma porção do chapeamento do casco solidário ao perfil longitudinal seja efetiva na flexão. Essa parcela do chapeamento que efetivamente enrijece o reforçador (atuando como uma segunda flange) é denominada chapa colaborante (c).

Vale ressaltar, que para perfis pesados, a chapa colaborante pode incluir perfis leves, fazendo com que os mesmo tenham que ser considerados nos cálculos de rigidez do perfil pesado, formando o que usualmente é denominado “painel colaborante”.

Conhecidos os modelos de análise, de vínculo, de carregamento e a secção efetivamente resistente, os campos de tensão secundária podem ser determinados analiticamente por meio da clássica equação:

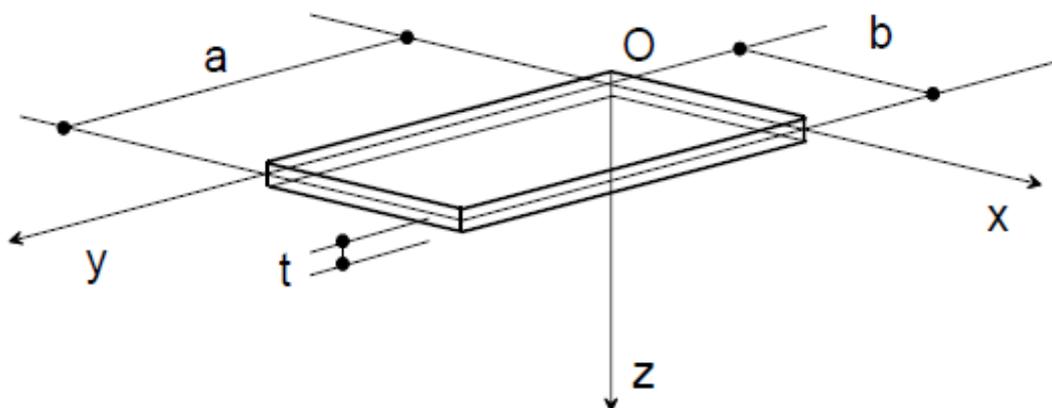
$$\sigma_{longitudinal} = \frac{M * (z - Z_{LN})}{I_{LN}}$$

Onde, z é a distância medida em relação posição vertical na linha neutra da seção (Z_{LN}), M é o momento fletor atuante na secção do perfil e I_{LN} o momento de inércia da secção do perfil.

2.4 ESTRUTURA TERCIÁRIA

A estrutura terciária corresponde a análise da unidade de chapeamento contida entre 2 reforçadores transversais e 2 reforçadores longitudinais, garantindo a estanqueidade do navio. Abaixo segue a imagem exemplificando um elemento de dimensões a e b .

Figura 13 - Exemplo de placa e sistema de referência



Fonte: Augusto (2007)

Existem dois tipos de cavernamento, longitudinal e transversal. O cavernamento é longitudinal quando o maior lado da unidade de chapeamento é paralela ao eixo proa-popa. Quando o lado maior está na direção ortogonal ao eixo proa-popa, diz-se que o cavernamento é transversal.

Como discutido na sessão de desacoplamento da análise estrutural da embarcação, a flexão de placas geralmente ocorre ao longo de duas direções. Deste modo, algumas outras hipóteses simplificadoras são utilizadas parcial ou totalmente nas teorias mais usuais de placas planas. Considera-se que o material permanece elástico; o plano de meia espessura não se deforma pela flexão; na expressão dos raios de curvatura, pode-se desprezar a contribuição da derivada primeira, ou seja, o raio da curva no plano médio pode ser desprezado; nas deformações de flexão, as contribuições σ_z , τ_{xz} e τ_{yz} podem ser desprezadas.

O módulo de rigidez à flexão de placas pode ser definido como:

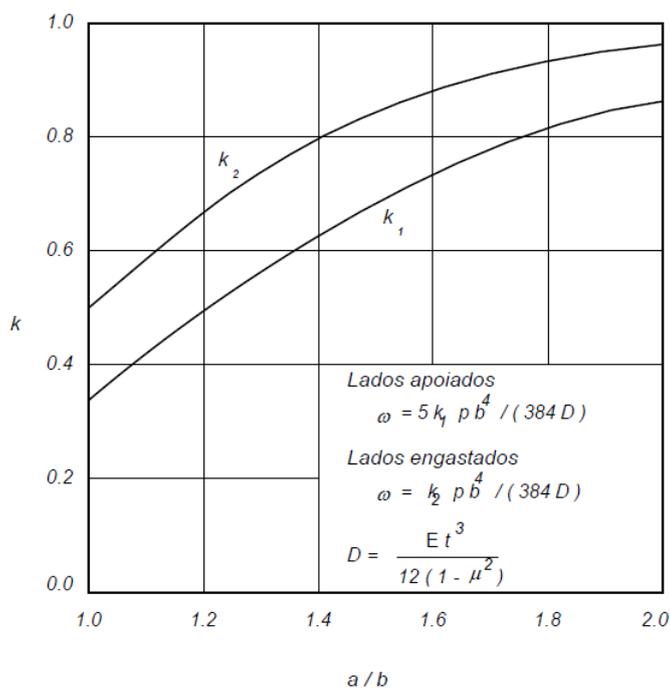
$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)}$$

Onde E é o módulo de elasticidade, t a espessura da placa e ν o coeficiente de Poisson do material. Deste modo, quanto maior o módulo de elasticidade e a espessura da placa, menor a deflexão da placa sujeita a flexão. Baseado na quarta hipótese assumida e na equação do módulo de rigidez à flexão chega-se à equação de flexão em placas, cuja dedução pode ser vista vastamente em literaturas sobre mecânica dos sólidos.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D}$$

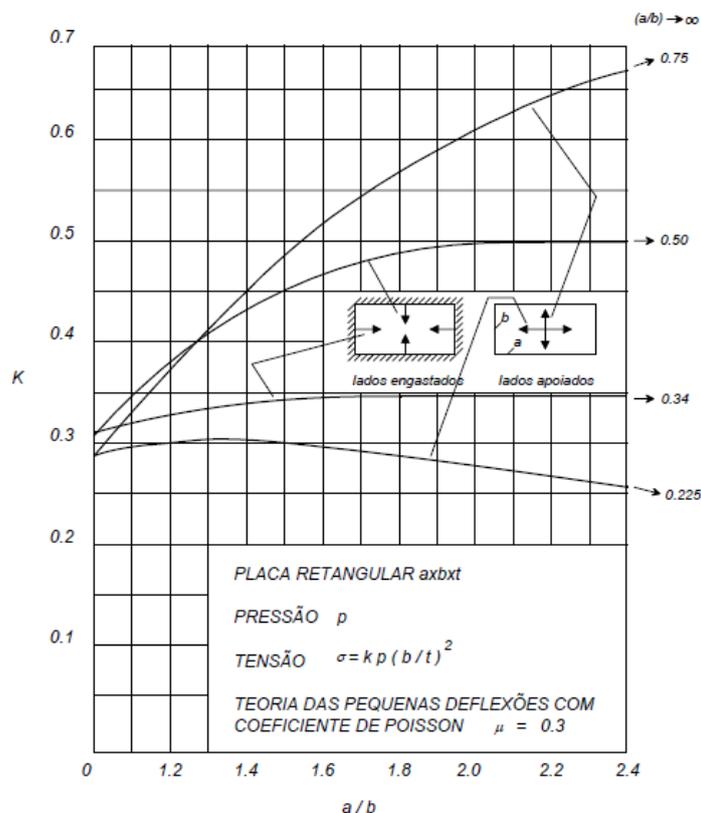
Para uso em engenharia, a solução em forma de gráfico é mais conveniente e, os gráficos apresentados nas figuras 14 e 15 fornecem a solução, em termos de tensões e deflexões, para os dois casos mais utilizados em engenharia naval e oceânica (Augusto, 2007).

Figura 14 - Deflexão máxima em placas retangulares sob pressão uniforme



Fonte: Augusto (2007)

Figura 15 - Tensões em placas retangulares sob pressão uniforme

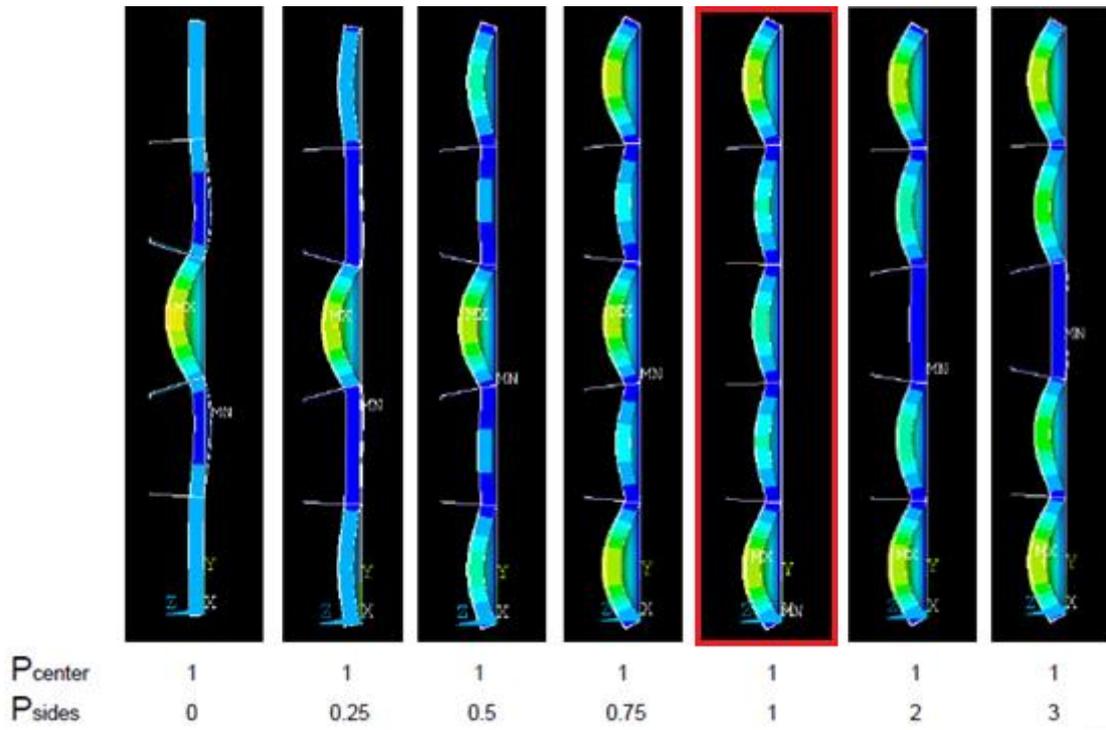


Fonte: Augusto (2007)

A solução de placas simplesmente apoiadas, foi desenvolvida por Navier (1820), apud Augusto (2007), admitindo que o carregamento possa ser representado por uma série de Fourier, porém tem uma aplicação prática restrita.

Comumente em engenharia naval, são utilizados os modelos de placas com lados engastados devido à simetria de carregamento, cuja hipótese foi discutida na secção anterior. Quando se tem uma única placa engastada sob pressão, os engastes tendem a rotacionar juntamente com a placa. Conforme a pressão é distribuída simetricamente entre placas adjacentes, há a compensação de rotação de uma placa na outra, fazendo com que os engastes permaneçam fixos. Na figura 16 é exemplificada esta situação, onde um painel composto por placas tem a pressão aplicada inicialmente no centro, ocorrendo a rotação dos engastes. Em seguida, a pressão é distribuída para as demais placas, até que a relação de pressão na placa central e nas placas laterais seja 1, como destacado em vermelho. Quando isto acontece, não há mais a rotação, e o vínculo aproxima-se do engaste perfeito.

Figura 16 - Distribuições de pressão em placas engastadas



Fonte: Pegoraro, Silva, Tancredi (2015)

DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE EMBARCAÇÕES

Nesta seção é apresentada a planilha desenvolvida no programa Microsoft Excel, a qual contém os equacionamentos referentes às distribuições de tensões em estruturas navais, primárias, secundárias e terciárias, e seus respectivos resultados, através da fundamentação teórica apresentada no capítulo 3..

A ferramenta Análise Estrutural de Embarcações Convencionais Feitas em Aço é organizada em cinco diferentes abas: Estrutura Primária, Estrutura Secundária Pesada, Estrutura Secundária Leve, Estrutura Terciária e aba Principal. Os campos de entrada de dados estão todos na aba Principal, de modo que o usuário utilizará as demais abas apenas para verificação de resultados. As unidades estão pré-estabelecidas, cabendo ao usuário verificar se os dados inseridos são coerentes. Tais unidades foram selecionadas de modo que as respostas finais de maior interesse (tensões principais) se apresentem na unidade comumente usada em engenharia, MPa.

3.1 ABA ESTRUTURA PRIMÁRIA

A aba estrutura primária apresenta Dados das Tensões Primárias, Tensão Primária, diferentes modelos de cálculo do Momento Fletor e das propriedades da Seção Mestra, interpolações e o perfil de onda considerado, como pode ser observado no exemplo apresentado na figura 17.

São apresentadas na região “Dados das Tensões Primárias”: o Coeficiente de onda (C_W) e os valores de Momentos Fletores (M) de tosamento e alquebramento, considerando para águas calmas e a ação de ondas de proa, calculados a partir da norma *Det Norske Veritas (DNV, 2015) Rules for Classification of Ships*, visto que esta, juntamente com a *American Bureau of Shipping (ABS)*, são as classificadoras comumente utilizadas em Engenharia Naval. Porém, a ABS não estabelece normas de momento fletor em alquebramento e tosamento para águas calmas, o que neste trabalho, são valores de interesse para que se possa determinar situações críticas.

Deste modo, a norma DNV é dividida para embarcações com comprimento superior e inferior à 100 metros, deste modo, há condições “se” que permitem utilizar da equação correta dependendo do comprimento da embarcação fornecida pelo usuário.

Na região “Diferentes Momentos Fletores” é realizada a soma dos momentos fletores em águas calmas, com os momentos fletores em onda, nas diferentes combinações possíveis de carregamento e onda, visto que a embarcação tende a tosar ou alquebrar naturalmente, ou seja, sem considerar a ação do mar.

Dependendo da distribuição da carga a bordo, as embarcações podem tosar ou alquebrar, logo, deve-se considerar ambas as possibilidades em águas calmas. Quando se considera a ação das ondas sobre a embarcação, somam-se os momentos fletores em águas calmas com os momentos fletores em ondas. O momento fletor usado na análise é escolhido pelo usuário na aba Principal, podendo ainda, ser um momento fletor fornecido diretamente pelo próprio usuário.

Cabe ao usuário determinar, também na aba Principal, se o Módulo de Seção (Z_0) utilizado no cálculo das tensões será o calculado pela norma DNV ou o fornecido pelo próprio usuário através de um valor de Momento de Inércia (I) e da Posição vertical da linha neutra (z). Estes dados são apresentados na região “Diferentes Propriedades da Seção”.

Na região “Intepolação X”, é considerado que nas extremidades na embarcação os momentos fletores são nulos, e que o máximo valor de momento fletor encontra-se à meia-nau, permitindo que a tensão primária possa ser estimada a partir de uma equação quadrática. A aproximação quadrática da curva de momento fletor obviamente não é real, mas fornece uma primeira aproximação coerente e, em geral, conservadora, para a distribuição do momento fletor ao longo do comprimento do navio.

O resultado de tensão em X apresentado referem-se à interpolação na posição longitudinal escolhida pelo usuário na aba Principal.

Com os resultados de tensão em X no fundo e no convés, é então realizada a interpolação no eixo Z, medido em função da quilha na direção vertical, através de uma função linear, coerente com a teoria de vigas simples. Já a interpolação em Y, medido em função da quilha na direção da boca, não se faz necessária, visto que, na hipótese de vigas simples, a tensão não varia ao longo do eixo transversal.

Conforme as coordenadas fornecidas pelo usuário na aba Principal, as tensões primárias interpoladas são apresentadas. Na direção longitudinal esta interpolação é realizada considerando-se $Z = Y = 0$. A tensão primária na direção vertical, Z, considera $Y = 0$, enquanto a tensão transversal, Y, não varia ao longo do eixo, sendo igual à tensão em Z.

Esta aba ainda calcula os valores relativos ao perfil de ondas em alquebramento ou tosamento, dependendo do tipo de onda estudado. Sendo modelada pelas seguintes equações, para tosamento e alquebramento, respectivamente:

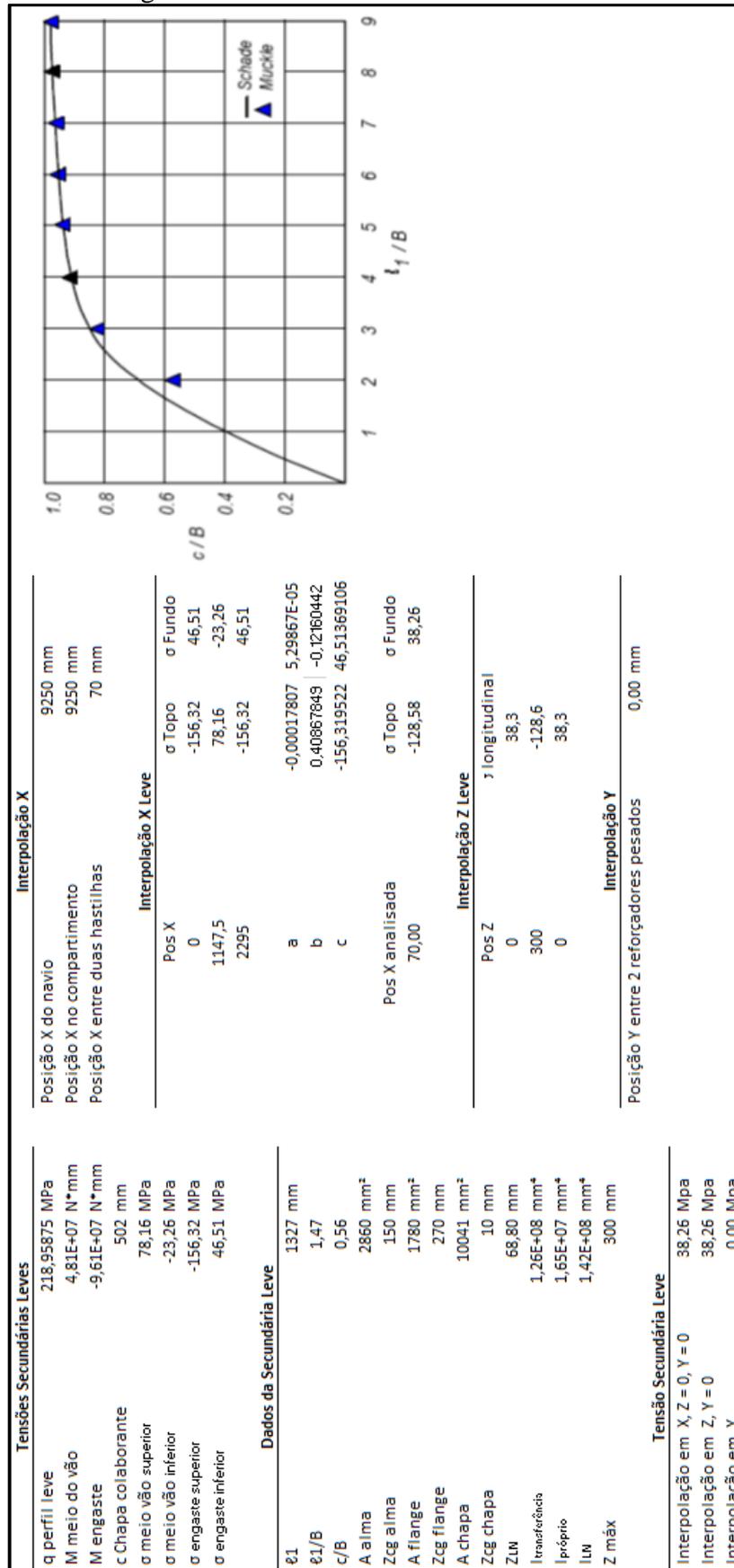
$$y_t = T + \frac{L}{40} * \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right)$$
$$y_a = T - \frac{L}{40} * \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right)$$

É importante observar que esse modelo considera que uma onda regular se comporta como uma função senoidal e que a amplitude da onda é de aproximadamente 2.5% do comprimento da onda. Esse modelo, embora simplificado, é bastante coerente com os resultados experimentais, sendo constantemente empregado em análises simplificadas.

3.2 ABAS ESTRUTURA SECUNDÁRIA PESADA E ESTRUTURA SECUNDÁRIA LEVE

As duas abas funcionam de forma quase idênticas, senão pelas dimensões que diferenciam a estrutura secundária pesada da leve, pela posição longitudinal do ponto de análise e pela interpolação das tensões no eixo Y. A figura 18 exemplifica a aba Estrutura Secundária Pesada.

Figura 18 - Aba Estrutura Secundária Pesada



Fonte: Elaborado pelo autor

Com os dados de entrada inseridos na aba Principal, o valor da distribuição de carga linear é determinado, para o perfil leve utilizando a Distância entre Perfis Longitudinais Leves (Bl) e para o perfil pesado a Distância entre Perfis Longitudinais Pesados (Bp), a partir da equação:

$$q = p * B$$

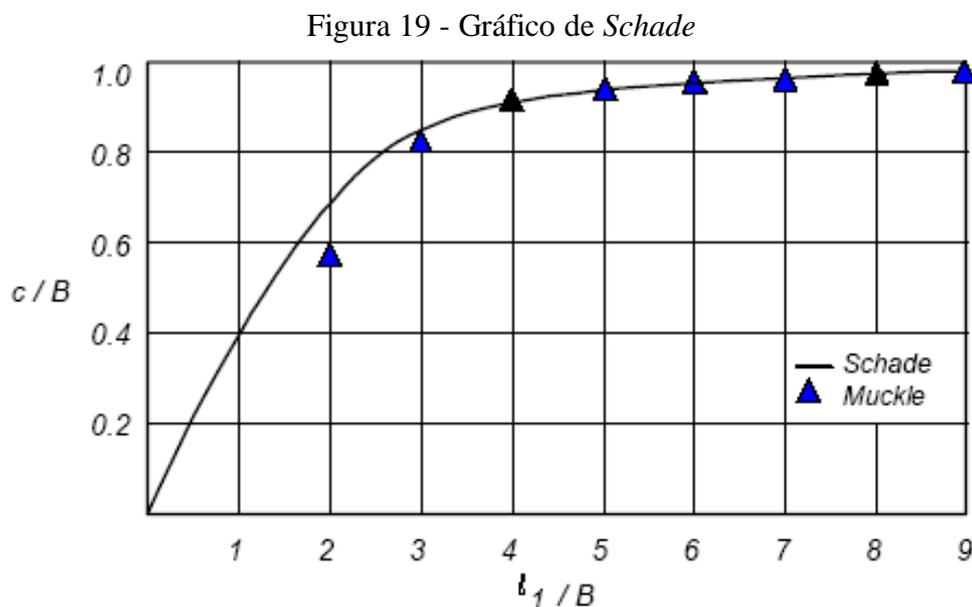
A partir da distribuição de carga para os dois perfis, pode-se determinar o Momento Fletor no meio do vão, utilizando Lh para o perfil leve e La para perfil pesado, a partir da equação:

$$M_v = \frac{q * L^2}{24}$$

O mesmo é feito para o Momento Fletor no engaste:

$$M_e = \frac{q * L^2}{12}$$

A dimensão da Chapa Colaborante c pode ser determinada utilizando-se o estudo de Schade (1951), sintetizado na figura 19:



Fonte: Schade (1951)

Determina-se primeiramente o coeficiente l_1 a partir da distância entre os perfis.

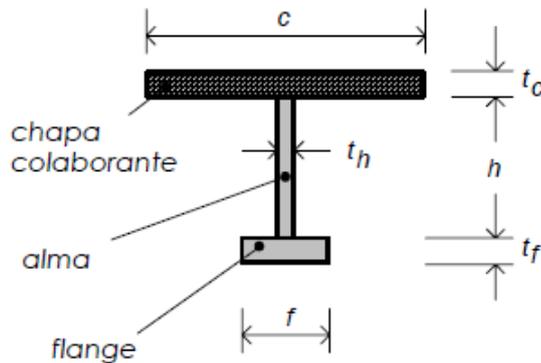
$$l_1 = 0,578 * L$$

O gráfico presente na figura 19 pode ser aproximado pela equação de quinto grau abaixo, para que a partir da relação ℓ_1/B seja possível chegar ao valor da relação c/B , onde B é B_l para os perfis leves e B_p para os perfis pesados.

$$\frac{c}{B} = -0,00009 * \frac{\ell_1^5}{B} + 0,0018 * \frac{\ell_1^4}{B} - 0,007 * \frac{\ell_1^3}{B} - 0,0547 * \frac{\ell_1^2}{B} + 0,47 * \frac{\ell_1}{B} - 0,0021$$

Multiplicando a relação c/B por B determina-se o tamanho da chapa colaborante c , em milímetros, o qual é utilizado no cálculo das propriedades da seção formada pela chapa colaborante e os perfis, exemplificada na figura 20:

Figura 20 - Exemplo de seção formada pela chapa colaborante e perfil leve



Fonte: Augusto (2004)

Para a determinação do momento de inércia dos perfis leves e pesados, calcula-se as áreas da alma, da flange e da chapa colaborante, e em seguida a posição vertical do centro de gravidade de cada elemento, como mostrado na tabela 1:

Elemento	Área	Posição Vertical do Centro de Gravidade (Z)
Alma	$h * t_h$	$t_f + \frac{h}{2}$
Flange	$f * t_f$	$t_f + h + \frac{t}{2}$
Chapa	$c * t$	$\frac{t}{2}$

Tabela 1: Equações das Áreas e Posições Verticais de Centro de Gravidade

Com as posições verticais do centro de gravidade de cada elemento e as áreas determinadas, pode-se então calcular a posição vertical na linha neutra da seção completa:

$$Z_{LN} = \frac{\sum_1^3 (A_1 * Z_{cg}^1)}{\sum_1^3 A_1}$$

Em seguida, obtém-se o Momento de Inércia da Seção (I_{LN}), a qual pode ser dividida em Momento de Inércia Próprio (I_p) e Momento de Inércia de Transferência (I_t):

$$\sum_1^3 I_p = \frac{t_h * h^3 + f * t_f^3 + c * t_c^3}{12}$$

$$\sum_1^3 I_t = A_{alma} * (Z_{LN} - Z_{alma})^2 + A_{flange} * (Z_{LN} - Z_{flange})^2 + A_{chapa} * (Z_{LN} - Z_{chapa})^2$$

$$I_{LN} = \sum_1^3 (I_{próprio} + I_{transferência})$$

A partir deste ponto, pode-se obter as quatro tensões que são apresentadas como resposta, tensões no meio do vão inferior e superior e as tensões no engaste inferior e superior, a partir da Teoria de Viga Simples:

$$\sigma = \frac{M * (z_m - Z_{LN})}{I_{LN}}$$

Sendo z_m a distância entre o Z_{LN} e as extremidades mais distâtes do perfil. Onde M é o momento fletor, sendo utilizado M_v para determinação da tensão no meio do vão e M_e para a tensão no engaste.

Lembrando que todas as equações apresentadas são válidas, tanto para o perfil pesado, quanto para o perfil leve, diferenciando-se apenas pelas dimensões dos reforçadores e pelos vão livres considerados.

Como o valor inserido pelo usuário é arbitrário, é necessário que as tensões sejam interpoladas de forma que as respostas apresentadas correspondam ao ponto de interesse no compartimento e entre duas hatilhas. Deste modo na aba Estrutura Secundária Pesada, é apresentada a posição X ao longo do navio e ao longo do compartimento. Já para a, aba Estrutura Secundária Leve, a posição X é apresentada ao longo do navio, do compartimento e, por fim, entre duas hastilhas.

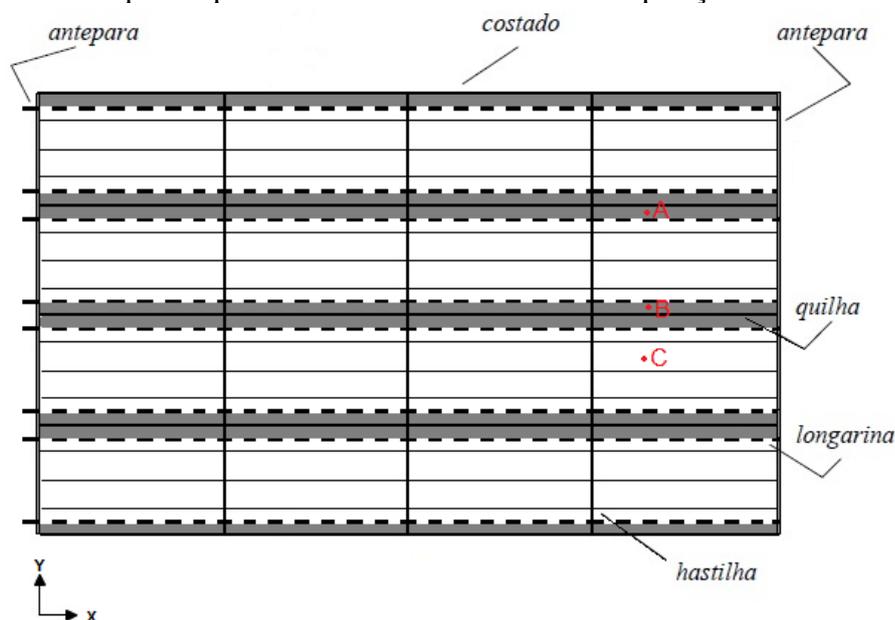
As tensões são, novamente, interpoladas longitudinalmente por equações quadráticas, considerando a tensão mínima no engaste e máxima no centro dos perfis. É apresentada a tensão interpolada em X para o ponto de interesse inserido pelo usuário na aba Principal. A partir da

tensão em X no fundo e no topo dos perfis, a tensão é interpolada linearmente na Posição Vertical no Painel (ζ), a qual seria equivalente à posição vertical Z da estrutura primária. Sendo importante reassaltar que esta diferenciação de posições no eixo vertical, Z para estrutura primária e ζ para demais estruturas, é utilizada para que o usuário possa realizar a análise das estruturas global e local separadamente.

Para a interpolação da tensão longitudinal X na direção Y, independentemente do ponto de análise, a tensão na estrutura secundária pesada é igual a tensão interpolada em ζ . Já para a estrutura secundária leve, é necessário verificar se o ponto que está sendo analisado está mais próximo à estrutura secundária pesada ou leve, de modo que, se estiver mais próxima da pesada, a tensão longitudinal X interpolada em Y (σ_Y), será igual a zero, senão, ela recebe o mesmo valor que a tensão longitudinal em X interpolada em ζ (σ_ζ).

Na figura 21, os pontos A e B exemplificam pontos de análise que estão mais próximos de secundárias pesadas, de modo que a σ_Y para secundária leve será zero. O ponto C exemplifica um ponto que encontra-se entre duas secundárias leves, tendo sua σ_Y igual a σ_ζ .

Figura 21 - Exemplo de pontos localizados em diferentes posições no eixo transversal



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 ABA ESTRUTURA TERCIÁRIA

A aba Estrutura Terciária apresenta os Dados da Estrutura Terciária, a Solução Gráfica, as Tensões Terciárias na Logitudinal, a Distribuição de Tensões e as Interpolações, como mostrado na figura 22.

A dimensão das chapas que compõem a estrutura terciária é pré-determinada a partir da distância entre hastilhas, distância entre perfis leves e espessura do chapeamento que são inseridas na aba Principal. Deste modo, primeiramente é apresentada as dimensões a e b , e, por conseguinte, a razão a/b , para que então seja utilizado o gráfico de Tensões em placas retangulares sob pressão uniforme. Foram aproximadas equações para as quatro curvas do gráfico, as quais fornecem os valores de ka e kb para placas com lados engastados e apoiados, respectivamente:

$$ka = -0,002\left(\frac{a}{b}\right)^5 + 0,0272\left(\frac{a}{b}\right)^4 - 0,1143\left(\frac{a}{b}\right)^3 + 0,1025\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0,314\left(\frac{a}{b}\right)$$

$$kb = -0,0014\left(\frac{a}{b}\right)^6 + 0,0224\left(\frac{a}{b}\right)^5 - 0,1459\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 0,4848\left(\frac{a}{b}\right)^3 - 0,8757\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0,8341\left(\frac{a}{b}\right)$$

$$ka = -0,0019\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 0,0276\left(\frac{a}{b}\right)^3 - 0,1332\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0,2254\left(\frac{a}{b}\right)$$

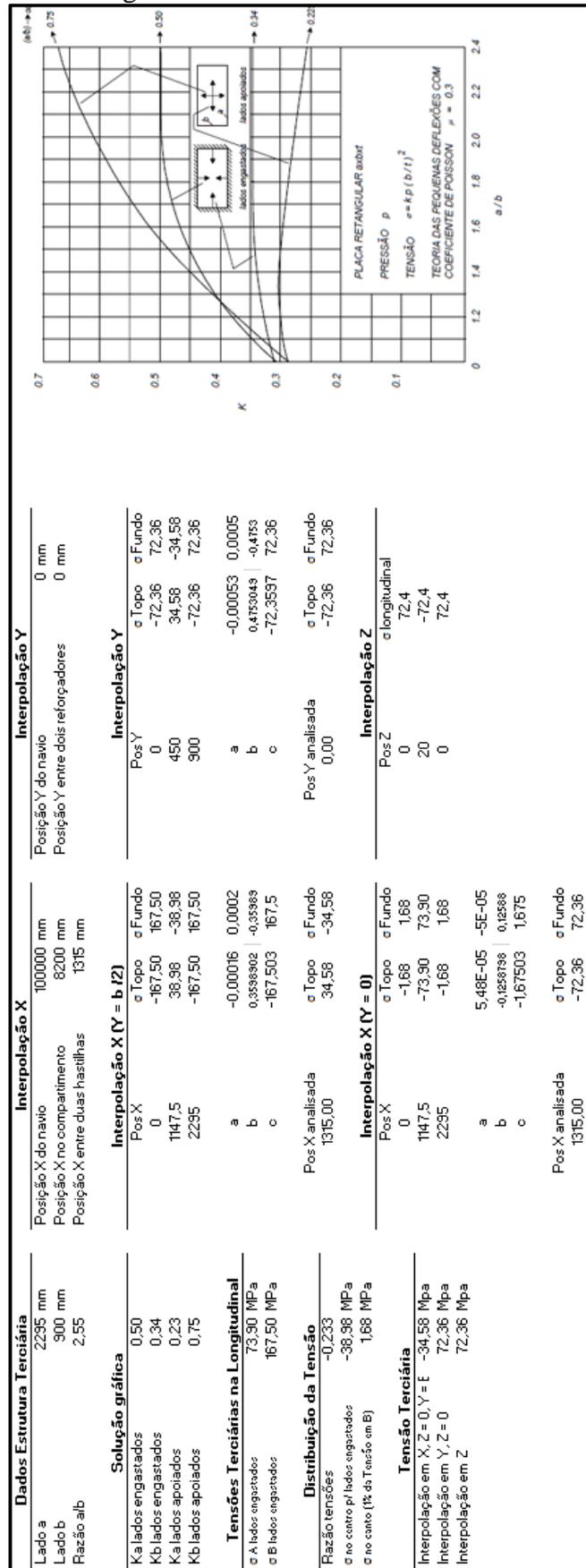
$$kb = -0,0025\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 0,0472\left(\frac{a}{b}\right)^3 - 0,3306\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 1,0312\left(\frac{a}{b}\right) - 0,4639$$

Estas equações são válidas para valores de $a/b < 2,4$, de modo que acima deste valor, considera-se constate os valores de ka e kb .

A partir dos parâmetros adimensionais, determina-se a tensão nos dois lados da placa, tanto engastada, quanto apoiada, baseando-se na Teoria de Pequenas Deflexões, com coeficiente de Poisson (μ) de 0,3:

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

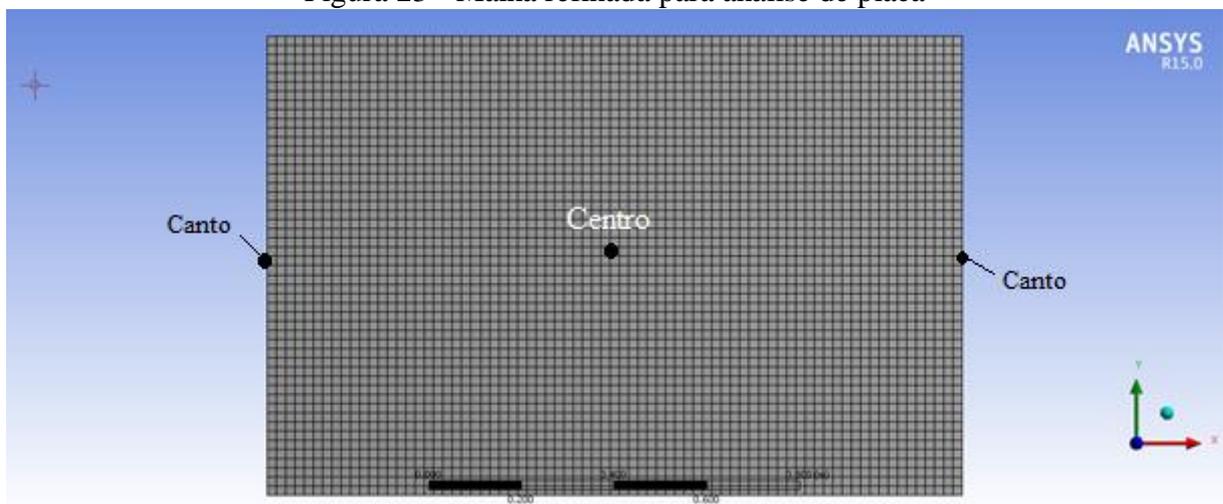
Figura 22 - Aba Estrutura Terciária



Fonte: Elaborado pelo autor

Para que a interpolação das tensões na direção longitudinal e transversal sejam realizadas, é necessário que se tenha a tensão no centro da placa. Porém, o modelo analítico permite que apenas as tensões nos lados da placa sejam determinadas. Deste modo, foram realizadas simulações numéricas através do software *ANSYS*. A malha foi refinada para até uma escala de 0,02 m, de modo que a resposta final não apresentasse distorções indesejadas. A figura 23 mostra a malha refinada:

Figura 23 - Malha refinada para análise de placa



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesta análise, considerou-se que os lados estão engastados, visto que em engenharia naval é o modelo comumente usado, como ressaltado na fundamentação teórica. Variou-se a direção longitudinal da placa, a espessura e a pressão aplicada, a fim de verificar o comportamento da distribuição de tensões. Os modelos de placas e pressões testados são mostrados na tabela 2:

a (m)	b (m)	a/b	t (m)	p (N/m ²)	Tensão (MPa)	Tensão Canto (Mpa)	$\sigma_{c/c} = \frac{\sigma_{centro}}{\sigma_{canto}}$
					Centro da Placa	(Centro aresta b)	
1	1	1	0,02	1	342	-772	-0,443
1,2	1	1,2	0,02	1	341	-833	-0,409
1,3	1	1,3	0,02	1	330	-847	-0,390
1,4	1	1,4	0,02	1	317	-854	-0,371
1,5	1	1,5	0,02	1	301	-857	-0,351
1,75	1	1,75	0,02	1	263	-858	-0,307
2	1	2	0,02	1	236	-857	-0,275
1	1	1	0,01	1	1367	-3092	-0,442
1,5	1	1,5	0,01	1	1210	-3433	-0,352
2	1	2	0,01	1	937	-3430	-0,273
1	1	1	0,04	1	86	-198	-0,434
1,5	1	1,5	0,04	1	76	-220	-0,345
2	1	2	0,04	1	59	-220	-0,268
1	1	1	0,04	50	4289	-9903	-0,433
1,5	1	1,5	0,04	50	3803	-10988	-0,346
2	1	2	0,04	50	2951	-10979	-0,269

Tabela 2: Dados das simulações realizadas

Para exemplificar, estão destacadas em amarelo simulações realizadas com as placas de dimensões 1 x 1 m, onde é variado a espessura ou a pressão. Realizando o comparativo entre elas, pode-se observar que a diferença entre a Relação de Tensões ($\sigma_{c/c}$) é praticamente desprezível. O mesmo acontece quando varia-se o comprimento do lado a para 1,5 e 2 m, de modo que pode-se concluir que a variação de espessura e pressão não tem interferências nos resultados.

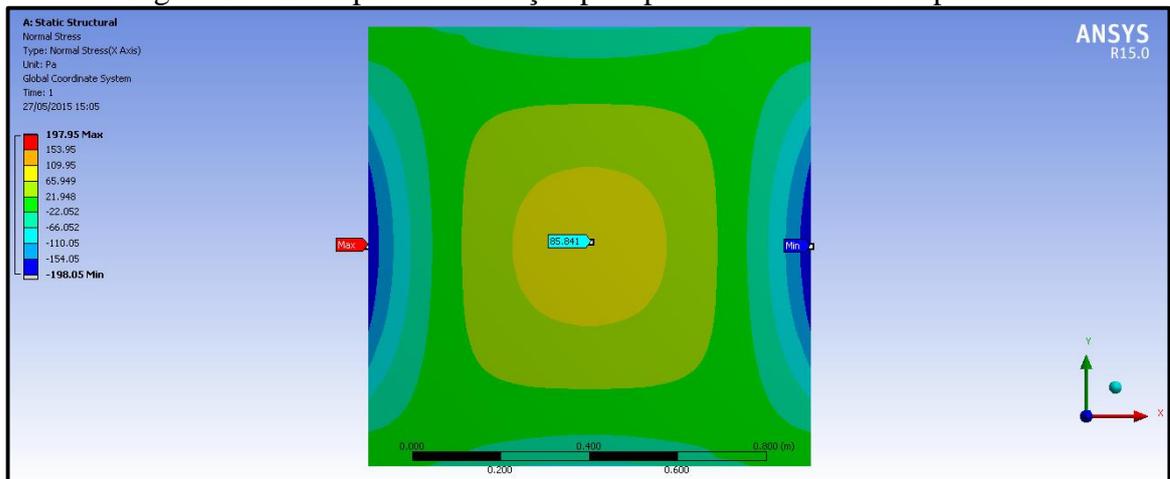
Pode-se observar ainda que, variando a dimensão longitudinal da placa, e fixando os demais parâmetros, a Relação de Tensões pode ser aproximada por uma equação linear:

$$\sigma_{c/c} = 0,172 * a - 0,613$$

A partir desta equação, é possível estimar a tensão no centro de qualquer placa, multiplicando a sua Relação de Tensão pela tensão no centro da aresta b , a qual é calculada analiticamente.

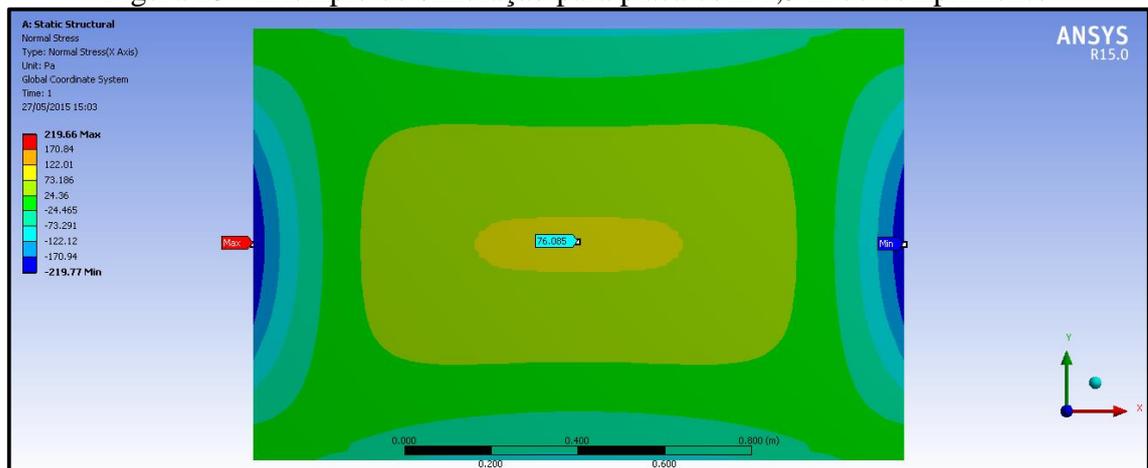
Três exemplos de simulação para as placas com 1, 1,5 e 2 metros de comprimento, respectivamente, são mostradas nas figuras a seguir:

Figura 24 - Exemplo de simulação para placa com 1 m de comprimento



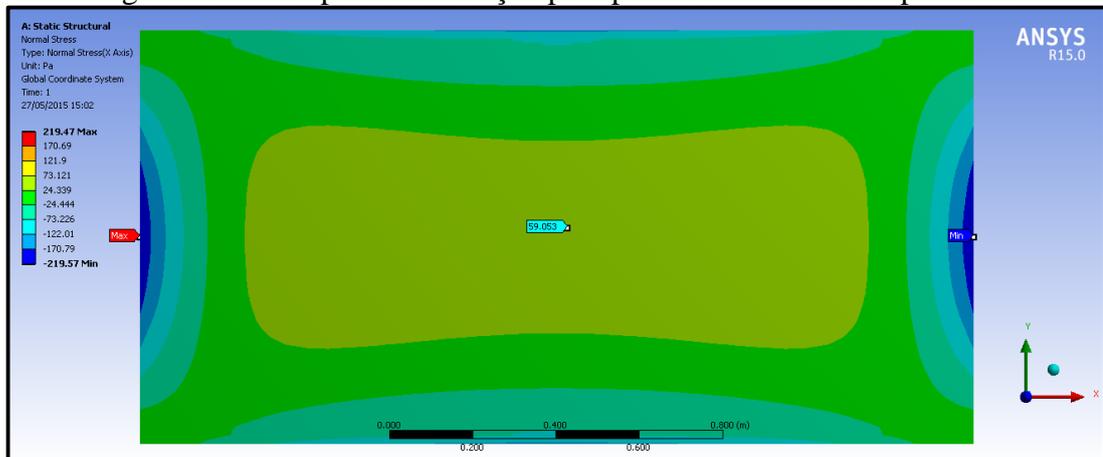
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25 - Exemplo de simulação para placa com 1,5 m de comprimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 - Exemplo de simulação para placa com 2 m de comprimento



Fonte: Elaborado pelo autor

É importante observar que as tensões encontradas analiticamente (σ_A e σ_B) são a tensões no centro das arestas a e b , respectivamente. Deste modo, é necessário realizar a interpolação em X em $Y = b/2$ e em $Y = 0$, na qual ambas podem são representadas por funções quadráticas. Na interpolação em $Y = b/2$, a tensão na extremidades da placa são iguais a σ_B , e no centro a tensão estimada anteriormente. Para $Y = 0$, a tensão nas extremidades foi considerada, por conservadorismo, 1% da encontrada no centro do lado b , ou seja, 1% de σ_B , e no centro do lado a , σ_A .

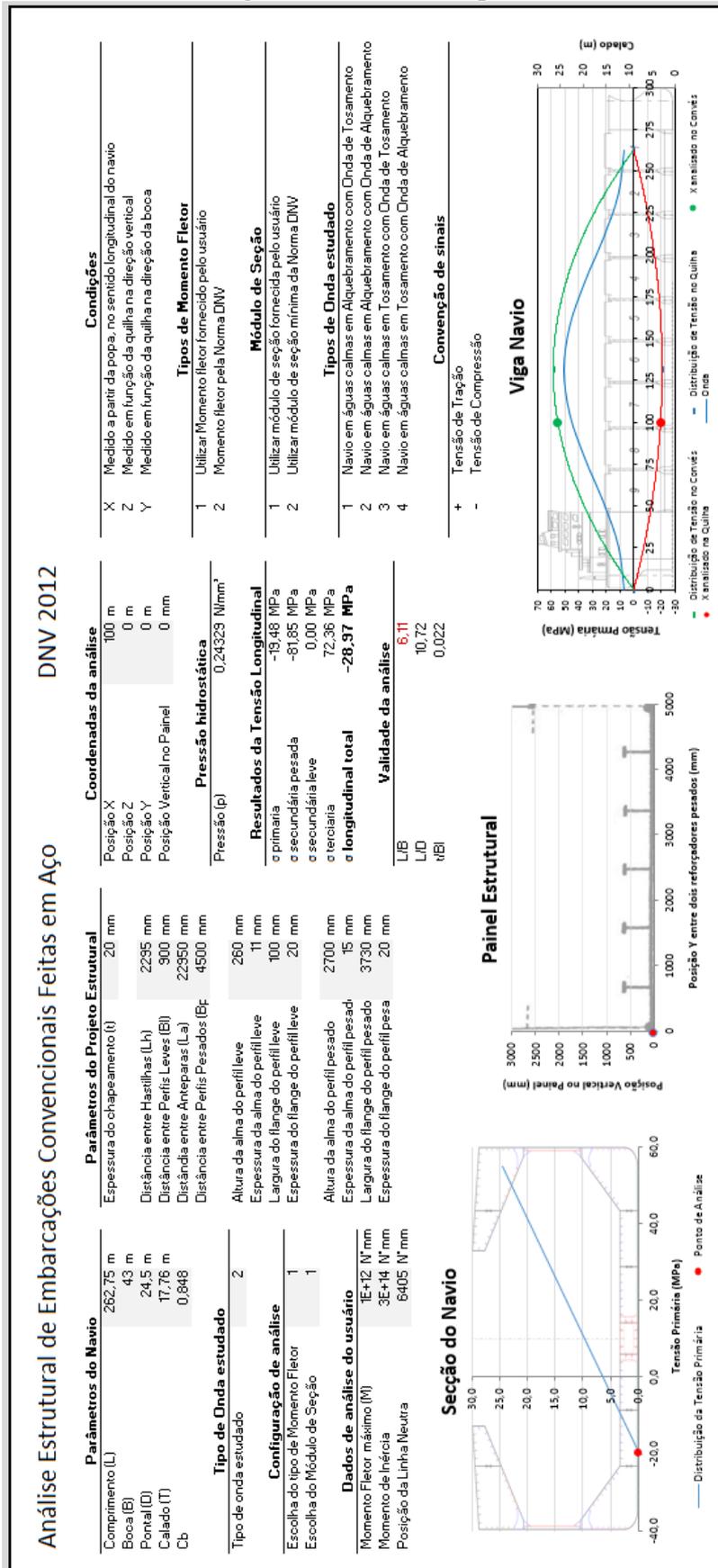
A interpolação em Y é realizada a partir da tensão encontrada para X em $Y = 0$, para as extremidades, e a tensão encontrada no topo da interpolação em X em $Y = b/2$, para o centro, de modo que é modelado por uma equação quadrática.

Para Z , a interpolação é realizada a partir dos resultados da interpolação em Y , comportando-se linearmente de zero até a espessura máxima da placa, de modo que, se a posição inserida pelo usuário para análise for maior do que a espessura da placa, a tensão interpolação em Z é igual a zero.

3.4 ABA PRINCIPAL

Nesta aba, são inseridos nos campos em cinza, os parâmetros que descrevem a estrutura analisada e apresentará os resultados finais de distribuição de tensão tanto global, quanto local, bem como a composição desses valores para diferentes pontos de interesse da análise. Esta aba é dividida em diversas partes, apresentando campos para inserção de dados por parte do usuário, campos para a escolha de parâmetros que serão utilizados na análise, apresentação de resultados, validade da análise, legendas e observações, além de gráficos que ajudam a orientar o usuário e interpretar resultados. A aba Principal pode ser observada na figura 27.

Figura 27 - Aba Principal



Fonte: Elaborado pelo autor

Os campos de entradas de dados são divididos em diferentes pares: Parâmetros do Navio; Parâmetros do Projeto Estrutural; Coordenadas da análise; Tipo de Onda estudado; Configuração da análise.

Nos campos dos Parâmetros do Navio são inseridas as dimensões principais da embarcação, Comprimento (L), Boca (B), Pontal (D) e Calado (T), em metros, além do Coeficiente de Bloco (C_b), adimensional.

Nos Parâmetros do Projeto Estrutural encontram-se a Distância entre hastilhas (Lh), Distância entre perfis leves (Bl), Distância entre anteparas (La), Distância entre perfis pesados (Bp), Espessura do chapeamento (t) e as dimensões da alma e do flange dos perfis leves e pesados, todos em milímetros.

Cabe ao usuário selecionar o tipo de onda estudado, o tipo de momento fletor e o módulo de seção. O tipo de onda servirá para construir a curva de onda no gráfico da Viga Navio e determinará o momento de fletor que será usado, caso o usuário escolha utilizar o momento fletor da norma DNV. Além disso, o tipo de onda estudado tem influência direta sobre a pressão hidrostática, sendo calculado por:

$$p = \left(T \pm \frac{L}{40} \right) 10^{-2} \text{ N/mm}^2$$

Onde T é o calado, e L o comprimento da onda, o qual, para a situação crítica, é equivalente ao comprimento do navio. Para uma onda de alquebramento, a pressão hidrostática no fundo do navio é maior do que em uma onda de tosamento, logo, soma-se $\frac{L}{40}$ para alquebramento, e subtrai-se para tosamento.

O momentor fletor, como mencionado na seção de Estrutura Primária, poderá ser o fornecido pelo usuário ou ainda o calculado pela norma DNV. No caso do usuário selecionar o momento fletor pela norma, o campo para inserção de Momento Fletor máximo do usuário será, automaticamente, desativado. O mesmo vale para o Módulo de Seção, que poderá ser o fornecido pelo usuário ou o mínimo Módulo de Seção pela norma DNV, e em caso de seleção da norma, os campos de Momento de Inércia e Posição da Linha Neutra serão desativados.

As legendas referentes à numeração que deve ser utilizada para cada escolha é apresentada à direita.

Esta aba possui ainda, o campo de entrada de dados “Coordenadas da análise”, onde o usuário informará as posições X, Y, Z e a Posição Vertical no Painel, onde deseja realizar a

análise estrutural da embarcação, sendo os três primeiros dados em metros e a última em milímetros. A posição X é medida a partir da popa, no sentido longitudinal do navio. A posição Z é medida em função da quilha na direção vertical. A posição Y é medida em função da quilha na direção da boca. A Posição vertical no painel nada mais é do que a posição em Z, medida em função da quilha na direção vertical, para o painel estrutural, o qual permite o usuário analisar as estruturas secundária pesada, secundária leve e terciária, separadamente da estrutura primária. Deste modo, são apresentados os valores de tensão longitudinais primária, secundária leve, secundária pesada e terciária, interpolados nas coordenadas fornecidas pelo usuário, assim como a tensão longitudinal total, a qual é a soma de todas as tensões:

$$\sigma_{total} = \sigma_{primária} + \sigma_{sec\ leve} + \sigma_{sec\ pesada} + \sigma_{terciária}$$

É importante observar que todos os resultados das tensões apresentadas em quaisquer abas estarão em 10^6 Pascal (MPa). Por convenção de sinais, valores são positivos representam uma regiões sob tração e valores negativos regiões sob compressão.

A figura “Secção do Navio” apresenta a curva de distribuição da tensão primária ao longo do pontal da embarcação e o ponto de análise inserido pelo usuário, permitindo ao usuário identificar de forma mais visual e interativa o ponto que está sendo analisado. Bem como a figura do “Painel Estrutural”, o qual mostra onde o ponto de interesse do usuário encontra-se nos eixos Y e Z do painel. A figura da “Viga Navio”, apresenta o desenho esquemático de uma embarcação convencional, contendo a onda em estudo, as distribuições de tensões em função do comprimento da embarcação, no convés e na quilha, e a posição X da análise.

É importante observar que todas as 3 figuras são fixas, e não correspondem aos parâmetros do projeto estrutural inseridos na planilha, servido apenas como orientação visual simplificada.

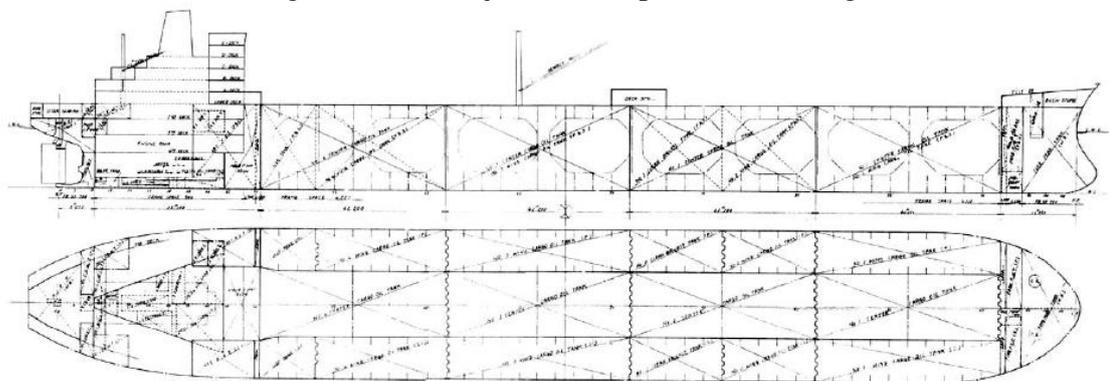
Outras informações relevantes são apresentadas, como a validade da análise, onde o usuário deve observar se as relações L/B e L/D são suficientemente grandes de modo a atender à Teoria de Vigas, que, como descrito na fundamentação teórica, sugere-se que seja maior que 8, assim como deve verificar se a relação de t/b para estrutura terciária é menor que 0,1, em referência a Teoria de Placas Finas. Caso estas relações estejam fora dos valores pré-determinados, a condição não satisfeita ficará em vermelho, de modo a alertar o usuário que os resultados apresentados podem não ser consistentes.

ESTUDO DE CASO

Nesta seção é realizada a análise de tensões de uma embarcação semelhante ao petroleiro Prestige, através da ferramenta de Análise Estrutural de Embarcações Convencionais Feitas em Aço, apresentado no capítulo 4.

Será realizada a análise estrutural de uma embarcação convencional, um petroleiro semelhante ao Prestige, naufragado em 2002 devido à uma falha em sua estrutura primária. O arranjo geral do Prestige é apresentado abaixo:

Figura 28 - Arranjo Geral do petroleiro Prestige



Fonte: Ship Structure Committee Case Study (2008)

Na impossibilidade de se obter os detalhes exatos do projeto estrutural do navio Prestige, as dimensões de uma embarcação semelhante sugerida em um projeto da disciplina da Mecânica de Estruturas de Embarcações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo será utilizada. Na figura 29, são apresentadas as dimensões da embarcação.

Figura 29 - Dados utilizados no estudo de caso

Parâmetros do Navio		Parâmetros do Projeto Estrutural	
Comprimento de Linha D'água	270,36 m	Espessura do chapeamento (t)	20 mm
Comprimento entre perpendiculares	262,75 m	Distância entre Hastilhas (Lh)	2295 mm
Comprimento (L)	262,25 m	Distância entre Perfis Leves (BI)	900 mm
Boca (B)	43 m	Distância entre Anteparas (La)	22950 mm
Pontal (D)	24,5 m	Distância entre Perfis Pesados (Bp)	4500 mm
Calado (T)	17,76 m	Altura da alma do perfil leve	260 mm
Cb	0,848	Espessura da alma do perfil leve	11 mm
Velocidade	15 Nós	Largura do flange do perfil leve	100 mm
		Espessura do flange do perfil leve	20 mm
		Altura da alma do perfil pesado	2700 mm
		Espessura da alma do perfil pesado	15 mm
		Largura do flange do perfil pesado	3730 mm
		Espessura do flange do perfil pesa	20 mm

Fonte: Elaborado pelo autor

Em primeiro lugar, verificou-se a validade da análise que será realizada. Como pode ser observado na figura 30, apenas a condição $\frac{L}{B}$ não encontra-se acima da recomendada na literatura. Isto significa que a estrutura primária da embarcação talvez não se comporte perfeitamente dentro da teoria de vigas, podendo haver distorções nos resultados finais pela influência de outros fatores aqui não considerados, como por exemplo, a interferência de flexão na direção transversal.

Figura 30 - Validade da análise

Validade da análise	
L/B	6,11
L/D	10,72
t/BI	0,022

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme discutido no capítulo anterior, a pressão varia ao longo do comprimento da embarcação conforme o tipo de onda, deste modo, quando há onda em alquebramento, a pressão no centro da embarcação é maior, aumentando os valores de tensão na estrutura secundária e terciária próximos à meia-nau, que, combinados ao máximo momento fletor da estrutura primária (encontrada à meia-nau), nos fornecem a condição crítica para a embarcação, o que não ocorre para a onda de Tosamento, já que as maiores pressões encontram-se nas extremidades da embarcação. Logo, o Momento Fletor utilizado será o de Água Calma em Alquebramento mais Onda em Alquebramento calculado pela norma DNV, assim como o Módulo de Seção. Os Momentos Fletores calculados pela norma DNV para os dados da embarcação do estudo de caso são apresentados na figura 31.

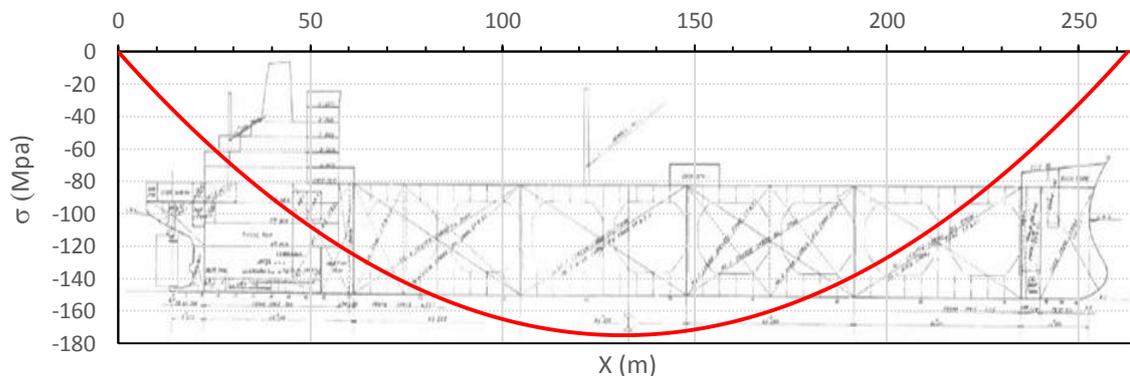
Figura 31 - Diferentes Momentos Fletores do Estudo de Caso

Diferentes Momentos Fletores	
Água Calma Alquebramento mais Onda Tosamento	-1,89E+12 N*mm
Água Calma Alquebramento mais Onda Alquebramento	8,46E+12 N*mm
Água Calma Tosamento mais Onda Tosamento	-8,46E+12 N*mm
Água Calma Tosamento mais Onda Alquebramento	1,89E+12 N*mm

Fonte: Elaborado pelo autor

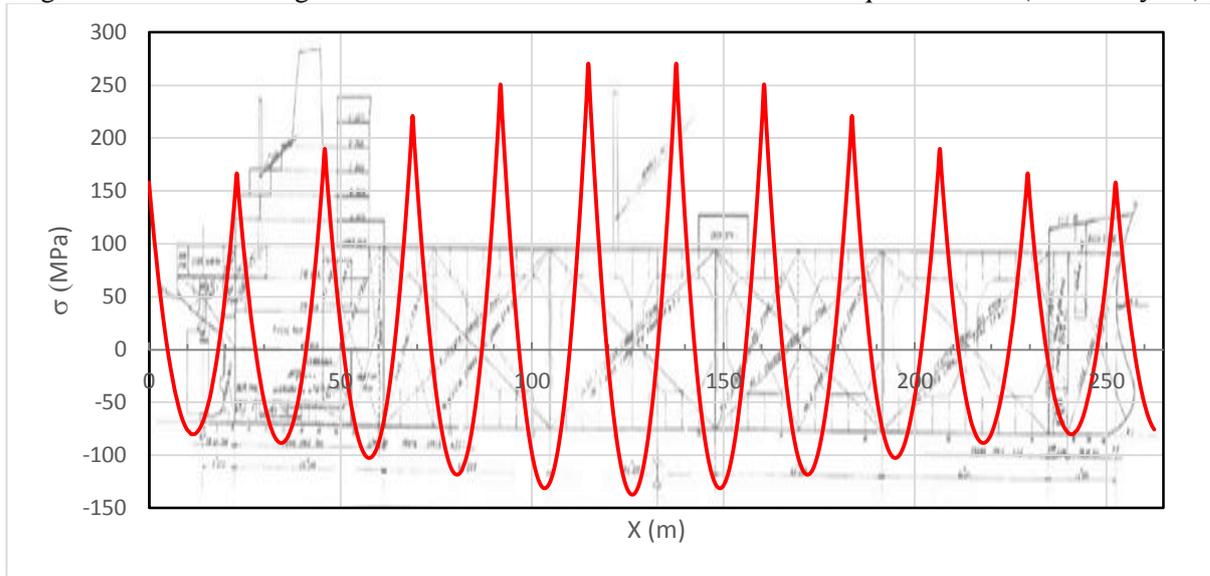
Primeiramente, são plotados, com o auxílio do *Microsoft Excel*, os gráficos das tensões longitudinais em alquebramento a partir dos resultados obtidos na ferramenta desenvolvida, para estrutura primária, secundária pesada, secundária leve e terciária, para $Z = Y = \zeta = 0$, variando-se os valores de X a cada $\frac{1}{5}$ da distância entre anteparas, ou seja, 0,459 metros, para a obtenção de uma resposta precisa:

Figura 32 - Tensão Longitudinal na Estrutura Primária em Alquebramento ($Z = Y = \zeta = 0$)



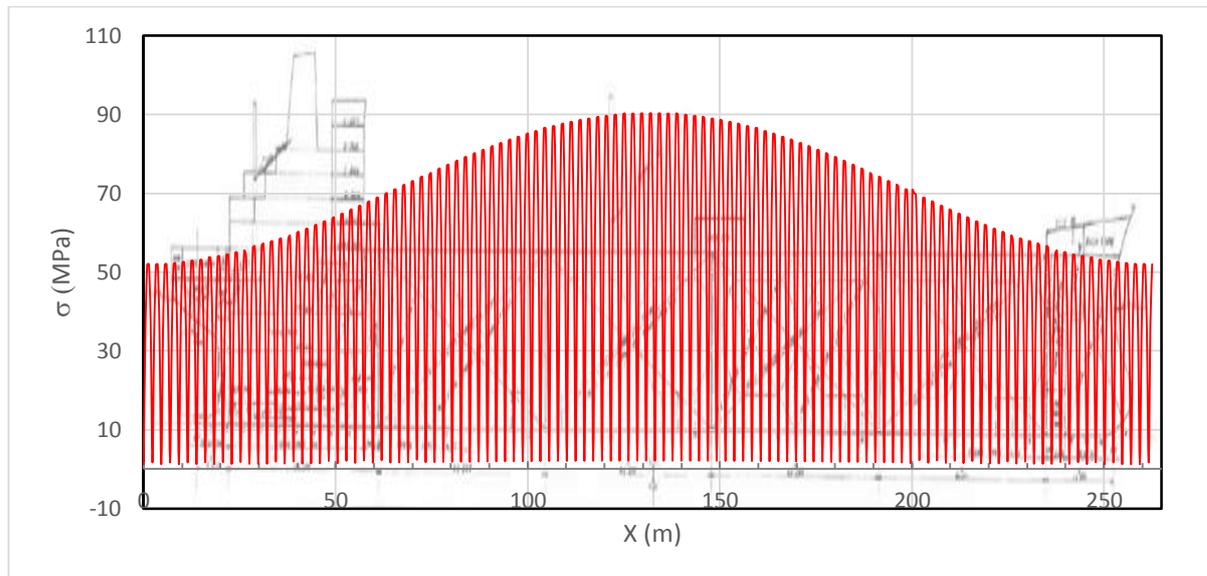
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 - Tensão Longitudinal na Estrutura Secundária Pesada em Alquebramento ($Z = Y = \zeta = 0$)

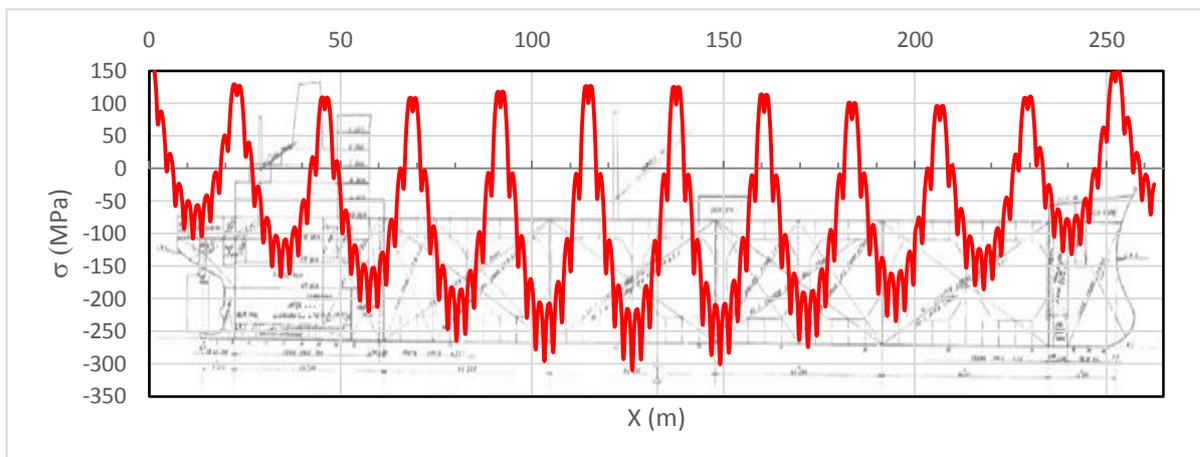


Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34 - Tensão Longitudinal na Estrutura Terciária em Alquebramento ($Z = Y = \zeta = 0$)



Fonte: Elaborado pelo autor

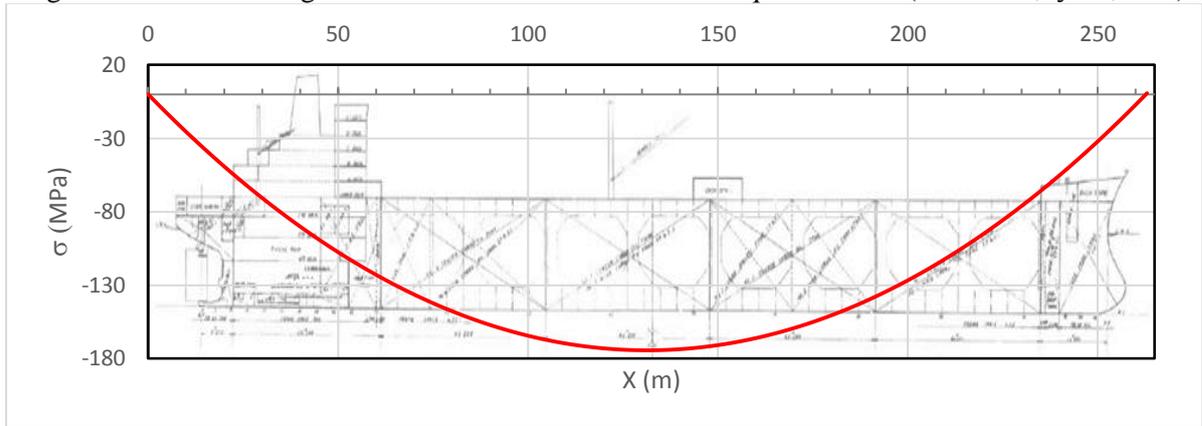
Figura 35 - Tensão Longitudinal Total em Alquebramento ($Z = Y = \zeta = 0$)

Fonte: Elaborado pelo autor

A tensão longitudinal primária máxima está localizada à meia-nau, porém, quando combinada às demais tensões, a tensão máxima total encontra-se próximo à meia-nau, mais especificamente 126,225 m, onde a estrutura encontra-se sob compressão, com uma tensão de -309,95 MPa. A tensão longitudinal da estrutura secundária varia do engaste até o meio do vão, assim como a estrutura terciária, aumentando gradativamente seus valores conforme o aumento de pressão, enquanto a da estrutura secundária leve permanece constante em zero, pelo fato do ponto analisado estar mais próximo de uma estrutura secundária pesada, como discutido no capítulo anterior.

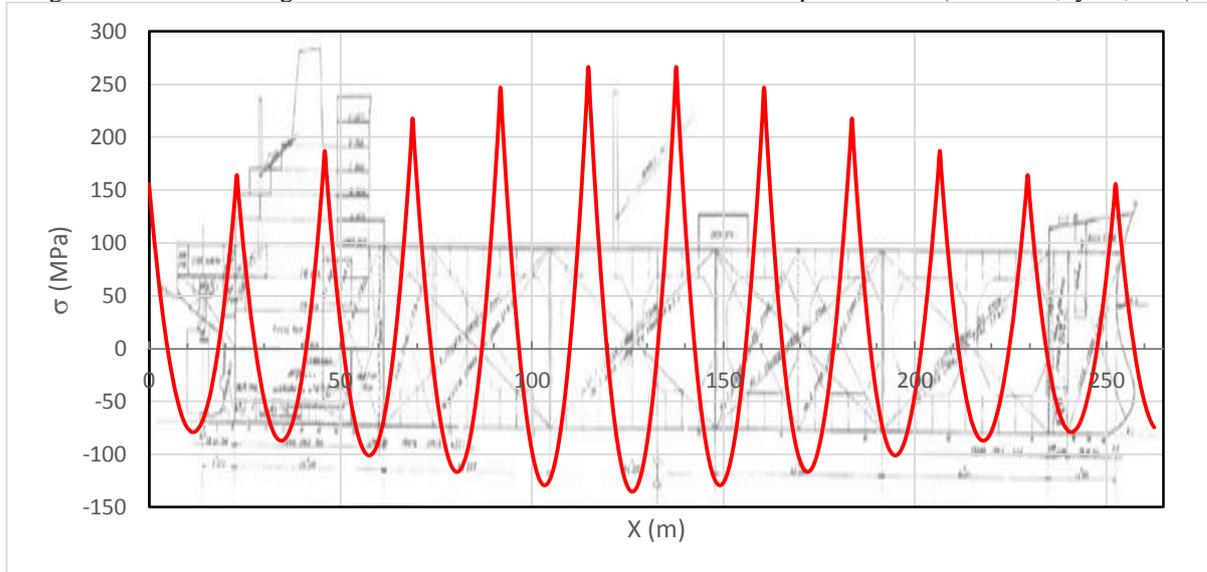
Em seguida, a análise de tensão longitudinal foi realizada variando-se o ponto de análise na posição vertical no painel (ζ): 0,02 m e 2,7 m. Estes pontos são as extremidades superiores das placas e dos perfis pesados, respectivamente, de modo a verificar qual o ponto crítico de tensões. A extremidade superior do perfil leve não foi analisada, visto que sua tensão é zero em $Z = Y = 0$. Os gráficos de distribuição de tensões longitudinais para $\zeta = 0,02$ m são apresentados nas figuras abaixo:

Figura 36 - Tensão Longitudinal da Estrutura Primária em Alquebramento ($Z = Y = 0; \zeta = 0,02 \text{ m}$)



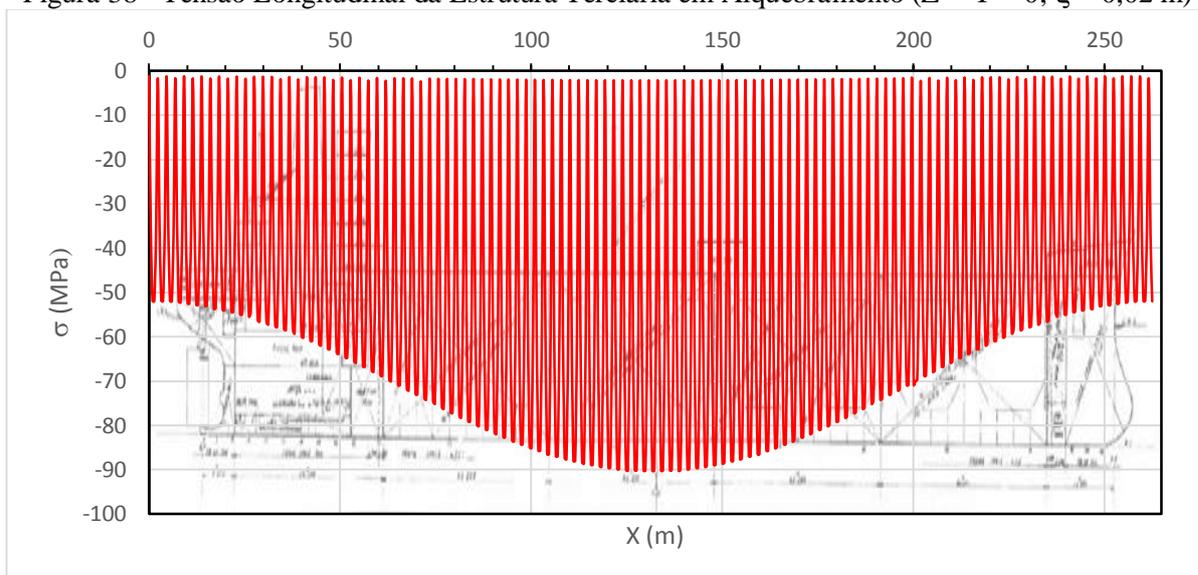
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 37 - Tensão Longitudinal da Estrutura Secundária Pesada em Alquebramento ($Z = Y = 0; \zeta = 0,02 \text{ m}$)



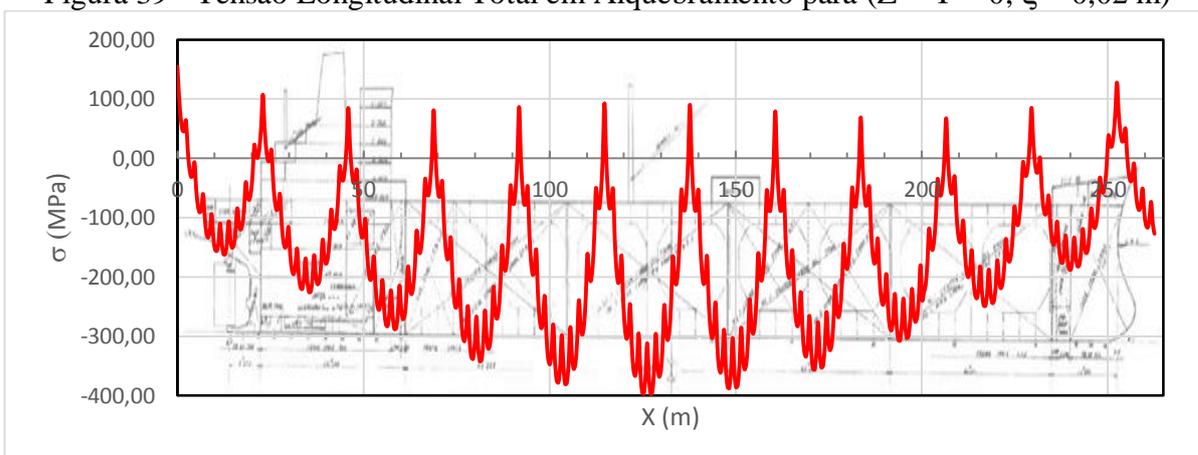
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38 - Tensão Longitudinal da Estrutura Terciária em Alquebramento ($Z = Y = 0; \zeta = 0,02 \text{ m}$)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 39 - Tensão Longitudinal Total em Alquebramento para ($Z = Y = 0; \zeta = 0,02 \text{ m}$)

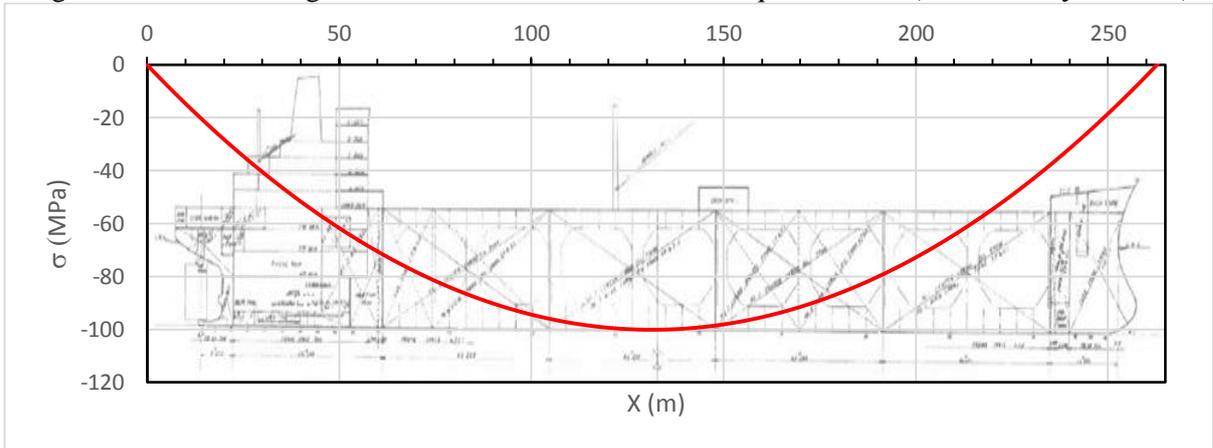


Fonte: Elaborado pelo autor

A variação na tensão longitudinal da estrutura primária e secundária pesada são praticamente desprezíveis se comparados à análise anterior. A diferença de tensão significativa encontra-se na estrutura terciária, onde os valores que anteriormente eram de tração, tornam-se de compressão, amplificando a tensão longitudinal total para um máximo de $-396,99 \text{ Mpa}$, novamente muito próximo à meia-nau, $127,143 \text{ m}$. Quando modifica-se ζ para $2,74 \text{ m}$, a tensão longitudinal primária apresenta uma variação significativa, reduzindo-se quase pela metade, enquanto a tensão longitudinal da estrutura secundária pesada tem, agora, suas extremidades sob compressão e meio do vão sob tração. As tensões referentes a estrutura secundária leve e a estrutura terciária não sofrem solicitações, pois o ponto de análise está fora dessas estruturas.

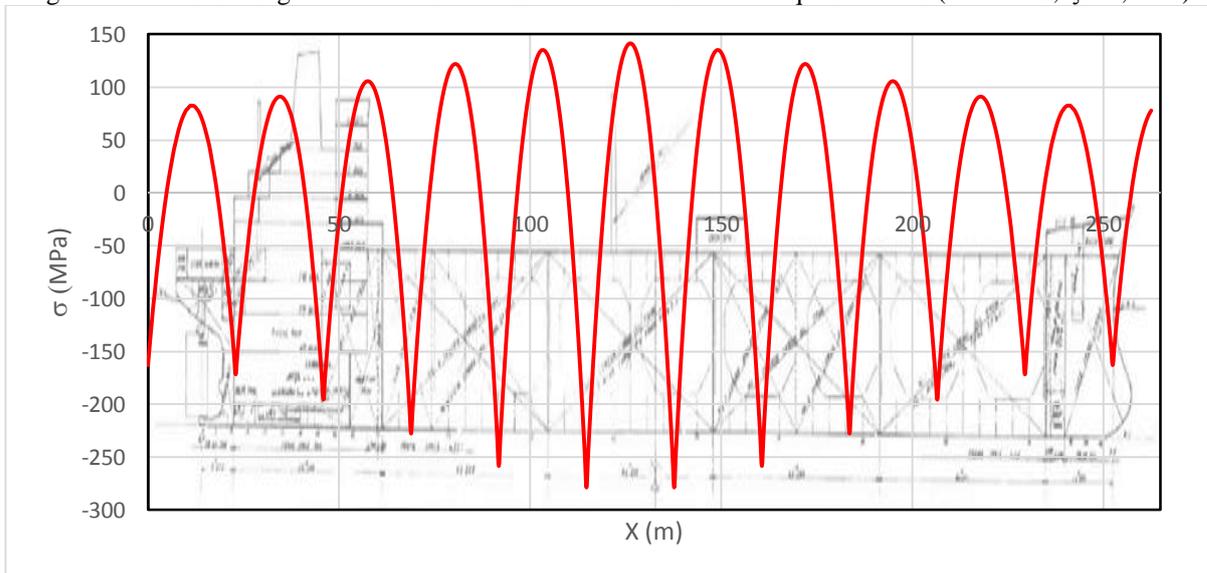
A tensão longitudinal máxima tem seu valor em $-378,59$ MPa, localizado longitudinalmente em $137,7$ m. Os gráficos de tensão longitudinal em aquebramento para $\zeta = 2,74$ m são apresentados nas figuras abaixo:

Figura 40 - Tensão Longitudinal da Estrutura Primária em Alquebramento ($Z = Y = 0$; $\zeta = 2,74$ m)

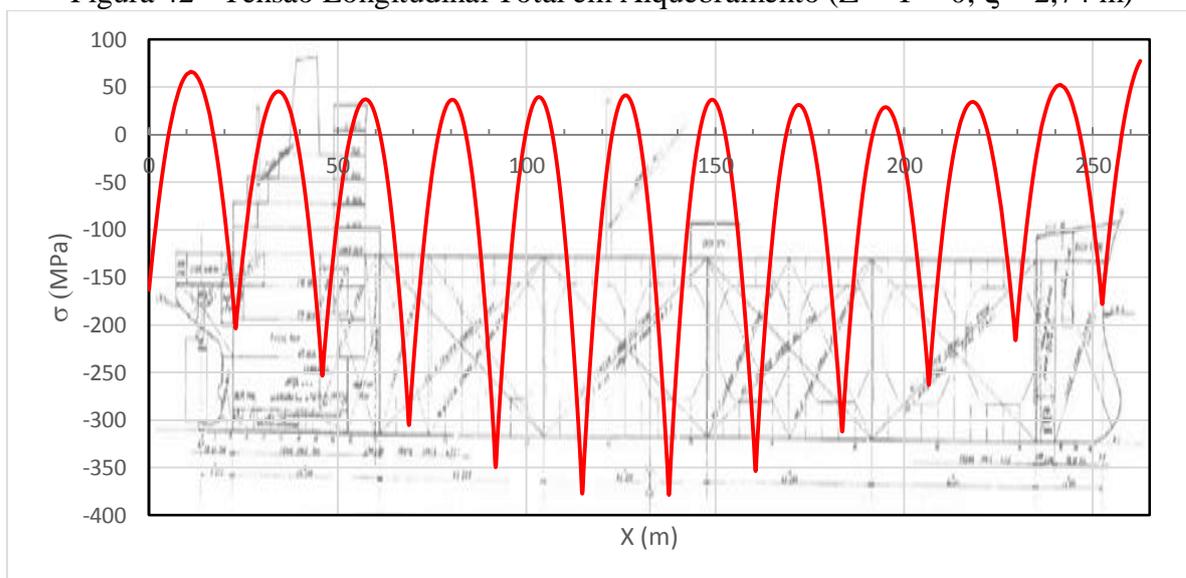


Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 41 - Tensão Longitudinal da Estrutura Secundária Pesada em Alquebramento ($Z = Y = 0$; $\zeta = 2,74$ m)

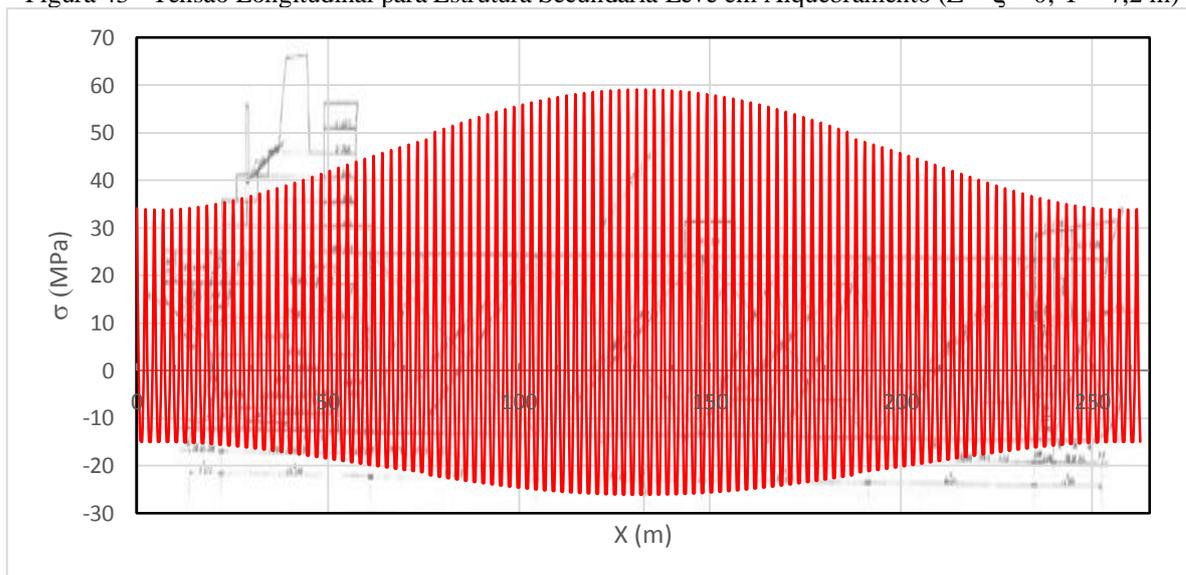


Fonte: Elaborado pelo autor

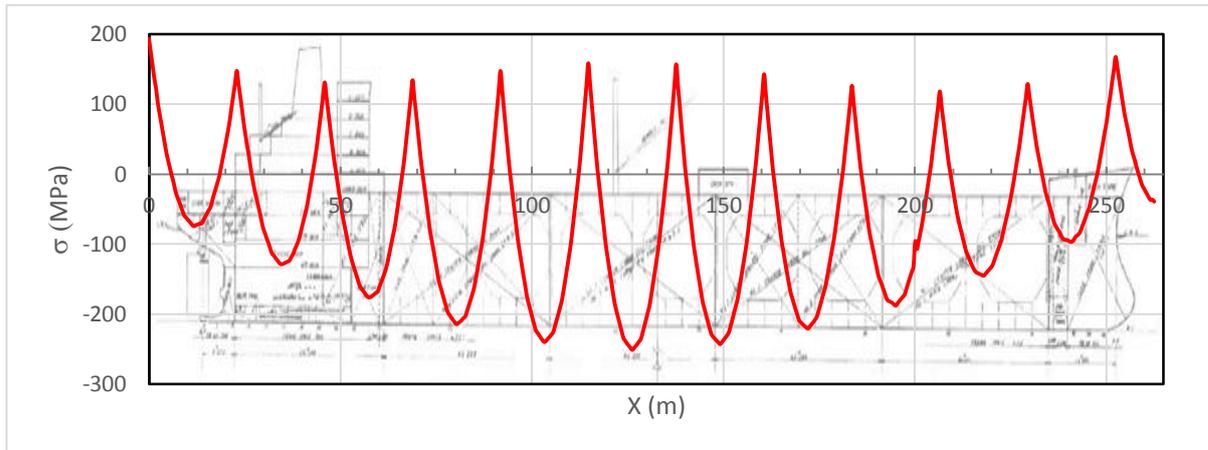
Figura 42 - Tensão Longitudinal Total em Alquebramento ($Z = Y = 0$; $\zeta = 2,74$ m)

Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, variou-se a posição transversal (Y) da análise para 7,2 e 7,65 m, ou seja, localizadas no engaste de um perfil leve e no centro de uma placa, respectivamente. A tensão transversal na estrutura primária e secundária pesada são as mesmas que em $X = Z = Y = 0$, de modo que, o gráfico de distribuição de tensão longitudinal são os mesmos das figuras 32 e 33. Em $Y = 7,2$ m, o mesmo é válido para a estrutura terciária, já que a análise está sendo realizada novamente no engaste da placa. Os gráficos de tensão longitudinal para $Z = \zeta = 0$ e $Y = 7,2$ m da estrutura secundária leve e total são mostrados nas figuras abaixo:

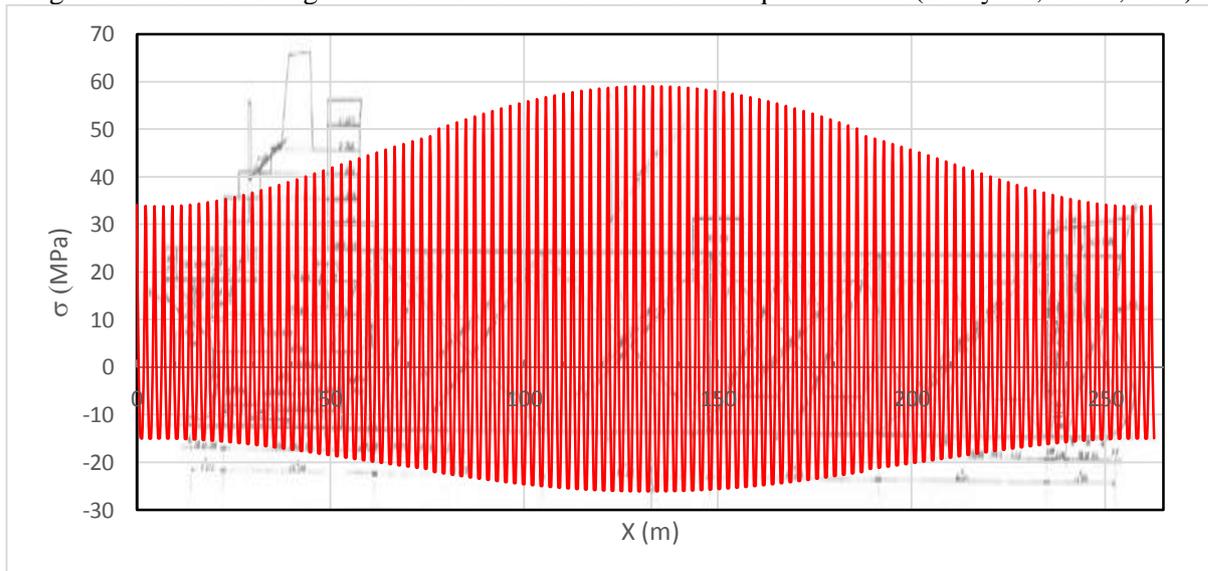
Figura 43 - Tensão Longitudinal para Estrutura Secundária Leve em Alquebramento ($Z = \zeta = 0$; $Y = 7,2$ m)

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 44 - Tensão Longitudinal Total em Alquebramento ($Z = \zeta = 0$; $Y = 7,2$ m)

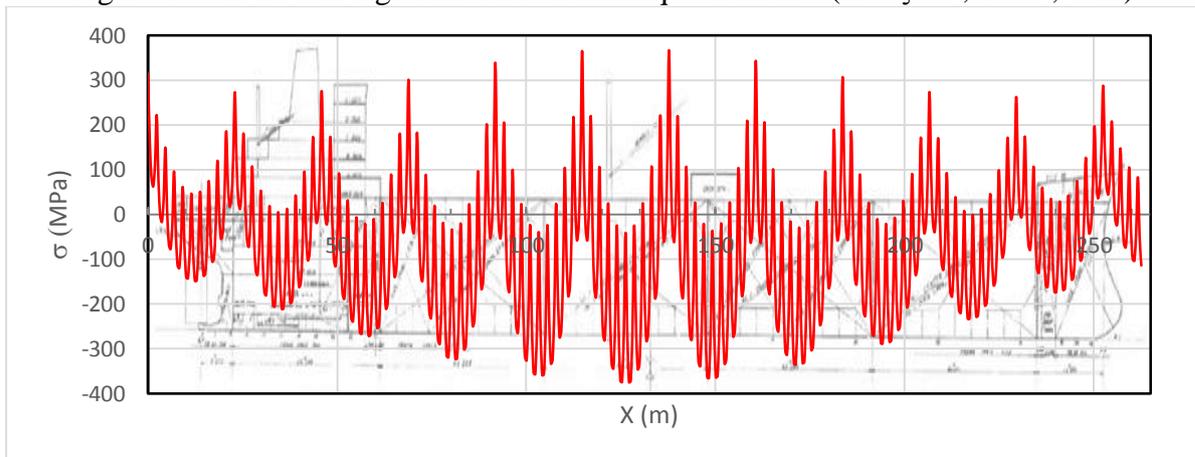
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que o valor de máxima tensão total não ultrapassa os 250 MPa de compressão. Porém, quando a posição $Y = 7,65$ m é analisada, como pode-se observar nas figuras abaixo, há um aumento na tensão de total de compressão próximo à meia-nau, -374,54 MPa, devido aos maiores valores de compressão no centro da placa. Outra diferença que pode ser observada é no valor de tração apresentado próximo à meia nau, onde por consequência dos valores de tração da estrutura secundária pesada, leve e terciária, apresenta uma tração total de 367,34 MPa. Os gráficos de tensão longitudinal nas estruturas primária, secundária pesada e secundária leve permanecem idênticos aos para $Y = 7,2$ m.

Figura 45 - Tensão Longitudinal da Estrutura Terciária em Alquebramento ($Z = \zeta = 0$; $Y = 7,65$ m)

Fonte: Elaborado pelo autor

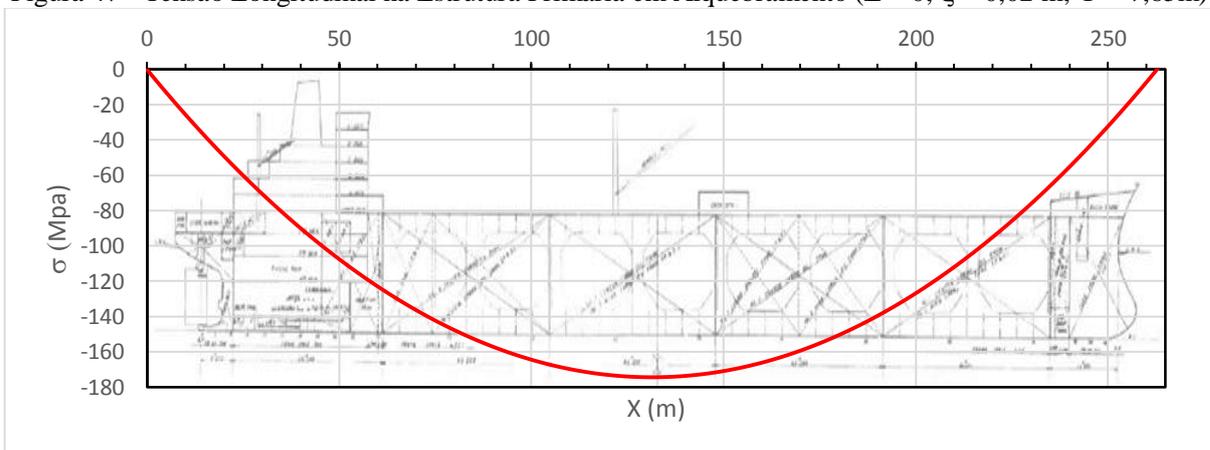
Figura 46 - Tensão Longitudinal Total em Alquebramento ($Z = \zeta = 0$; $Y = 7,65$ m)



Fonte: Elaborado pelo autor

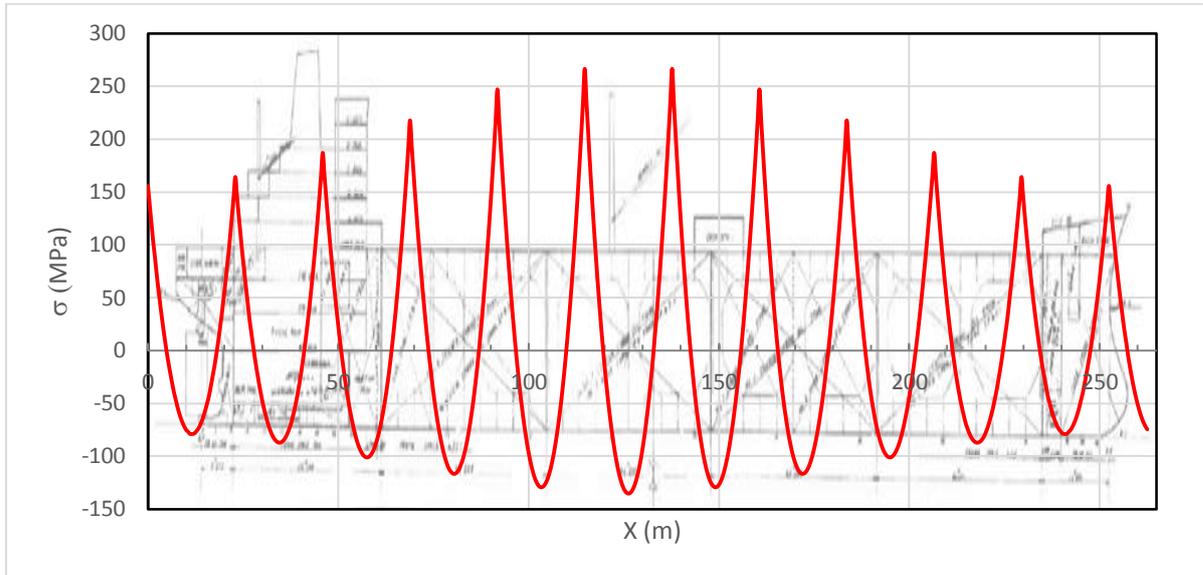
Como pode ser observado, os maiores valores de tensão foram encontrados todos próximos à meia-nau, primeiramente nas posições de $Z = Y = 0$ e $\zeta = 0,02$ m, e depois em $Z = \zeta = 0$ e $Y = 7,65$ m. Deste modo, analisando as tensões longitudinais na posição $Z = 0$, $Y = 7,65$ m e $\zeta = 0,02$ m, obtemos os gráficos a seguir:

Figura 47 - Tensão Longitudinal na Estrutura Primária em Alquebramento ($Z = 0$; $\zeta = 0,02$ m; $Y = 7,65$ m)



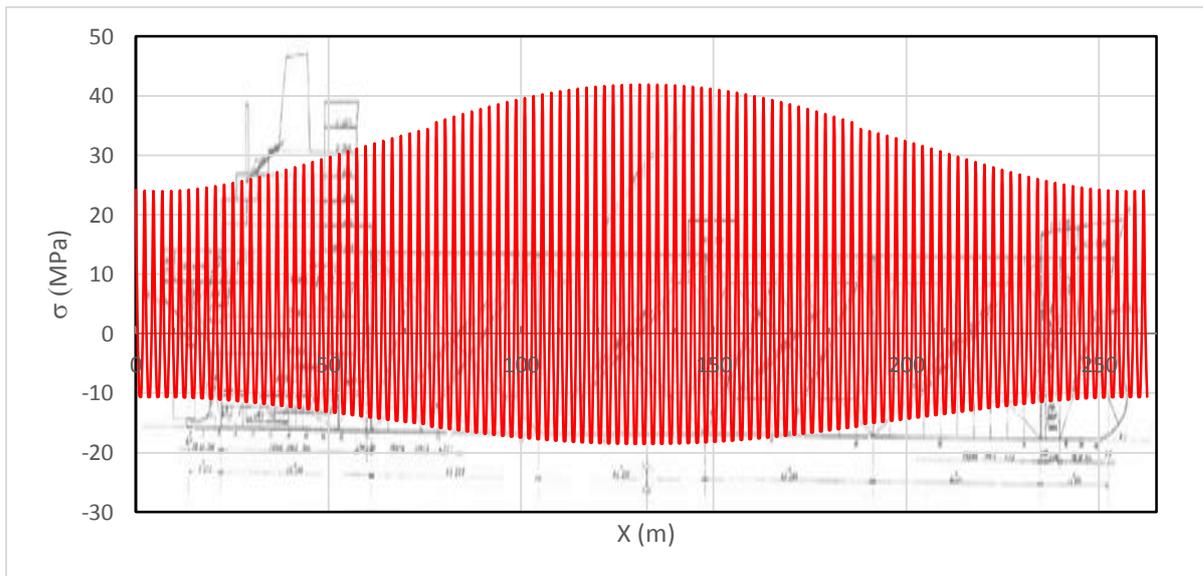
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 48 - Tensão Longitudinal na Estrutura Secundária Pesada em Alquebramento ($Z = 0$; $\zeta = 0,02$ m; $Y = 7,65$ m)



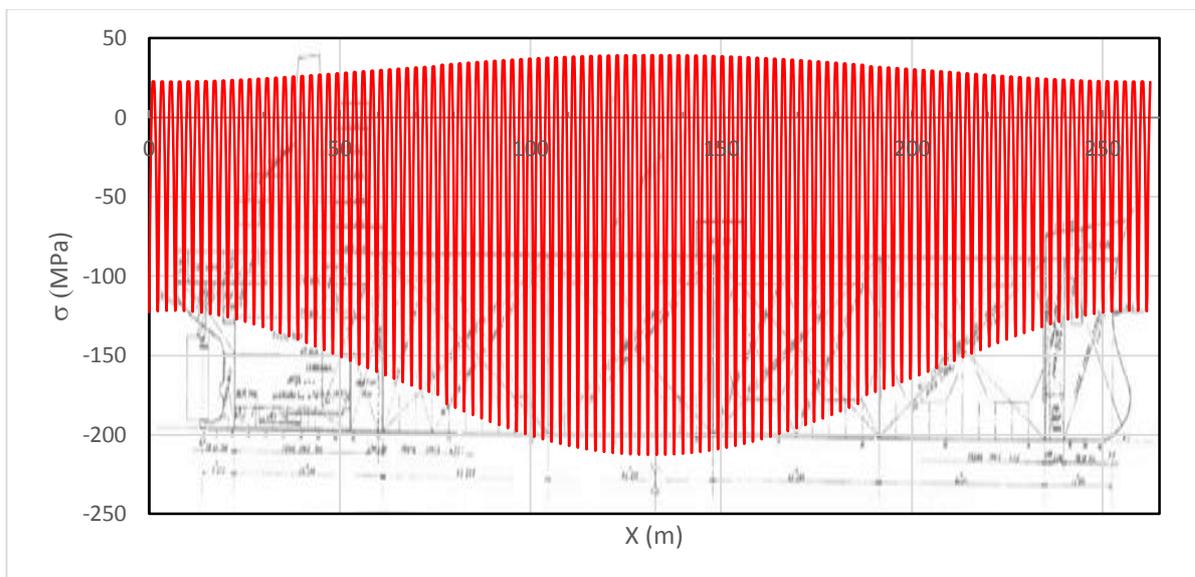
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 49 - Tensão Longitudinal na Estrutura Secundária Leve em Alquebramento ($Z = 0$; $\zeta = 0,02$ m; $Y = 7,65$ m)



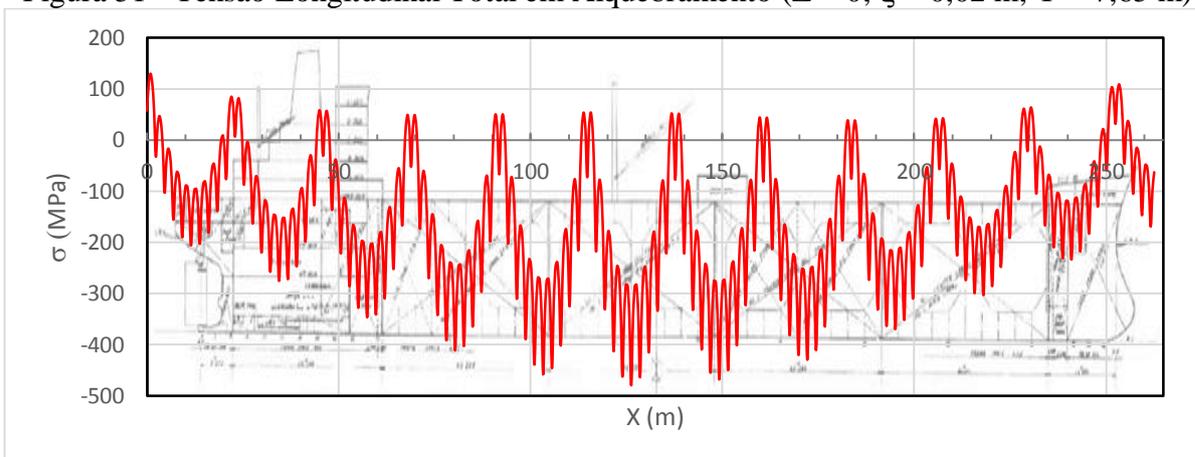
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 50 - Tensão Longitudinal na Estrutura Terciária em Alquebramento ($Z = 0$; $\zeta = 0,02$ m; $Y = 7,65$ m)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 51 - Tensão Longitudinal Total em Alquebramento ($Z = 0$; $\zeta = 0,02$ m; $Y = 7,65$ m)



Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado na figura 51, o valor de máxima tensão de compressão no ponto analisado é de -480,04 Mpa. Este ponto está localizado longitudinalmente em 126,225 m, ou seja, na posição longitudinal de 11,475 m de um compartimento, junto ao engaste do perfil leve com o chapeamento do fundo, tendo como resultado a combinação do somatório das tensões de compressão nas estruturas primária, secundária pesada e terciária, com a tração presente na estrutura secundária leve. A figura 52 mostra os resultados da análise na ferramenta desenvolvida:

Figura 52 - Resultados da Análise na Ferramenta Desenvolvida

Coordenadas da análise	
Posição X	126,225 m
Posição Z	0,02 m
Posição Y	7,65 m
Posição Vertical no Pannel	20 mm

Pressão hidrostática	
Pressão (p)	0,308278 N/mm ²

Resultados da Tensão Longitudinal	
σ primária	-174,19 MPa
σ secundária pesada	-135,22 MPa
σ secundária leve	41,80 MPa
σ terciária	-212,25 MPa
σ longitudinal total	-479,85 MPa

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Com os resultados obtidos no estudo de caso de uma embarcação semelhante ao do petroleiro Prestige, determinou-se a distribuição dos campos de tensão primária, secundária e terciária ao longo do comprimento do navio, visando determinar os pontos críticos do projeto estrutural e propor alterações que melhorem a eficiência da estrutura analisada.

A tensão longitudinal crítica é encontrada nas posições $X = 126,225$ m, $Z = 0$ e $\zeta = 0,02$ m. É importante observar que valores de tensões longitudinais semelhantes ao valor máximo obtido em $Y = 7,65$ m, podem ser encontrados para qualquer posição transversal Y que ocorra no centro de dois perfis leves.

Aços para construção naval e plataformas marítimas possuem baixo teor de carbono (0,15 a 0,23%) e razoável alto teor de manganês, regidos pela norma ASTM ou pelas entidades classificadoras internacionais. O aço AH-32 encontrado no catálogo da empresa brasileira *Usiminas* será utilizado como referência, possuindo um limite de escoamento de 315 MPa.

A tensão longitudinal total máxima encontrada diferentes condições analisadas foi de $-480,59$ MPa, ultrapassando o limite de escoamento do material. A fim de solucionar este problema, alguns parâmetros do projeto estrutural podem ser alterados.

Uma solução viável seria aumentar a espessura do chapeamento de 20 mm para 27 mm. Esta alteração possui interferência direta na estrutura secundária e na estrutura terciária. Nas estruturas secundárias, mudando a espessura do chapeamento, estamos alterando os momentos

de inércias dos perfis, visto o aumento de rigidez da chapa colaborante, sendo inversamente proporcional à tensão longitudinal, modificando os valores de tensão em aproximadamente 23%. Porém, a maior diferença encontra-se na estrutura terciária, visto que o aumento da espessura do chapeamento resulta em um aumento considerável da rigidez da unidade de chapeamento, resultando em uma redução da tensão de aproximadamente 74%. Ambos os efeitos implicam em uma mudança significativa na máxima tensão longitudinal total, que passa a ser de $-302,62 \text{ MPa}$, abaixo do limite de escoamento. Enquanto o volume de aço acresceria em apenas $79,81 \text{ m}^3$, o equivalente a aproximadamente 215 toneladas a mais no peso total da embarcação, quantidade razoável se comparado ao peso total de uma embarcação deste porte.

Mudar a configuração dos painéis seria outra forma para solucionar o problema. Diminuir a distância entre os perfis leves, de 900 mm para 642,85 mm, ou seja, dois perfis leves a mais a cada dois perfis pesados, o que modificaria pouco a tensão longitudinal total da embarcação, de $-480,59 \text{ MPa}$ para $-385,15 \text{ MPa}$, visto que sua maior influência seria a diminuição dos vãos livres da estrutura terciária em 257,15 mm, sendo necessário em torno de 2 mil perfis leves a mais na embarcação para uma alteração de apenas 20% na tensão longitudinal total.

Em compensação, se esta modificação for realizada apenas nos compartimentos próximos à meia-nau e combinada à uma diminuição na distância entre as hastilhas e anteparas nestes mesmos compartimentos, a tensão longitudinal total seria reduzida, visto que a tensão nas estruturas secundárias leves e pesadas têm relação direta com a distância entre as hastilhas e anteparas, respectivamente.

A ferramenta desenvolvida não permite a entrada de dados para embarcações com compartimentos distintos, porém na prática é comum encontrar este tipo de configuração. Se a distância entre hastilhas e anteparas for diminuída em 20% em três compartimentos próximos à meia-nau, juntamente com o aumento de dois perfis leves a mais entre cada dois perfis pesado, a tensão longitudinal total máxima seria de $-318,44 \text{ MPa}$. Ou seja, haveria um aumento em torno de 600 perfis leves e uma mudança de configuração em três compartimentos que resultariam em uma variação de aproximadamente 44% na tensão longitudinal total máxima. Baseando-se em perfis encontrados no Hibeller com dimensões semelhantes aos utilizados no estudo de caso, estima-se que o aumento de peso da embarcação seja de aproximadamente 40 toneladas. Por consequência da redução de tamanho dos compartimentos próximos à meia-nau, os compartimentos das extremidades da embarcação podem, eventualmnte ser ampliados, sem que ocorra elevação da máxima tensão longitudinal total acima do limite de escoamento.

CONCLUSÃO

O processo de concepção e análise de uma embarcação pode ser considerado um processo contínuo e sistemático de tomada de decisões a fim de atingir configurações viáveis para a embarcação. Por soluções viáveis, consideram-se aquelas que atendam aos requisitos de projeto estabelecidos e as normas e regulamentos existentes, sendo o projeto estrutural uma das partes mais importantes deste processo.

Para a elaboração de um projeto preliminar, é importante que o engenheiro tenha um conhecimento teórico bem consolidado, de modo que a partir dele, entenda como os fenômenos inerentes ao problema irão interferir nos resultados, quais as limitações presentes e qual é o comportamento esperado das estruturas projetadas.

Deste modo, soluções analíticas fornecem dados preliminares ao projetista a partir de considerações simplificadas, permitindo que possíveis pontos críticos de projeto sejam detectados e melhor estudados ao longo do projeto.

A ferramenta desenvolvida para análise estrutural de embarcações convencionais feitas em aço permite que o projetista realize esta análise preliminar. Sendo útil para um estudo simplificado, por ser ágil, didática e interativa. Porém, ela não contempla casos mais realísticos, não considerando, por exemplo, que a embarcação pode ser composta por chapas e perfis com dimensões distintas ao longo do comprimento, boca e calado. Em trabalhos futuros, pode-se sugerir que a ferramenta seja refinada de modo a atender estes casos mais realistas. Outra sugestão é a realização do estudo da análise de fadiga devido à variação dos movimentos de aquebramento e tosamento.

REFERÊNCIAS

FOLHA ONLINE. Folha de S.Paulo. **Entenda o desastre ambiental provocado pelo Prestige na Espanha.** Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/ciencia/ult306u7895.shtml>>. Acesso em 27 setembro de 2014.

DAMIENSAGE, J.; MELIN, T. **Análise paramétrica da secção mestra de um navio petroleiro. Comparação entre análise FEM e métodos analíticos aproximados.** 2012. Monografia (Graduação) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

CHAVES, V.T.; TANCREDI, T.P.; ANDRADE, B.L.R. **Optimal Structural Design of Small Ships with Response Surface.** São Paulo: Laboratório de Otimização e Projeto Integrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

SILVA, P. S. B.; VAZ, M. A. **Método semi-analítico para estimativa da resistência de painéis enrijecidos.** Rio de Janeiro: 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, 2012.

KOZAK, J.; GÓRSKI, Z. **Fatigue strength determination of ship structural joints – Part 1: Analytical methods for determining fatigue strength of ship structures.** Polônia: Gdansk University of Technology, 2011.

Mecânica da Estrutura de embarcações. São Paulo: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São paulo, 2010.

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.

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

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

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

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

LAMB, T. **Ship Design and Construction.** Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2003.

TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. **Theory of plates and shells**. New York: McGraw-Hill, 1959.

PEGORARO, B.; DA SILVA, L.S.P; TANCREDI, T.P. **Correction on the theory of naval structures: Analysis using parametric FEM**. São Paulo: ESSS Conference & Ansys Users Meeting, 2015.

Det Norske Veritas (DNV) – **“Hull Structural Design Ships with length 100 meters and above, January 2015”**. – Janeiro de 2015.

Det Norske Veritas (DNV) – **“Hull Structural Design Ships with length less than 100 meters, January 2015”**. – Janeiro de 2015.

SOETHE, V. L. **Materiais metálicos para construção naval. Tipos, propriedades e aplicações: aços**. Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2014. 40 slides: color.

AURÉLIO, R. **Aço na construção de navios**. Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. 16 slides: color.

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