

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

LEONARDO KAULING SÖUDZLÉR

DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA A SÍNTESE E ANÁLISE DA
ESTRUTURA GLOBAL DE EMBARCAÇÕES

Joinville

2018

LEONARDO KAULING SÖUDZLÉR

DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA A SÍNTESE E ANÁLISE DA
ESTRUTURA GLOBAL DE EMBARCAÇÕES

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

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2018

DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA A SÍNTESE E ANÁLISE DA
ESTRUTURA GLOBAL DE EMBARCAÇÕES

LEONARDO KAULING SÖUDZLÉR

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

Joinville, 06 de julho de 2018

Banca Examinadora:

Dr. Eng. Thiago Pontin Tancredi
Presidente/ Orientador

Dr. Eng. Carlos Maurício Sacchelli
Membro

Me. Eng. Vitor Takashi Endo
Membro

A meus pais,
Rosa Kauling Söudzlér e
Luis Gonzaga Morais Söudzlér

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me ajudaram durante minha graduação, em especial:

A Deus,
a quem devo minha vida e decisões;

A meus pais,
Rosa Kauling Söudzlér e Luis Gonzaga Morais Söudzlér, pelo amor incondicional, pela educação e por todo o apoio dado nesta jornada;

A meu irmão,
Gustavo Kauling Söudzlér, pelo companheirismo, amizade e apoio em momentos difíceis durante esses anos que moramos juntos;

A meu amigo,
Marcos Albuquerque Pereira de Lacerda, por todo o apoio, companheirismo e amizade durante a graduação;

A meu primo,
Fernando Kauling Pintarelli, pela amizade, conselhos e parceria durante minha graduação;

Ao meu orientador,
Thiago Pontin Tancredi, por toda paciência, amizade e por ser tão dedicado a Engenharia Naval;

A minha segunda família,
Triplô X, por tantos momentos felizes que tornaram todos esses anos de graduação os melhores da minha vida.

RESUMO

A análise estrutural é uma das partes mais importantes no projeto de um sistema naval, pois visa assegurar que a embarcação cumpra sua missão sem sofrer falhas estruturais. Nessa etapa são definidos o arranjo e o dimensionamento dos reforçadores e chapas que constituem a estrutura do navio. Um projeto estrutural superdimensionado prejudica consideravelmente o desempenho da embarcação, pois reduz a capacidade de carga e aumenta o consumo de combustível do navio. Assim, a síntese de uma estrutura ótima faz com que o navio suporte os esforços a que é submetido com o intuito de desempenhar suas funções com segurança, usando o mínimo de material possível. Paradoxalmente, especificamente para o projeto de estruturas navais, são poucos os programas existentes, que gerem, simultaneamente, os resultados dos cálculos de tensões e o dimensionamento da estrutura ótima, exibindo os resultados de forma gráfica. Assim, este trabalho pretende, inspirado no programa PROTEUS, desenvolver uma nova ferramenta computacional capaz de realizar a análise da estrutura global de embarcações. Com uma interface gráfica amigável, o novo programa permite ainda a comparação com resultados analíticos, facilitando o entendimento e a análise de diferentes situações; sendo assim uma ferramenta ideal para o ensino na área da Mecânica de Estruturas Navais. O trabalho inicia-se com o estudo sobre o funcionamento do programa PROTEUS, que realiza a análise estrutural, utilizando-se de modelos analíticos tradicionalmente usados na Engenharia Naval, seguindo uma sequência lógica e eficiente para a composição dos campos de tensões em diversos pontos da estrutura. Os procedimentos foram então replicados em uma nova versão do programa, a qual permite inclusive o equilíbrio da viga navio. O resultado final é um aplicativo capaz de realizar desde a fase do equilíbrio da viga navio, até o cálculo das tensões normais e cisalhantes nas seções ao longo do comprimento da embarcação. Além disso, o programa permite a construção de diferentes geometrias de seções por meio da definição de painéis estruturais, considerando diferentes geometrias e arranjos de reforçadores. Por fim, apresenta-se 4 estudos de casos simplificados, onde foram calculados o equilíbrio da viga navio e as tensões normal e cisalhante referentes a estrutura primária do sistema. Com isso, agora o novo programa pode ser utilizado como ferramenta de projeto ou como comparação com cálculos analíticos, aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos, permitindo a exploração de um maior número de potenciais arranjos estruturais.

Palavras-chave: Análise estrutural. Estruturas navais. Ferramenta Computacional. Projeto otimizado.

ABSTRACT

Structural analysis is one of the most important parts in the design of a naval system, since it aims to ensure that the vessel fulfills its mission without suffering structural failures. At this stage the arrangement and dimensioning of the reinforcers and plates are analyzed. On the other hand, an oversized structural design considerably impairs the performance of the vessel. Thus the synthesis of an optimum structure causes the ship to support the efforts to which it is subjected in order to carry out its functions safely, using as little material as possible. Paradoxically, specifically for the design of naval structures, there are few existing programs that simultaneously generate the results of the stress calculations and the design of the optimal structure, displaying the results graphically. Thus, this work intends, based on the PROTEUS program, to develop a computational tool capable of carrying out global structural analysis of vessels. With a friendly graphical interface, the new program also allows the comparison with analytical results, facilitating the understanding and analysis of different situations; being an ideal tool for teaching in the field of Mechanics of Naval Structures. The work begins with a study on the operation of the PROTEUS program, which performs the structural analysis, using analytical models traditionally used in Naval Engineering, following a logical and efficient sequence for the composition of the stress fields in several points of the structure. The procedures were then replicated in a new version of the program, which even allows the balance of the ship beam. The final result is an application capable of performing from the equilibrium phase of the vessel beam to the calculated of the normal and shear stresses in the sections along the length of the vessel. In addition, the program allows the construction of different section geometries through the definition of structural panels and different geometries and reinforcement arrangements. Finally, we present 5 simplified case studies, where the balance of the vessel beam and the normal and shear stresses of the primary structure of the system were calculated. With this, the new program can now be used as a design tool or as a comparison tool with analytical calculations, increasing the reliability of the obtained results, allowing the exploration of a greater number of potential structural arrangements.

Keywords: Structural analysis. Marine structures. Computational Tool. Optimized design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Interface do programa PROTEUS	16
Figura 2.1 – Viga Navio	19
Figura 2.2 – Exemplo da Curva de Pesos ao longo do navio	20
Figura 2.3 – Onda de Tosamento	22
Figura 2.4 – Onda de Alquebramento.....	22
Figura 2.5 – Exemplo curva de carga	24
Figura 2.6 – Exemplo de curva de Força Cortante	25
Figura 2.7 – Exemplo de curva de momento fletor	26
Figura 2.8 – Exemplo de Seção Mestra.....	26
Figura 4.1 – Parte de inserção de dados da Aba Equilíbrio.....	33
Figura 4.2 – Parte de inserção de valores de Peso Morto.....	33
Figura 4.3 – Parte de inserção de valores de Peso Leve.....	34
Figura 4.4 – Parte de inserção de valores de Distribuição de Pesos	34
Figura 4.5 – Parte de distribuição de pesos da Tabela Equilíbrio.....	37
Figura 4.6 – Tabela Equilíbrio com valores de calado.....	38
Figura 4.7 – Valores de Calado para diferentes condições de mar.....	39
Figura 4.8 – Valores de Flutuação para diferentes condições de mar.....	41
Figura 4.9 – Gráfico Curvas Peso e Flutuação.....	42
Figura 4.10 – Valores de Carga para diferentes condições de mar.....	43
Figura 4.11 – Gráfico das Curvas de Cargas.....	44
Figura 4.12 – Valores da Força Cortante para diferentes condições de mar	45
Figura 4.13 – Gráfico das Curvas de Força Cortante.....	45
Figura 4.14 – Valores Momento Fletor para diferentes condições de mar.....	47
Figura 4.15 – Gráfico de Curvas de Força Cortante.....	47
Figura 4.16 – Gráfico de Curvas de Força Cortante equilibradas.....	49
Figura 4.17 – Gráfico de Curvas de Momento Fletor equilibradas	50
Figura 4.18 – Parte dos principais resultados da aba equilíbrio.....	51

Figura 4.19 – Aba Equilibrio.....	52
Figura 4.20 – Tabela de Pontos.....	53
Figura 4.21 – Tabela de Painéis.....	53
Figura 4.22 – Desenho da Seção ainda sem reforçadores.....	54
Figura 4.23 - Dimensionamento do reforçador.....	55
Figura 4.24– Tabela de criação dos reforçadores.....	55
Figura 4.25 – Tabela de Painéis com Reforçadores.....	56
Figura 4.26 – Desenho explicativo da distância do primeiro reforçador.....	57
Figura 4.27 - Incidência de Painéis	57
Figura 4.28 – Tabela de cálculos de propriedades de seção, Linha Neutra	58
Figura 4.29 – Tabela de Propriedades de Seção, completa.....	59
Figura 4.30 - Resultados dos Cálculos das Propriedades de Seção.....	60
Figura 4.31 - Aba Desenho de Seção.....	60
Figura 4.32 - Desenho de Metade da seção.....	61
Figura 4.33 – Desenho da distribuição da Tensão Normal na seção.....	62
Figura 4.34 - Sentido da Força Cortante na seção.....	63
Figura 4.35 - Representação dos valores de Momento Estático na seção.....	63
Figura 4.36 - Tabela Resultados de Tensão.....	64
Figura 4.37 - Desenho dos Resultados de Tensão Cisalhante.....	65
Figura 4.38 - Opções de Visualização de Resultados.....	66
Figura 4.39 – Aba Resultados.....	66
Figura 5.1– Desenho da seção do exercício do Apêndice C.....	69
Figura 5.3 – Comparação de valores de Força Cortante do Apêndice E.....	70
Figura 5.4 - Comparação de valores de Momento Fletor do Apêndice E.....	70
Figura 5.5 – Comparação de valores de Força Cortante do Apêndice F.....	71
Figura 5.6 - Comparação de valores de Momento Fletor do Apêndice F.....	72
Figura A1 - Detalhe de um painel do fundo (1-Quilha, 2-Chapeamento, 3-Hastilha, 4-Perfil leve, 5-Antepara transversal, 6-Antepara longitudinal)	76
Figura A2 - Perfil e Chapa Colaborante.....	77
Figura A3 - Exemplo de carga distribuída em parte da grelha de reforçadores.....	78
Figura B1 - Exemplo de unidade de chapa e sistema de referência.....	79
Figura B2 - Deflexão máxima em placas retangulares sob pressão uniforme.....	80
Figura B3 - Tensões em placas retangulares sob pressão uniforme.....	81
Figura C1 – Desenho de seção exercício Apêndice C.....	82

Figura C2 – Determinação da linha neutra exercício Apêndice C.....	84
Figura C3 – Determinação Tensão Normal do exercício do Apêndice C.....	85
Figura C4 – Pontos de Momento Estático da Seção do Apêndice C.....	86
Figura C5 – Gráfico de Tensões Cisalhantes do Apêndice C.....	90
Figura D1 – Desenho de seção exercício Apêndice D.....	91
Figura D2 – Determinação da linha neutra exercício Apêndice D.....	93
Figura D3 – Determinação Tensão Normal do exercício do Apêndice D.....	95
Figura D4 – Pontos de Momento Estático ao longo da Seção.....	96
Figura D5 – Gráfico de Tensões Cisalhantes do Apêndice D.....	100
Figura E1 – Barcaça de proa e popa em forma de cunha.....	101
Figura E2 – Gráfico Curva de Pesos Apêndice E.....	102
Figura E3 – Gráfico Curva de Flutuação Apêndice E.....	102
Figura E4 – Gráfico Curva de Carga Apêndice E.....	103
Figura E5 – Gráfico Curva de Força Cortante Apêndice E.....	105
Figura E6 – Gráfico Curva Momento Fletor Apêndice E.....	106
Figura F1 – Navio de casco prismático.....	107
Figura F2 – Gráfico da Curva de Pesos do Apêndice F.....	110
Figura F3 – Gráfico da Curva de Flutuação do Apêndice F.....	110
Figura F4 – Gráfico de Curva de Cargas do Apêndice F.....	111
Figura F5 – Gráfico da Curva de Força Cortante do Apêndice F.....	111
Figura F6 – Gráfico da Curva de Momento Fletor do Apêndice F.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Comparação de Resultados de seção do Apêndice C.....	68
Tabela 5.2– Comparação de Resultados de seção do Apêndice D.....	69
Tabela F1 - Parte 1 da tabela de resultados do Apêndice F.....	109
Tabela F2 – Parte 2 da tabela de resultados do Apêndice F.....	109
Tabela F3 – Parte 3 da tabela de resultados do Apêndice F.....	110
Tabela F4 – Parte 4 da tabela de resultados do Apêndice F.....	110

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Ângulo Trim	[<i>rad</i>]
ν	Coefficiente de Poisson	[-]
σ_{xx}	Tensão Nomal da seção	[<i>MPa</i>]
τ_{xy}	Tensão Cisalhante da Seção	[<i>MPa</i>]
A	Amplitude De Onda	[<i>m</i>]
a	Projeção vertical	[<i>m</i>]
A_e	Área do elemento de seção	[<i>m</i> ²]
B	Boca da embarcação	[<i>m</i>]
b	Projeção horizontal de cada elemento	[<i>m</i>]
b	Flutuação	[<i>N/m</i>]
C_b	Coefficiente De Bloco	[-]
D	Pontal da embarcação	[<i>m</i>]
E	Módulo de elasticidade do material	[-]
I_{LN}	Momento de Inércia na linha neutra	[<i>m</i> ⁴]
L	Comprimento da embarcação	[<i>m</i>]
M	Momento Fletor	[<i>Nm</i>]
M_{se}	Momento Estático de cada elemento	[<i>m</i> ³]
M_{sp}	Momento Estático em cada ponto	[<i>m</i> ³]
n	Número de elementos	[-]
p	Peso	[<i>t</i>]
q	Carga	[<i>t</i>]
Q	Força Cortante	[<i>N</i>]
T	Calado	[<i>m</i>]
t	Espessura da placa	[<i>m</i>]
T_m	Calado médio	[<i>m</i>]
t_p	Espessura na região do ponto	[<i>m</i>]
x	Posição ao longo do comprimento	[<i>m</i>]
y_{LN}	Posição vertical da linha neutra da seção	[<i>m</i>]
y_q	Posição do centroide elemento	[<i>m</i>]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVO GERAL	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. EQUILIBRIO DA VIGA NAVIO	18
2.1.1. Curva de pesos $[p(x)]$	20
2.1.2. Curva de flutuação $[b(x)]$	21
2.1.3. Tosamento e Alquebramento.....	21
2.1.4. Curva de carga $[q(x)]$	23
2.1.5. Curva de Força Cortante $[Q(x)]$	24
2.1.6. Curva de Momento Fletor $[M(x)]$	25
2.2. SEÇÃO MESTRA.....	26
2.2.1. Cálculo das Propriedades da Secção.....	27
2.2.2. Cálculo da Tensão Normal.....	28
2.2.3. Cálculo da Tensão Cisalhante.....	29
2.3. TENSÕES LOCAIS	30
2.4. MÉTODO DA BISSECÇÃO.....	30
3. METODOLOGIA	31
4. DESENVOLVIMENTO: CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA	32
4.1. EQUILÍBRIO DA VIGA NAVIO.....	32
4.1.1. Inserção dos Parâmetros do Navio.....	32
4.1.2. Curva de flutuação.....	35
4.1.3. Cálculos da Viga Navio.....	35
4.1.3.1. Pesos.....	36
4.1.3.2. Calado.....	37
4.1.3.3. Tosamento e Alquebramento.....	38
4.1.3.4. Flutuação.....	39
4.1.3.5. Cargas.....	42

4.1.3.5.1. Força Cortante.....	44
4.1.3.6. Momento Fletor.....	46
4.1.4. Algoritmo de Equilíbrio	48
4.1.5. Apresentação dos Resultados de Equilíbrio	51
4.2. DESENHO DA SEÇÃO.....	52
4.3. RESULTADOS.....	60
5. VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS	67
5.1. PRIMEIRA VERIFICAÇÃO.....	67
5.2. SEGUNDA VERIFICAÇÃO.....	68
5.3. TERCEIRA VERIFICAÇÃO.....	69
5.4. QUARTA VERIFICAÇÃO.....	71
6. CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICE A	76
APÊNDICE B	79
APÊNDICE C	82
APÊNDICE D	91
APÊNDICE E	101
APÊNDICE F	108

1. INTRODUÇÃO

O Projeto Racional Otimizado e Automatizado da Estrutura de Embarcações (PROTEUS), é um sistema especializado na síntese e na análise da estrutura de embarcações (AUGUSTO, 1996). Através dele, os esforços relacionados com a parte estrutural de um sistema naval podem ser calculados e analisados, permitindo a busca por uma estrutura ótima em termos de peso.

O projeto estrutural de um navio é composto por diversas etapas complexas, cuja realização demanda significativa quantidade de cálculos e interpretações que exigem muito conhecimento e tempo de quem a está executando.

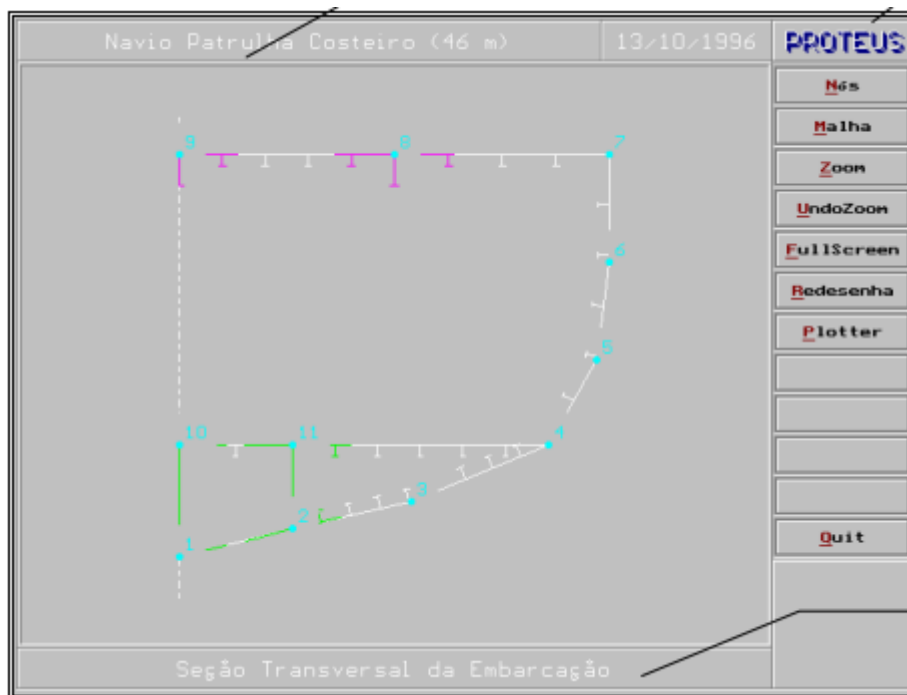
Tipicamente, a elaboração de um projeto estrutural eficiente requer o uso de uma ferramenta computacional para que resultados analíticos e computacionais sejam comparados a fim de se obter uma conclusão mais confiável, além de permitir que o projetista analise uma maior quantidade de arranjos estruturais.

Nesse contexto, dada a complexidade da análise, torna-se importante o desenvolvimento de um programa que permita ao projetista analisar a configuração dos elementos estruturais de uma embarcação e determinar os níveis de tensões em cada elemento estrutural sofrido ao longo de sua vida útil.

Para isso, o programa PROTEUS é dividido em módulos, de acordo com o tipo de esforço que cada elemento suporta. Uma embarcação resiste a esforços que geram tensões que, de acordo com o arranjo de reforçadores, podem ser desacopladas e analisadas individualmente, dividindo-se em elementos primários, secundários e terciários.

Na Figura 1.1 é mostrada a interface original do programa PROTEUS desenvolvido em 1996 e que inspirou este trabalho.

Figura 1.1 – Interface do programa PROTEUS



Fonte: Augusto (1996)

A hipótese do desacoplamento entre os campos de tensão oriundos das deformações globais e locais, é algo bastante peculiar a engenharia naval, sendo amplamente discutido por Barabanov (1966), que justifica tal abordagem em função da diferença na ordem de grandeza das curvaturas das deformações de tais elementos, tornando os fenômenos independentes.

Assim, a análise de uma estrutura, usualmente, pode ser dividida em efeitos globais e locais. A análise global de uma estrutura naval costuma ser denominada Estrutura Primária da embarcação (TANCREDI, 2006), onde a mesma pode ser considerada como sendo uma viga em flexão, chamada de *viga navio*.

A estrutura local de uma embarcação consiste de um conjunto de chapas reforçadas individualmente por perfis leves e perfis pesados, considerados entre duas anteparas estruturais (AUGUSTO, 2004). As tensões secundárias decorrem da deformação os reforços longitudinais e variam de acordo com o tamanho, quantidade, espaçamento e configuração destes perfis.

Por fim, as tensões terciárias são aquelas originadas da deformação da estrutura terciária, ou seja, as chapas do navio, cujos esforços são oriundos da pressão exercida pela água no casco da embarcação.

Com isso, por meio de modelos analíticos tradicionalmente usados na Engenharia Naval, e que serão descritos no capítulo seguinte, seguindo uma sequência lógica e eficiente para a composição dos resultados de tensões em diversos pontos da estrutura, são calculadas as tensões primárias, as quais serão exibidas na forma de tabelas, gráficos e desenhos de fácil visualização do usuário.

1.1. OBJETIVO GERAL

Realizar, inspirado no programa PROTEUS, o desenvolvimento de uma nova ferramenta computacional capaz de realizar os cálculos e representar graficamente os resultados referentes a análise da estrutura global de uma embarcação.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma interface gráfica que permita ao usuário modelar o problema referente a condição de carga da embarcação a qual será analisada;
- Desenvolver um procedimento capaz de, a partir dos dados de entrada, determinar as curvas de Peso, Flutuação, Carga, Força Cortante e Momento Fletor;
- Desenvolver um procedimento que permita realizar o equilíbrio da Viga Navio;
- Desenvolver uma interface que permita ao usuário modelar as características estruturais da seção mestra da embarcação;
- Desenvolver um procedimento para o cálculo e visualização dos resultados da Tensão Normal, do Momento Estático e da Tensão Cisalhante ao longo da estrutura da embarcação;
- Realizar estudos de caso visando verificar a coerência da ferramenta desenvolvida.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas as teorias e métodos utilizados para a realização deste trabalho, bem como eventuais trabalhos similares relevantes.

2.1. EQUILÍBRIO DA VIGA NAVIO

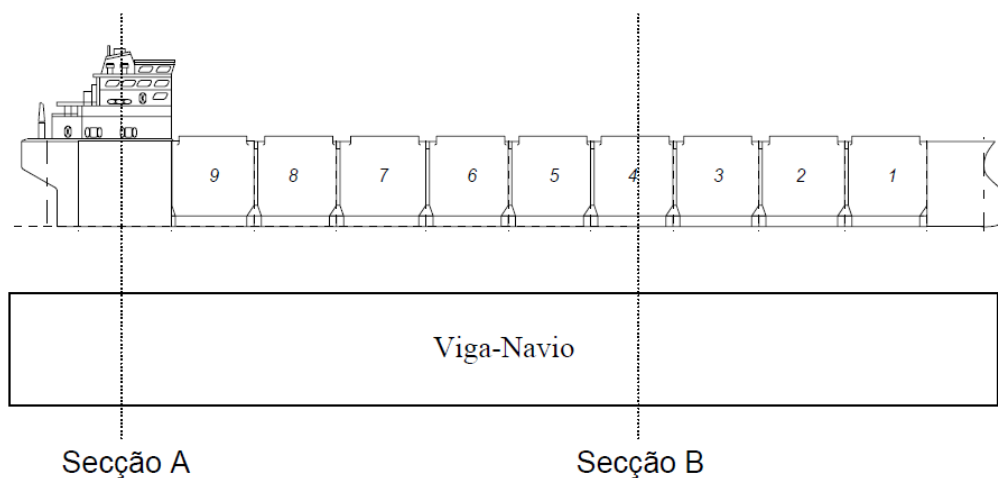
A análise estrutural de um navio pode ser feita considerando efeitos locais e globais. Para a análise global da estrutura do navio, o mesmo é considerado como uma única estrutura, que engloba todas as demais, e é usualmente chamada de Estrutura Primária.

Graças a uma geometria peculiar, com uma das dimensões “privilegiada” (em geral o comprimento) em relação as demais, os navios podem ser globalmente analisados utilizando-se a Teoria de Vigas (TANCREDI, 2006).

Se o navio possuir razões de L/B e L/D maiores que oito¹, este pode ser considerado nos cálculos como sendo uma viga, a chamada Viga Navio mostrada na Figura 2.1. Bons resultados são obtidos utilizando a Teoria Simples de Vigas para navios com essas características.

¹ O valor oito assegura a completa modelagem do fenômeno utilizando a teoria de vigas. No entanto, normas de Sociedade Classificadoras, muitas vezes permitem o uso de tal teoria já a partir de valores acima de 5 (DNV, 2012)

Figura 2.1 - Viga Navio



Fonte: Tancredi (2006)

Serão considerados nos cálculos estruturais primários, apenas elementos contínuos por mais de $2/3$ do comprimento da embarcação, considerando que apenas estes elementos contribuem na rigidez longitudinal da mesma. Na Figura 2.1 é mostrado um exemplo de viga navio, onde observa-se que a secção muda ao longo do comprimento da embarcação.. No exemplo são destacadas as secções A e B. Claramente nota-se que algumas características da seção A não se estendem por mais de $2/3$ do comprimento do navio, como, por exemplo, a superestrutura; a qual não será considerada um elemento contribuinte para a resistência longitudinal da embarcação. Já a secção B apresenta características presentes por mais de $2/3$ do comprimento do navio, e, portanto, efetivos na resistência estrutural.

Em virtude do navio não apresentar nenhum ponto de vínculo com o solo e estar sujeito a um carregamento que envolve peso e empuxo, este se torna um elemento auto equilibrado.

Neste caso, para que a estrutura possa ser considerada em equilíbrio, esta deve atender a duas condições. A primeira é ter o valor de peso exatamente igual ao valor de empuxo, e a outra é estar com a posição do centro longitudinal de flutuação (LCB) exatamente na mesma posição do centro longitudinal de gravidade (LCG).

Caso uma das condições não seja satisfeita, ocorrem alterações no calado e no ângulo de trim do navio. Alterações no calado médio corrigem a diferença entre flutuação e peso, já diferenças entre LCB e LCG são corrigidas com a alteração do ângulo de trim.

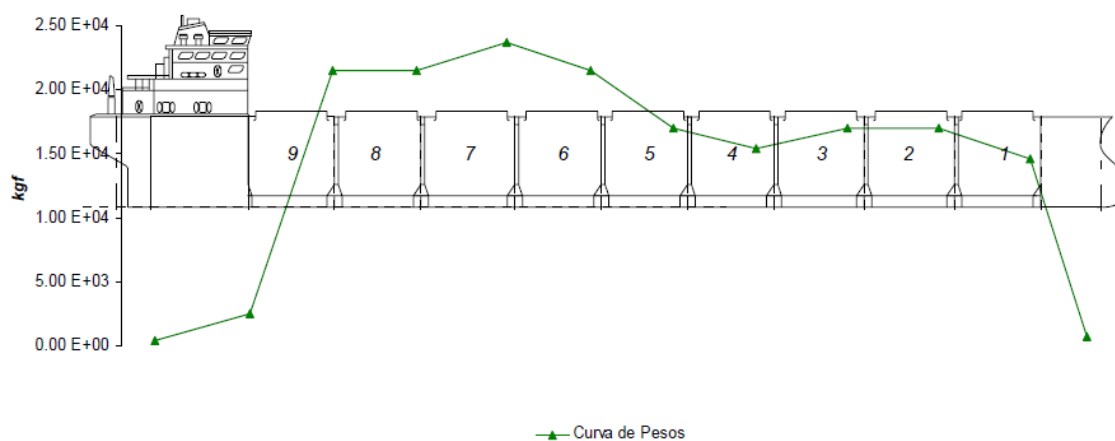
Ao modificar o ângulo de trim, deve-se corrigir o calado ao longo da embarcação. Assim para águas tranquilas, o calado que havia sido suposto constante ao longo do comprimento, ganha uma correção devido ao ângulo de trim (TANCREDI, 2006).

Em navios cuja a forma da proa é diferente da forma da popa, ao modificar o calado, a condição $LCB = LCG$ passa a não mais ser satisfeita, assim como alterando o ângulo de trim a condição flutuação = peso também não é mais satisfeita, tornando então o equilíbrio da viga navio um processo iterativo, porém com convergência rápida.

2.1.1. Curva de pesos [$p(x)$]

A primeira etapa no cálculo de equilíbrio da viga navio consiste na determinação da curva de pesos da embarcação, onde são considerados os chamados peso morto (consumíveis e carga) e peso leve (superestrutura, máquinas, casco e outfit) da embarcação. Os pesos são tratados como cargas distribuídas ao longo do comprimento do elemento representado², como exemplificado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Exemplo da Curva de Pesos ao longo do navio



Fonte: Tancredi (2006)

² Embora a abordagem teórica permita que se considere cargas pontuais, a ferramenta desenvolvida requer que tais forças sejam aplicadas considerando-se uma distribuição ao longo de pelo menos um metro no entorno do ponto de aplicação.

Para representação dos pesos sobre o navio, o mesmo é particionado ao longo de seu comprimento. O peso de cada trecho é representado por uma carga constante, distribuída ao longo do trecho. Já os pesos pontuais podem ser modelados como sendo uma massa concentrada localizada no LCG de cada pedaço de comprimento do navio, ou seja, quanto mais pedaços o navio é dividido mais preciso é o resultado.

2.1.2. Curva de flutuação [b(x)]

A curva de flutuação é obtida pela integração das áreas submersas de cada seção ao longo do comprimento da embarcação. Como a curva de flutuação representa o volume submerso da embarcação, quanto maior for o número de seções consideradas, mais preciso e realista será o resultado.

Como o valor da área submersa em cada seção não é conhecido, uma aproximação inicial é feita através do produto entre o calado, boca e coeficiente de bloco. Esta aproximação possui defeitos e é aceitável apenas para embarcações prismáticas, de alto coeficiente de bloco.

Por fim para a geração da curva de flutuação deve-se considerar as condições necessárias para equilibrar o navio. Assim, o calado que havia sido suposto constante e igual ao calado médio ao longo de toda a embarcação precisa ser corrigido devido a um ângulo trim, de acordo com a Equação 2.1.

$$T(x) = T_m + \left(\frac{L}{2} - x\right) \tan(\phi) \quad (2.1)$$

Além do equilíbrio em águas tranquilas, existem também equilíbrios em situações mais severas, onde a ação de ondas ao longo do casco amplifica os esforços gerados.

2.1.3. Tosamento e Alquebramento

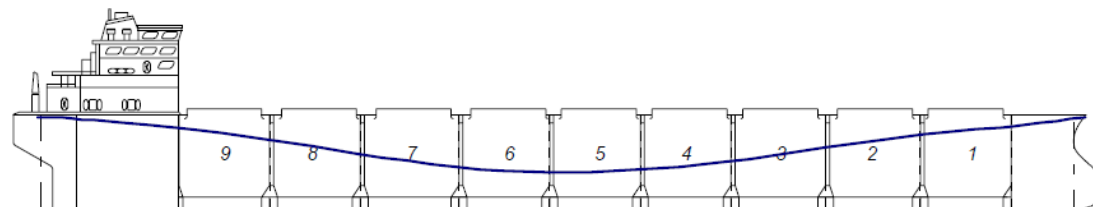
Durante a operação o navio poderá se deparar com ondas, de diferentes comprimentos. As ondas de comprimento muito menor do que o comprimento do navio, não causam grandes esforços estruturais, pois possuem baixa amplitude, já as ondas comprimento muito maior que o comprimento do navio, resultam em elevada

inclinação da embarcação, mas baixa variação do campo de flutuação ao longo do casco, e, portanto, baixa solicitação estrutural.

Assim, as ondas críticas são aquelas que possuem o comprimento próximo ao comprimento do navio, e são essas ondas que devem ser analisadas no projeto.

As ondas críticas são classificadas em dois instantes de tempo, sendo denominados ondas de alquebramento e tosamento. A onda de tosamento representa o instante onde o LCG do navio se localiza exatamente na posição da cava da onda, como mostra a Figura 2.3.

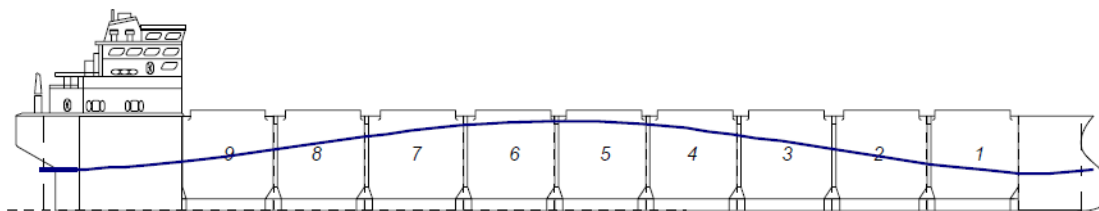
Figura 2.3 - Onda de Tosamento



Fonte: Tancredi (2006)

Já a onda de alquebramento corresponde ao instante onde a crista passa exatamente na posição do LCG do navio, como mostra a Figura 2.4. Ambas possuem a mesma amplitude, dada por relações empíricas descritas na literatura³, diferenciando-se uma da outra apenas pela fase em relação a posição LCG do navio.

Figura 2.4 - Onda de Alquebramento



Fonte: Tancredi (2006)

A modelagem matemática de uma onda, é assunto complexo. No caso de problemas estruturais, considera-se que tais ondas podem ser modeladas por meio

³ Em geral considera-se que a amplitude de uma onda vale 1/40 avos do comprimento. (TANCREDI, 2018)

de uma correção senoidal, tal como mostrado na equação 2.1, a qual permite a determinação do calado da embarcação, adicionando-se uma parcela de onda na equação de águas tranquilas, conforme as Equações 2.2 (tosamento) e 2.3 (alquebramento).

$$T(x) = T_m + \left(\frac{L}{2} - x\right) \tan(\phi) + A \cos\left(2\pi \frac{x}{L}\right) \quad (2.2)$$

O que diferencia as ondas de tosamento e alquebramento é que elas estão em contra fase, ou seja, a parcela é somada ou subtraída para gerar as respectivas alterações no campo de flutuação.

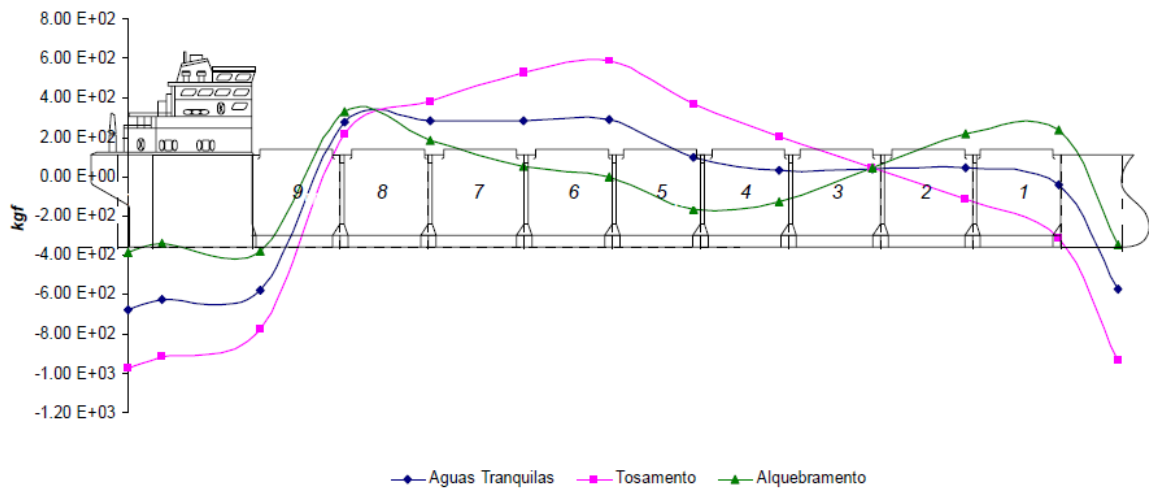
$$T(x) = T_m + \left(\frac{L}{2} - x\right) \tan(\phi) - A \cos\left(2\pi \frac{x}{L}\right) \quad (2.3)$$

Por fim, conforme já mencionado, em problemas estruturais pode-se considerar que o valor de amplitude da onda crítica é dada por $L/40$. Onde L representa ao mesmo tempo o comprimento da onda e do navio.

2.1.4. Curva de carga [q(x)]

Estando o navio equilibrado, qualquer que seja a condição de mar, pode-se então determinar a curva de carga (Figura 2.5), como a resultante da diferença entre as curvas de flutuação e de pesos.

Figura 2.5 - Exemplo curva de carga



Fonte: Tancredi (2006)

Através da curva de carga é possível observar, para cada parcela do comprimento qual força prevalece, se de flutuação ou peso, o que defini se o convés da embarcação estará tracionado ou comprimido.

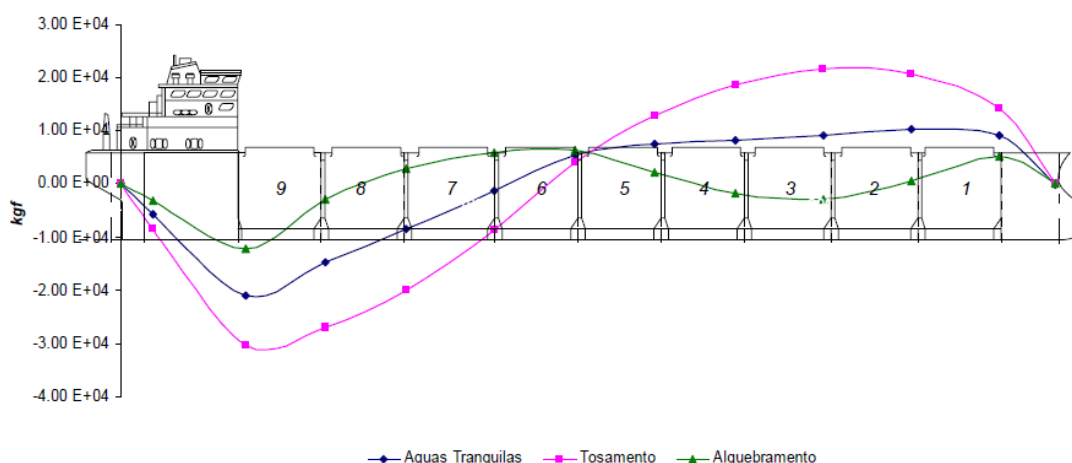
2.1.4. Curva de Força Cortante [Q(x)]

Com base na teoria simples de viga, e tendo a curva de carga é possível então calcular a curva de força cortante atuante na embarcação, conforme Equação 2.4.

$$Q(x) = \int_0^x q(x)dx \quad (2.4)$$

Isso quer dizer que o valor de Força Cortante para cada parcela analisada ao longo do comprimento da embarcação representa a soma das áreas abaixo da curva de cargas da popa até a posição analisada, respeitando-se sempre o sinal da curva de carga.

Figura 2.6 - Exemplo de curva de Força Cortante



Fonte: Tancredi (2006)

Pode-se observar na Figura 2.6 um exemplo de gráfico da curva de força cortante. Em geral as embarcações apresentam valor nulo de Força Cortante próximos a meia nau, e valor máximo próximos a $L/4$ e $3L/4$.

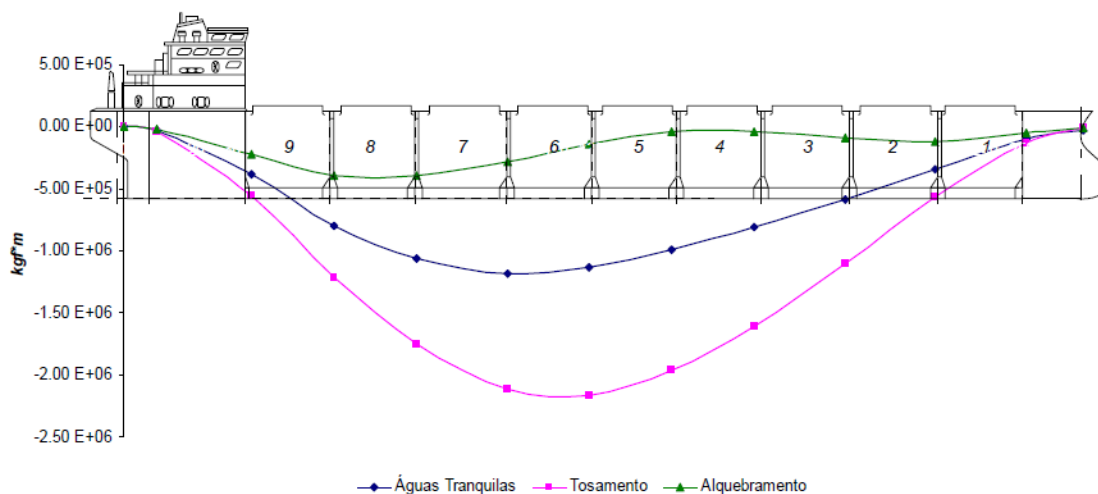
2.1.5. Curva de Momento Fletor [M(x)]

Por fim, com base na teoria de vigas e conhecendo a curva de força cortante, também é possível determinar a curva de Momento Fletor, como mostrado na Equação 2.5 e na Figura 2.7.

$$M(x) = \int_0^x Q(x) dx \quad (2.5)$$

Como pode-se notar na Figura 2.7, a curva de Momento Fletor tem maiores valores localizados a meia nau da embarcação.

Figura 2.7 - Exemplo de curva de Momento Fletor



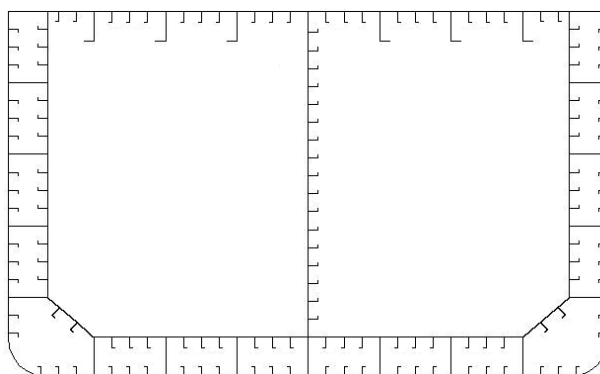
Fonte: Tancredi (2006)

Com isso conclui-se que as seções que serão mais solicitadas são as localizadas em $L/4$ e $3L/4$ devido a força cortante máxima atuante, e a meia nau, devido ao momento fletor máximo atuante.

2.2. SEÇÃO MESTRA

Os cálculos relacionados com a seção mestra são os mais importantes dentro da análise primária da estrutura, pois estes são os que geram resultados que indicam se a seção suportará os esforços oriundos do equilíbrio da viga navio.

Figura 2.8 - Exemplo de Seção Mestra



Fonte: Autor (2018)

A utilização de cascas finas reforçadas por grelhas ortogonais, composta de dois tipos de reforçadores longitudinais, é uma solução amplamente discutido na literatura para o projeto eficiente de estruturas leves, tal como as existentes em embarcações. Tal discussão foge ao escopo deste trabalho, mas pode ser vista por exemplo em, Hughes (1983) e Barabanov (1966).

Na Figura 2.8 é mostrado um exemplo de desenho de seção mestra, onde pode-se observar a presença de reforçadores leves e pesados, e vários painéis, percebe-se então que o cálculo das tensões geradas na seção pode ser bem complexo, dependendo do arranjo existente.

2.2.1. Cálculo das Propriedades da Seção

A primeira propriedade a ser determinada é também uma das mais importantes, trata-se da posição vertical da linha neutra da seção. A linha neutra corresponde ao eixo horizontal que passa pelo centro de massa da seção, sendo a posição onde a tensão normal tem valor nulo, passando de compressão para tração.

Assim, a posição da linha neutra nada mais é do que a componente vertical do centroide da seção, o qual é determinada através da Equação 2.6, que representa a média ponderada entre as áreas e o valor vertical do centroide de cada um dos n reforçadores e painéis que formam a seção.

$$y_{LN} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{e,i} y_{q,i})}{\sum_{i=1}^n A_{e,i}} \quad (2.6)$$

Tradicionalmente, a posição de referência para a o valor vertical do centroide de cada elemento é a quilha do navio.

Com o valor da posição vertical da linha neutra da seção determinado o próximo passo é encontrar o valor do momento de inércia da seção em relação a linha neutra. Como a seção pode ser formada de muitos elementos com y_q não coincidente a y_{LN} necessita-se o cálculo de um momento de inércia de transferência de cada elemento, feito através da Equação 2.7.

$$I_t = A_e (y_q - y_{LN})^2 \quad (2.7)$$

Além do momento de inércia de transferência também se faz necessário o cálculo do momento de inércia próprio de cada elemento, mostrado na Equação 2.8.

$$I_p = \frac{a^3 b}{12} \quad (2.8)$$

Vale ressaltar que os valores de a e b representam os valores das projeções, vertical e horizontal respectivamente, de cada elemento da seção.

Com esses valores de momento de inércia para cada elemento, calcula-se então o valor do momento de inércia da seção em relação a linha neutra, através da Equação 2.9.

$$I_{LN} = \sum_{i=1}^n (I_{p,i} + I_{t,i}) \quad (2.9)$$

Um vez calculadas as principais propriedades da seção da embarcação (a posição vertical da linha neutra e o momento de inércia em relação a linha neutra) pode-se utilizar no o cálculo da distribuição das tensões ao longo da estrutura primária do navio.

2.2.2. Cálculo da Tensão Normal

A tensão normal é gerada como resultado da aplicação do momento fletor na estrutura da embarcação, induzindo um campo de tensão ao longo da seção, passando da situação de compressão para a de tração, dependendo do tipo de onda e do carregamento do navio. O cálculo da tensão normal é feito através da equação 2.10.

$$\sigma_{xx} = \frac{M(y_q - y_{LN})}{I_{LN}} \quad (2.10)$$

A tensão será classificada como de compressão ou tração devido ao sinal resultante do valor de tensão, positivo ou negativo. Como a tensão depende diretamente do Momento Fletor, e este varia em relação a posição do comprimento

do navio, então o valor da tensão na estrutura varia em relação a posição x do comprimento, sendo expresso como $\sigma_{xx}(x)$.

2.2.3 Cálculo da Tensão Cisalhante

A tensão cisalhante decorre da aplicação da força cortante ao longo da estrutura. Para esse cálculo, faz-se necessário o cálculo do momento estático, realizado para cada elemento através da Equação 2.11.

$$M_{se} = A_e(y_q - y_{LN}) \quad (2.11)$$

Para usar o valor resultante do cálculo de momento estático é necessário fazer uma consideração de como o mesmo age no interior de cada elemento conectado da geometria da seção.

Em cada junção de elemento deve-se encontrar o valor de momento estático. Dependendo do tipo de geometria da seção, os momentos devem ser somados, acompanhando a mudança de direção da chapa, inclusive do caso de uma junção de duas ou mais chapas.

Após mapeados os pontos e encontrado o valor de momento estático para cada elemento, calcula-se então a tensão cisalhante de cada um desses pontos, através da equação 2.12.

$$\tau_{xy} = \frac{QM_{sp}}{I_{LN}t_p} \quad (2.12)$$

Como feito no cálculo da tensão normal, o valor da tensão cisalhante também pode ser gerado em função da posição de análise ao longo do comprimento da embarcação, devido ao fato da força cortante variar ao longo da mesma.

2.3 TENSÕES LOCAIS

A teoria geral de mecânica das estruturas navais considera ainda o cálculo das tensões locais sofridas na estrutura. Embora tal análise foge ao escopo definido para este trabalho, os conceitos fundamentais são mostrados nos apêndices A e B.

2.4. MÉTODO DA BISSECÇÃO

O método da Bissecção serve para encontrar o valor da raiz (x) de uma função $f(x)$, tal que $f(x_0)$ e $f(x_1)$ tenham sinais diferentes e $(x_0 < x < x_1)$. Por exemplo sejam x_0 e x_1 os valores iniciais que estabelecem a faixa de valores a serem testados, então o valor da raiz com certeza está nessa faixa $(x_0 < x < x_1)$.

Testando um novo valor, $x_2 = \frac{x_0+x_1}{2}$, e analisando o valor resultante da função $f(x_2)$ é possível saber se o valor da raiz está entre $(x_0 < x < x_2)$ ou $(x_2 < x < x_1)$. Dessa maneira ignora-se a faixa de valores em que se tem certeza de que a raiz não está contida e se repete o procedimento.

Fazendo isso várias vezes os valores de x_i se aproximam cada vez mais de x , e se determinado um valor de tolerância para o erro, encontra-se a raiz.

Esse procedimento é vital no desenvolvimento proposto e será utilizado na determinação do calado e do ângulo de trim correspondentes a condição de equilíbrio do navio.

3. METODOLOGIA

A realização deste trabalho visa o desenvolvimento de um programa que irá servir como ferramenta de cálculo para equilíbrio de navios e também para o desenho e análise da estrutura de um navio.

A ferramenta de programação utilizada no desenvolvimento do programa foi o Delphi, que utiliza a linguagem Pascal de programação. A escolha pelo Delphi não se deve a nenhum motivo a não ser manter a compatibilidade com os outros sistemas desenvolvidos no grupo de pesquisa Loopin (Laboratório de Otimização e Projeto Integrado), regularmente cadastrado junto a CAPES.

O programa utilizou modelos empíricos tradicionalmente empregados no estudo da mecânica estrutural de embarcações, os quais são baseados em clássicos modelos de mecânica dos sólidos.

O algoritmo automatizado de equilíbrio utiliza o algoritmo da bissecção para a determinação dos valores de calado e trim.

Os resultados do programa são mostrados tanto na forma de tabelas quanto na forma de gráficos, facilitando a verificação das análises.

Como técnica de verificação do programa, realizou-se quatro estudos de caso (cujas soluções analíticas são conhecidas) visando buscar eventuais inconsistências existentes no desenvolvimento do programa

4. DESENVOLVIMENTO: CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA

O novo programa busca ser uma forma de comparação de resultados vindos de cálculos resolvidos analiticamente, com os provenientes do programa. Busca também a facilitação da observação do que significa cada resultado alcançado. A estrutura da ferramenta é composta de três abas principais, chamadas de Equilíbrio da Viga Navio, Cálculos da Secção Mestra e Resultados, e através dessas abas o usuário pode realizar a inserção de dados e conferir as informações necessárias referentes ao cálculo executado.

4.1. EQUILÍBRIO DA VIGA NAVIO

Para efetuar o cálculo do equilíbrio da viga navio o usuário precisa seguir exatamente a mesma sequência de etapas do cálculo analítico. Os resultados dos cálculos são apresentados passo a passo, na forma de tabela ou desenhos a fim de detalhar os resultados facilitando a detecção de um possível erro nos cálculos analíticos ou então na modelagem realizada de problemas cuja resolução analítica é de extrema dificuldade, senão impossível.

4.1.1. Inserção dos Parâmetros do Navio

Na aba Equilíbrio da Viga Navio o usuário informará todos os parâmetros necessários para o cálculo do equilíbrio. No programa, esta etapa foi dividida em quatro partes, sendo elas, dimensões e parâmetros, peso morto, peso leve e distribuição de pesos.

Na parte dimensões e parâmetros devem ser informados, comprimento, boca, pontal e o volume específico da água, informados ao programa através de caixas de texto agrupadas e nomeadas, como mostrado na Figura 4.1

Figura 4.1 - Parte de inserção de dados da aba Equilíbrio

DADOS PRINCIPAIS

Massa esp. da água: kg/m³

Comprimento LOA: m

Pontal: m

Boca: m

Fonte: Autor (2018)

O peso morto do navio corresponde a parcela de peso que não desempenha função ou não agrega resistência estrutural. São considerados no programa como Peso Morto os pesos da carga e dos consumíveis. A carga é tudo aquilo que está sendo pago para ser transportado, seja líquido, sólido, gasoso ou vivo; e corresponde sempre a maior parcela do peso morto da embarcação. Os consumíveis são tudo que o navio transporta para uso durante a operação, como combustíveis, óleos lubrificantes e água potável. Na Figura 4.2 pode-se observar como é apresentada a inserção desses dados no programa.

Figura 4.2 - Parte de inserção de valores de peso morto

PESO MORTO

Consumíveis: t

Carga: t

Fonte: Autor (2018)

O peso leve engloba tudo aquilo que desempenha uma função ou agrega na resistência estrutural do navio. São considerados peso leve os pesos da superestrutura, casco, máquinas e outfit. A Superestrutura irá comportar todo o ambiente de convívio da tripulação, como cozinha, passadiço, dormitórios, banheiros, refeitórios, sala de reuniões, etc. O casco engloba toda a parte estrutural do navio, como chapas reforçadores leves, reforçadores pesados, anteparas etc. As máquinas, como o nome já diz, é a parcela de peso que as máquinas têm sobre o peso total do navio, sejam elas localizadas no convés, na sala de máquinas ou ao longo do resto do interior do navio, como por exemplo os geradores de energia elétrica, os motores de propulsão, exaustores de ar, bombas de água, bombas de combustíveis, etc. A parcela de outfit representa todos os equipamentos eletrônicos, ferramentaria e fiação

a bordo, como antenas, localizadores, sonares, rádio comunicadores, GPS, ancoras, etc. Os valores de cada item do peso leve são informados analogamente ao peso morto, caixas de texto nomeadas da maneira como mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Parte inserção de valores de peso leve

PESO LEVE

Super Estrutura: t

Máquinas: t

Casco: t

Outfit: t

Fonte: Autor (2018)

Na parte de distribuição de peso, o usuário informa como os pesos são distribuídos ao longo do comprimento da embarcação. Os pesos do casco e de outfit já são considerados distribuídos uniformemente ao longo da embarcação, ou seja, resta informar ao programa a distribuição da carga, da praça de máquinas, da superestrutura e dos consumíveis. Isso é informado indicando o ponto inicial e final de cada um ao longo do comprimento da embarcação tendo como base a popa. A inserção desses dados é realizada pela parte da interface mostrada na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Parte de inserção de valores de distribuição de pesos

DISTRIBUIÇÃO DE PESO

Praça de máquinas: de até m

Super Estrutura: de até m

Consumíveis: de até m

Carga: de até m

Fonte: Autor (2018)

A distribuição do peso de carga no programa considera o navio, sendo ele para o transporte de qualquer produto, como tendo apenas um compartimento de carga, ou por outro ponto de vista, tendo vários compartimentos carregados com a mesma quantidade de produto. Ou seja, dada a informação da distância em que a carga se localiza esta então será distribuída uniformemente nesta região, impossibilitando um

carregamento variável de supostos compartimentos que a região delimitada para receber a carga poderia ser dividida.

A localização dos pesos é a última etapa de inserção de dados para o cálculo de equilíbrio da viga navio. Com esses dados o programa já pode efetuar os cálculos obtendo a distribuição de peso, calado, força cortante e momento fletor em cada parcela ao longo do navio da viga navio ainda não equilibrada.

4.1.2 Curva de flutuação

Inicialmente a curva de flutuação é gerada seguindo a hipótese descrita na fundamentação teórica, de que a flutuação de uma baliza pode ser aproximada pela multiplicação da boca molhada do navio, pelo calado na baliza e pelo coeficiente de bloco do navio.

No entanto, a geometria do casco pode ser incluída no programa definindo-se a posição vertical da quilha ao longo do comprimento do navio $Z(x)$. Essa possibilidade permite analisar geometrias tridimensionais de casco, que se aproximam mais dos navios reais. A posição vertical da quilha defini uma nova correção no calado da embarcação realizada a partir da Equação 2.13:

$$T(x)_{real} = T(x)_{geométrico} - Z(x)_{real} \quad (2.13)$$

É importante observar que em todos os casos onde o calado real resulta em um número negativo, o programa considera uma flutuação nula. A interpretação física neste caso, é que na realidade, um calado negativo indica que, neste ponto, a água está passando por baixo do casco.

4.1.3. Cálculos da Viga Navio

Com os parâmetros já apresentados ao programa realizam-se os cálculos que resultam valores de calado, carga, força cortante e momento fletor para cada parcela de comprimento da embarcação.

Como já apresentado na fundamentação teórica deste trabalho esses cálculos quando feitos analiticamente utilizam de integrais para realizar a soma de resultados em cada parcela, isto é, consideram que as mesmas são de tamanho infinitesimal

gerando um número partições tendendo ao infinito. Com isso e sabendo que quanto maior o número de partições menor será o erro gerado, o resultado será um valor exato. No programa, o navio analisado será sempre dividido em parcelas de tamanho fixo de um metro, ou seja, quanto maior o comprimento do navio, menor o erro associado. Em versões futuras, pretende-se implementar a opção de que o usuário poderá definir a discretização usada na modelagem do problema.

No interior do programa cada trecho do comprimento do navio, será considerada como um elemento de vetor. Assim sempre que algo esteja sendo calculado e um resultado precise ser salvo ou manipulado, este será atribuído a um elemento de vetor, e o vetor será composto apenas de valores com a mesma finalidade.

4.1.2.1. Pesos

Para os cálculos de distribuição de pesos por exemplo são criados vetores representando cada tipo de peso, consumíveis, superestrutura, casco, máquinas, outfit ou carga. Estes variam de tamanho dependendo do tamanho do navio, ou seja, o número de elementos é igual ao valor inteiro do comprimento do navio, pois cada elemento do vetor representa um metro da embarcação.

Com a inserção de dados dos pesos e suas respectivas localizações, é atribuído a cada elemento de vetor seu respectivo valor de peso, resultante da divisão do valor total do peso pela distância em que este está localizado. Caso a localização que o elemento do vetor representa está fora da região em que o peso é distribuído este recebe valor zero. Assim tem-se ao valor de cada tipo de peso para cada metro do comprimento da embarcação. Isso possibilita a soma dos elementos desses vetores, gerando um novo vetor que armazena o valor total de peso por metro do comprimento do navio, chamado de vetor pesos.

Através da interface do programa os valores dos elementos de cada vetor são mostrados em uma tabela, mostrada na Figura 4.5. Esta é apenas uma parte desta tabela e mostra as colunas que representam os vetores até então gerados.

Figura 4.5 - Parte de distribuição de pesos da Tabela Equilíbrio

Posição	Consumíveis	Super Estrutura	Peso Casco	Máquinas	Outfit	Carga
0.5	0	0	88.11	0	5.99	0
1.5	0	0	88.11	0	5.99	0
2.5	0	0	88.11	0	5.99	0
3.5	0	0	88.11	0	5.99	0
4.5	0	0	88.11	0	5.99	0
5.5	0	0	88.11	0	5.99	0
6.5	0	0	88.11	0	5.99	0
7.5	0	0	88.11	0	5.99	0
8.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0
9.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0
10.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0
11.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0
12.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0
13.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0
14.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0

Fonte: Autor (2018)

Esta tabela visa facilitar a observação de como os pesos se distribuem, tornando o processo de verificação e localização de erros mais fáceis.

Observa-se que a posição de um trecho de um metro do navio é sempre tomada a partir da posição central do trecho. Essa estratégia aumenta a precisão durante o processo de integração numérica, pois se aproxima mais da realidade.

4.1.2.2. Calado

A partir da determinação do calado da embarcação os cálculos de equilíbrio de viga navio começam a se tornar mais complexos. O calado indica o valor em unidades de comprimento da diferença entre a linha d'água até a quilha, ponto mais profundo do navio.

Como feito para os valores de peso pode-se gerar valores de calado ao longo do comprimento da embarcação e atribuí-los como elementos de vetor. Assim tem-se um vetor, onde cada elemento representa um valor de calado por metro de navio. Esses valores são apresentados na interface do programa na mesma tabela em que a distribuição de pesos, conforme mostra a Figura 4.6.

Figura 4.6 - Tabela Equilíbrio com valores de Calado

Posição	Consumíveis	Super Estrutura	Peso Casco	Máquinas	Outfit	Carga	T(x) SO
0.5	0	0	88.11	0	5.99	0	11.85
1.5	0	0	88.11	0	5.99	0	11.87
2.5	0	0	88.11	0	5.99	0	11.89
3.5	0	0	88.11	0	5.99	0	11.92
4.5	0	0	88.11	0	5.99	0	11.94
5.5	0	0	88.11	0	5.99	0	11.96
6.5	0	0	88.11	0	5.99	0	11.98
7.5	0	0	88.11	0	5.99	0	12
8.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0	12.02
9.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0	12.04
10.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0	12.06
11.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0	12.08
12.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0	12.1
13.5	0	0	88.11	14.08	5.99	0	12.13

Fonte: Autor (2018)

O calado se mostra importante pois através dele pode-se simular como é a passagem da onda através do casco da embarcação, basta uma correção na equação de determinação do mesmo adicionando parâmetros de fase e comprimento de onda, quando apresentados em forma de gráfico, esses valores de calado geram uma curva que representa a passagem da onda ao longo do casco do navio.

4.1.2.3. Tosamento e Alquebramento

Conhecidos os valores do vetor calado apenas com correção devido ao trim da embarcação, conforme Equação 2.1 da fundamentação teórica deste trabalho, são gerados vetores paralelos a ele, chamados de vetores calado Tosamento e calado Alquebramento. São vetores que armazenam valores de calado corrigidos através das Equações 2.2, para onda de Tosamento e 2.3, para onda de Alquebramento.

As ondas de Tosamento e Alquebramento foram determinadas considerando que esses representam os piores casos de onda que o navio pode enfrentar quando em serviço. O comprimento de onda foi considerado como sendo o próprio

comprimento da embarcação. Por fim, a fase de onda é o que diferencia as duas condições de mar, pois as ondas encontram-se em contra fase, ou seja, visivelmente onde se localiza a cava de uma está a crista de outra.

A partir deste ponto, todos os vetores que envolvem cálculos associados a viga navio, terão vetores paralelos contendo os valores dos cálculos para as duas situações críticas de onda, ou seja, junto com o vetor de valores para a situação de mar calmo, chamada de Sem Onda ('SO'), geram-se mais dois vetores, são eles Tosamento ('TOS') e Alquebramento ('ALQ').

Todos esses vetores são dependentes diretamente do calado e por isso necessitam considera-se um vetor calado para cada um dos casos analisados (mar calmo, alquebramento e tosamento). Todos os vetores serão mostrados na interface do programa através da mesma tabela, indicados pela situação de onda em que foram calculados, como mostra a Figura 4.7 com detalhe em vermelho, vetor calado para situações Sem Onda e Tosamento.

Figura 4.7 - Valores de calado para diferentes condições de mar

Posição	T(x) SO	p(x) SO	b(x) SO	q(x) SO	Q(x) SO	M(x) SO	T(x) TOS	p(x) TOS	b(x) TOS
0.5	11.85	94.1	557.72	-463.62	-463.62	-463.62	18.88	94.1	888.1
1.5	11.87	94.1	558.71	-464.61	-928.24	-1391.86	18.89	94.1	888.1
2.5	11.89	94.1	559.7	-465.6	-1393.84	-2785.7	18.9	94.1	889.1
3.5	11.92	94.1	560.69	-466.59	-1860.43	-4646.13	18.9	94.1	889.1
4.5	11.94	94.1	561.67	-467.58	-2328	-6974.13	18.9	94.1	889.1
5.5	11.96	94.1	562.66	-468.56	-2796.57	-9770.69	18.9	94.1	889.1
6.5	11.98	94.1	563.65	-469.55	-3266.12	-13036.81	18.9	94.1	889.1
7.5	12	94.1	564.64	-470.54	-3736.66	-16773.47	18.89	94.1	888.1
8.5	12.02	108.18	565.63	-457.45	-4194.11	-20967.59	18.88	108.18	888.1
9.5	12.04	108.18	566.61	-458.44	-4652.55	-25620.14	18.86	108.18	887.1
10.5	12.06	108.18	567.6	-459.43	-5111.98	-30732.12	18.84	108.18	886.1
11.5	12.08	108.18	568.59	-460.42	-5572.39	-36304.51	18.82	108.18	885.1
12.5	12.1	108.18	569.58	-461.4	-6033.8	-42338.31	18.79	108.18	884.1
13.5	12.13	108.18	570.57	-462.39	-6496.19	-48834.5	18.76	108.18	882.1

Fonte: Autor (2018)

A maneira para diferenciar os vetores na tabela foi o uso de identificadores SO, TOS e ALQ, que são os valores dos vetores em condições Sem Onda, Tosamento e Alquebramento respectivamente. Na Figura 4.7 é possível a percepção da diferença de valores dos dois vetores, devido a correção.

Ao longo de todo o trabalho a representação gráfica dos vetores em condição Sem Onda, Tosamento e Alquebramento utilizarão as cores Azul, Vermelha e Verde, respectivamente

4.1.2.4. Flutuação

A flutuação, ou empuxo, é a força que a água gera para manter o navio equilibrado, resultante do produto da área da baliza, sua localização ao longo do navio e o volume específico da água de onde o mesmo de encontra.

O novo programa não considera como parâmetro de entrada a equação da SAC (Curva de Área Seccional), que indica o exato valor da área da seção ao longo da embarcação. Com isso, é feita uma aproximação de cada valor de área através do produto dos valores de boca, pontal e coeficiente de bloco do navio. Esse valor de área resultante é satisfeito para os cálculos estruturais e a implementação da equação SAC ao programa serve como um futuro aprimoramento.

Com o valor de área aproximado é feito então o cálculo para determinação da flutuação por metro de navio, e sabendo que esta depende diretamente do valor de calado surge a necessidade da criação de mais três vetores para armazenamento dos resultados. Vetores Flutuação em condições de mar Sem Onda, Tosamento e Alquebramento, que podem ser observados detalhadamente através da interface do programa na mesma tabela de valores da Aba Equilíbrio da viga Navio, como mostrado na Figura 4.8.

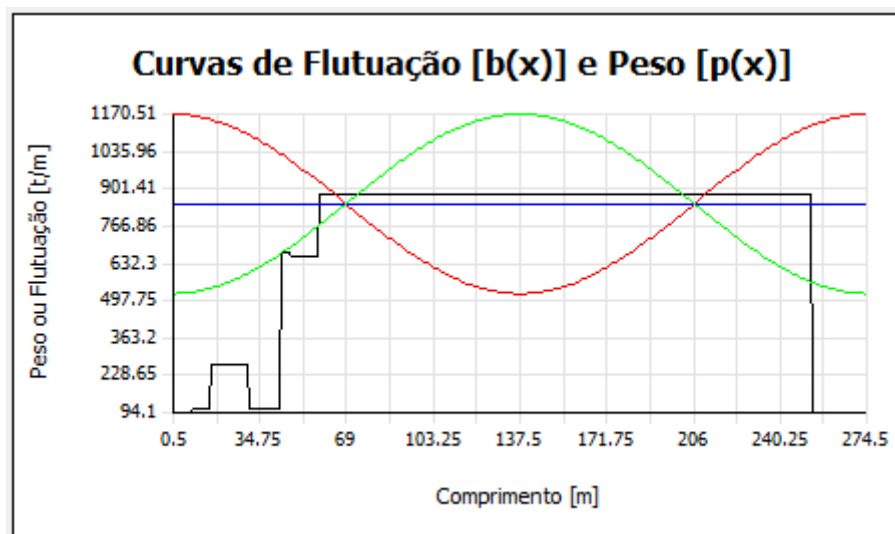
Figura 4.8 – Valores de Flutuação para diferentes condições de mar

$p(x)$ SO [t/m]	$b(x)$ SO [t/m]	$q(x)$ SO [t/m]	$Q(x)$ SO [t]	$M(x)$ SO [t ² m]	$T(x)$ TOS [m]	$p(x)$ TOS [t/m]	$b(x)$ TOS [t/m]	$q(x)$ TOS [t/m]	Q
94.1	847	-752.9	-752.9	-752.9	24.87	94.1	1170.49	-1076.39	-
94.1	847	-752.9	-1505.81	-2258.71	24.87	94.1	1170.32	-1076.22	-
94.1	847	-752.9	-2258.71	-4517.43	24.86	94.1	1169.98	-1075.88	-
94.1	847	-752.9	-3011.62	-7529.04	24.85	94.1	1169.48	-1075.38	-
94.1	847	-752.9	-3764.52	-11293.57	24.84	94.1	1168.8	-1074.7	-
94.1	847	-752.9	-4517.43	-15810.99	24.82	94.1	1167.96	-1073.86	-
94.1	847	-752.9	-5270.33	-21081.32	24.8	94.1	1166.95	-1072.85	-
94.1	847	-752.9	-6023.24	-27104.56	24.77	94.1	1165.77	-1071.67	-
108.18	847	-738.83	-6762.06	-33866.62	24.75	108.18	1164.43	-1056.25	-
108.18	847	-738.83	-7500.89	-41367.51	24.71	108.18	1162.92	-1054.74	-1
108.18	847	-738.83	-8239.72	-49607.23	24.68	108.18	1161.25	-1053.07	-1
108.18	847	-738.83	-8978.55	-58585.78	24.64	108.18	1159.41	-1051.23	-1
108.18	847	-738.83	-9717.37	-68303.15	24.6	108.18	1157.41	-1049.23	-
108.18	847	-738.83	-10456.2	-78759.35	24.55	108.18	1155.24	-1047.07	-1

Fonte: Autor (2018)

Na Figura 4.8 estão sendo destacados e mostrados apenas os valores dos Vetores Flutuação das condições Sem Onda e Tosamento porque a coluna da condição de Alquebramento se localiza mais adiante na rolagem da barra horizontal da tabela. Para melhor visualização dos resultados criou-se um gráfico mostrado na interface do programa como mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Gráfico Curvas Peso e Flutuação



Fonte: Autor (2018)

Como observado na Figura 4.9, junto com as Curvas de Flutuação é apresentada a Curva de Peso, essa decisão foi tomada por dois motivos: economizar espaço na interface do programa visto que os valores dos Vetores Peso possuem a mesma unidade de medida que os de Flutuação e também porque os Vetores Peso possuem os mesmos valores nas três condições de mar, ou seja, a Curva de Pesos apesar de parecer única é a sobreposição de três curvas, e por isso foi exclusivamente representada pela cor preta.

4.1.2.5. Cargas

Como já visto os valores de Peso representam as forças empregadas sobre o navio por metro de comprimento, já os valores de Flutuação representam as forças que a água gera ao casco do mesmo. Essas forças agem em sentidos contrários fazendo com que o navio se mantenha na superfície da água.

$$q(x) = p(x) - b(x) \quad (2.14)$$

Para analisar como acontece a distribuição da diferença entre essas forças é então criado o Vetor de Carga (Equação 2.14), onde são salvos os valores da subtração dos valores de cada elemento do Vetor Peso pelo de Flutuação. Esse vetor

também é gerado nas três condições de mar e adicionado a Tabela da aba Equilíbrio da interface do programa como mostrado na Figura 4.10.

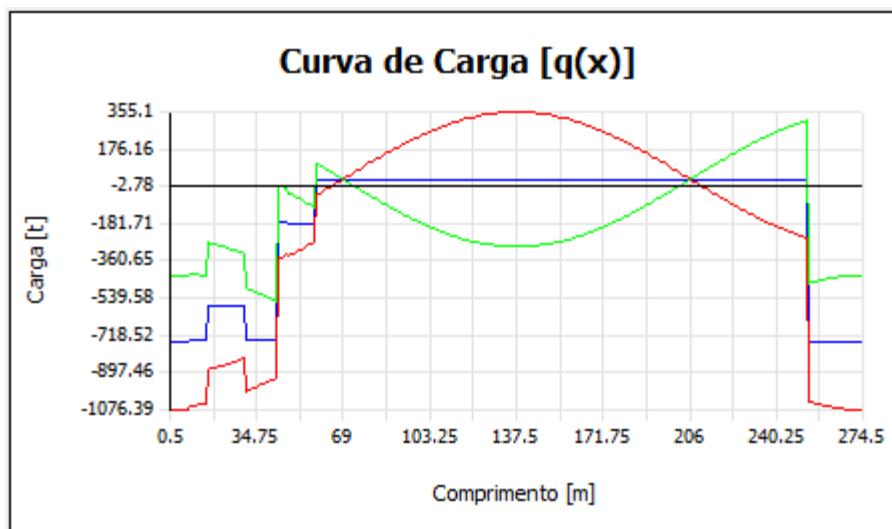
Figura 4.10 – Valores de Carga para diferentes condições de mar

b(x) SO [t/m]	q(x) SO [t/m]	Q(x) SO [t]	M(x) SO [t*m]	T(x) TOS [m]	p(x) TOS [t/m]	b(x) TOS [t/m]	q(x) TOS [t/m]	Q(x) TOS [t]
847	-752.9	-752.9	-752.9	24.87	94.1	1170.49	-1076.39	-1076.39
847	-752.9	-1505.81	-2258.71	24.87	94.1	1170.32	-1076.22	-2152.61
847	-752.9	-2258.71	-4517.43	24.86	94.1	1169.98	-1075.88	-3228.5
847	-752.9	-3011.62	-7529.04	24.85	94.1	1169.48	-1075.38	-4303.88
847	-752.9	-3764.52	-11293.57	24.84	94.1	1168.8	-1074.7	-5378.58
847	-752.9	-4517.43	-15810.99	24.82	94.1	1167.96	-1073.86	-6452.44
847	-752.9	-5270.33	-21081.32	24.8	94.1	1166.95	-1072.85	-7525.29
847	-752.9	-6023.24	-27104.56	24.77	94.1	1165.77	-1071.67	-8596.97
847	-738.83	-6762.06	-33866.62	24.75	108.18	1164.43	-1056.25	-9653.22
847	-738.83	-7500.89	-41367.51	24.71	108.18	1162.92	-1054.74	-10707.97
847	-738.83	-8239.72	-49607.23	24.68	108.18	1161.25	-1053.07	-11761.04
847	-738.83	-8978.55	-58585.78	24.64	108.18	1159.41	-1051.23	-12812.27
847	-738.83	-9717.37	-68303.15	24.6	108.18	1157.41	-1049.23	-13861.5
847	-738.83	-10456.2	-78759.35	24.55	108.18	1155.24	-1047.07	-14908.57

Fonte: Autor (2018)

Através da Figura 4.10 é possível observar alguns valores negativos nos elementos do Vetor Carga, isso se deve a regiões ao longo do comprimento do casco onde o valor do empuxo é maior, indicando as regiões onde o navio é sustentado pela força de empuxo, onde ela é mais operante. Para melhor observação desses resultados foi criado na interface o gráfico das Curvas de Carga, como mostra a Figura 4.11.

Figura 4.11 - Gráfico da Curva de Cargas



Fonte: Autor (2018)

Para um navio equilibrado, a soma dos valores das áreas abaixo da Curva de Carga deve resultar zero.

4.1.2.6. Força Cortante

Sabendo que o Vetor Carga é resultante das forças Peso e Flutuação agindo em direções contrárias verticalmente, conclui-se que esse gera uma Força cortante na seção.

Sabe-se da Equação 2.4 da fundamentação teórica deste trabalho que os valores de Força Cortante são resultados da soma dos produtos entre os valores de carga e a parcela de comprimento que esta força está concentrada. Como os cálculos do programa estão sendo feitos através de operações entre elementos de vetores, e, cada parcela tem comprimento de um metro, a determinação do Vetor de Força Cortante se dá pela soma dos elementos do Vetor Carga. Cada elemento do Vetor Força Cortante armazena a soma de todos os elementos do Vetor Carga anteriores a aquela posição no vetor, como mostrado na Figura 4.12.

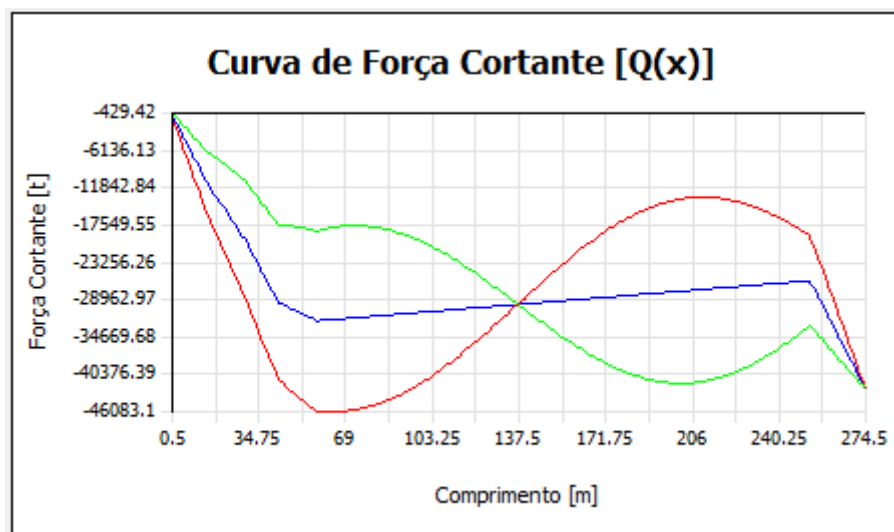
Figura 4.12 – Valores de Força Cortante para diferentes condições de mar

$q(x)$ SO [t/m]	$Q(x)$ SO [t]	$M(x)$ SO [t ² m]	$T(x)$ TOS [m]	$p(x)$ TOS [t/m]	$b(x)$ TOS [t/m]	$q(x)$ TOS [t/m]	$Q(x)$ TOS [t]	$M(x)$ TC [t ² m]
-752.9	-752.9	-752.9	24.87	94.1	1170.49	-1076.39	-1076.39	-1076.3
-752.9	-1505.81	-2258.71	24.87	94.1	1170.32	-1076.22	-2152.61	-3229
-752.9	-2258.71	-4517.43	24.86	94.1	1169.98	-1075.88	-3228.5	-6457.
-752.9	-3011.62	-7529.04	24.85	94.1	1169.48	-1075.38	-4303.88	-10761.
-752.9	-3764.52	-11293.57	24.84	94.1	1168.8	-1074.7	-5378.58	-16139.
-752.9	-4517.43	-15810.99	24.82	94.1	1167.96	-1073.86	-6452.44	-22592
-752.9	-5270.33	-21081.32	24.8	94.1	1166.95	-1072.85	-7525.29	-30117
-752.9	-6023.24	-27104.56	24.77	94.1	1165.77	-1071.67	-8596.97	-38714.
-738.83	-6762.06	-33866.62	24.75	108.18	1164.43	-1056.25	-9653.22	-48367.
-738.83	-7500.89	-41367.51	24.71	108.18	1162.92	-1054.74	-10707.97	-59075.
-738.83	-8239.72	-49607.23	24.68	108.18	1161.25	-1053.07	-11761.04	-70836.
-738.83	-8978.55	-58585.78	24.64	108.18	1159.41	-1051.23	-12812.27	-83649.
-738.83	-9717.37	-68303.15	24.6	108.18	1157.41	-1049.23	-13861.5	-97510.
-738.83	-10456.2	-78759.35	24.55	108.18	1155.24	-1047.07	-14908.57	-112419

Fonte: Autor (2018)

Analogamente aos outros vetores este também é gerado para as três condições de mar. Os resultados são mostrados através da tabela da aba equilíbrio e do gráfico Curva de Força Cortante de novo para as três condições de mar, mostrado na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Gráfico das Curvas de Força Cortante



Fonte: Autor (2018)

Com o navio ainda não equilibrado é possível observar no Figura 4.13 que a Força Cortante no último ponto resulta em um valor negativo, isso quer dizer que a soma dos valores de carga não está zerando, sendo a flutuação muito mais efetiva nesse caso, um desequilíbrio, pois como se trata de viga não apoiada a mesma deve se auto sustentar.

Os valores de Força Cortante obtidos são muito importantes para a análise pois serão utilizados para calcular a Tensão Cisalhante agindo na seção

4.1.2.7. Momento Fletor

O navio está sendo considerado como uma viga de extremidades livre-livre navegando sobre a água. Como ela não está apoiada em nada para que se mantenha na superfície da água precisa se auto sustentar. Como as forças que agem sobre a estrutura não são uniformes, logo Momentos Fletores começam a aparecer como mais um esforço agindo na embarcação.

Como feito para a determinação do Vetor Força Cortante será feito para a determinação do Vetor Momento Fletor, a soma dos elementos de um vetor. O vetor que a soma resulta no Valor de Momento Fletor é o de Força Cortante, conforme mostrado a Equação 2.5 da fundamentação teórica deste trabalho.

Feito elemento por elemento o resultado do cálculo gera o Vetor Momento Fletor que é mostrado na interface também na tabela da aba Equilíbrio, sendo o último elemento que a compõe, como mostra a Figura 4.14.

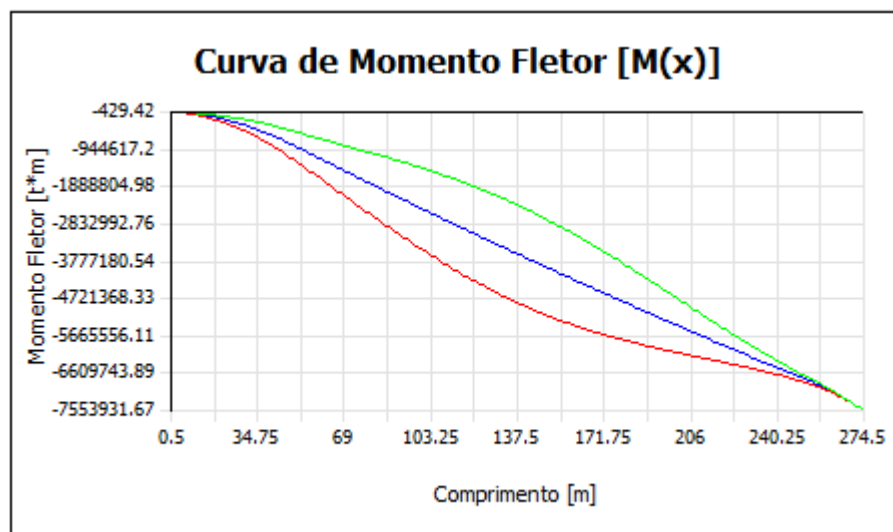
Figura 4.14 - Valores Momento Fletor para diferentes condições de mar

Q(x) SO [t]	M(x) SO [t*m]	T(x) TOS [m]	p(x) TOS [t/m]	b(x) TOS [t/m]	q(x) TOS [t/m]	Q(x) TOS [t]	M(x) TOS [t*m]	T(x) [t]
-752.9	-752.9	24.87	94.1	1170.49	-1076.39	-1076.39	-1076.39	11
-1505.81	-2258.71	24.87	94.1	1170.32	-1076.22	-2152.61	-3229	11
-2258.71	-4517.43	24.86	94.1	1169.98	-1075.88	-3228.5	-6457.5	11
-3011.62	-7529.04	24.85	94.1	1169.48	-1075.38	-4303.88	-10761.38	11
-3764.52	-11293.57	24.84	94.1	1168.8	-1074.7	-5378.58	-16139.96	11
-4517.43	-15810.99	24.82	94.1	1167.96	-1073.86	-6452.44	-22592.4	11
-5270.33	-21081.32	24.8	94.1	1166.95	-1072.85	-7525.29	-30117.7	11
-6023.24	-27104.56	24.77	94.1	1165.77	-1071.67	-8596.97	-38714.66	11
-6762.06	-33866.62	24.75	108.18	1164.43	-1056.25	-9653.22	-48367.89	11
-7500.89	-41367.51	24.71	108.18	1162.92	-1054.74	-10707.97	-59075.85	11
-8239.72	-49607.23	24.68	108.18	1161.25	-1053.07	-11761.04	-70836.89	11
-8978.55	-58585.78	24.64	108.18	1159.41	-1051.23	-12812.27	-83649.16	11
-9717.37	-68303.15	24.6	108.18	1157.41	-1049.23	-13861.5	-97510.66	11
-10456.2	-78759.35	24.55	108.18	1155.24	-1047.07	-14908.57	-112419.23	11

Fonte: Autor (2018)

Da mesma maneira como feito para outros vetores, foram gerados três vetores para o esforço de Momento, nas condições de mar estudadas. Com todos esses valores de Momento é possível a apresentação por meio de gráfico, como mostra a Figura 4.15.

Figura 4.15 – Gráfico de Curvas de Força Cortante



Fonte: Autor (2018)

Observa-se claramente que o valor final da soma não está resultando em zero, e como na análise da Força Cortante, indica que o navio não está equilibrado.

4.1.3. Algoritmo de Equilíbrio

A análise da viga Navio está agora mais clara pois através dos gráficos e da tabela gerada é possível consultar todas as informações necessárias para determinar o equilíbrio do navio.

O problema agora está em criar uma maneira de calcular o equilíbrio da viga navio, pois como os gráficos mostram este ainda não atingiu essa condição, apresentando valores ainda não reais.

Para que o navio esteja em equilíbrio duas condições envolvendo a física do problema devem ser satisfeitas.

A primeira condição diz que o valor do Peso Total da embarcação deve ser exatamente igual ao valor de Empuxo que a água impõe ao mesmo. Conforme o navio for sendo carregado o valor de empuxo vai se ajustando ao valor do peso, assim os valores vão se igualando e o mesmo permanece sem problemas na superfície da água. Porém em alguns casos essa situação pode ser diferente, por exemplo, o navio é carregado com um produto de massa específica maior que o da água onde esse se encontra; se o carregamento for demasiado, o peso gerado se torna maior que o valor de empuxo levando ao afundamento da embarcação.

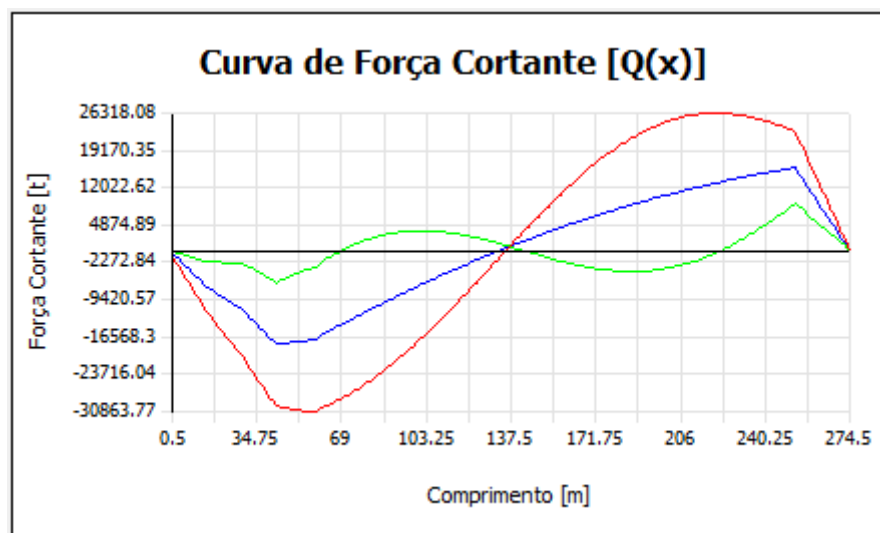
A segunda condição diz que a posição longitudinal do centro de gravidade (LCG) deve estar localizado exatamente no mesmo ponto que a posição longitudinal do centro de empuxo. Quando o navio sofre uma condição onde LCG muda de posição, LCB a acompanha, se igualando automaticamente devido a força de empuxo. Porém caso LCG seja alterada para uma condição onde LCB não consiga alcançar o estado de equilíbrio a embarcação emborca causando seu afundamento. Um exemplo de alteração de LCG impossível de ser igualada por LCB é o carregamento demasiado na região da popa ou da proa do navio.

Caso as condições não estejam satisfeitas, duas alterações devem ser executadas no valor dos parâmetros de Calado Médio (T_m) e Ângulo de Trim (ϕ), fornecidos para os cálculos.

Conforme visto na Equação 2.1 da Fundamentação Teórica deste trabalho esses parâmetros são até então fornecidos de forma aleatória, como uma suposição de que estão corretos. Após os cálculos e geração dos gráficos é possível notar que a embarcação não está em equilíbrio pois o valor dos últimos elementos dos Vetores Força Cortante e Momento Fletor não são iguais a zero.

Para alcançar a primeira condição de equilíbrio deve-se alterar o valor de Calado Médio até que o valor do último elemento do Vetor Força Cortante seja zero. Isso acarreta a alteração dos valores de Momento Fletor, modificando a situação da segunda condição de equilíbrio. É possível identificar a primeira condição de equilíbrio satisfeita observando o Gráfico da Curva de Força Cortante, onde as curvas das três condições de mar resultam num valor zero na posição de maior comprimento do navio, conforme mostra a Figura 4.16.

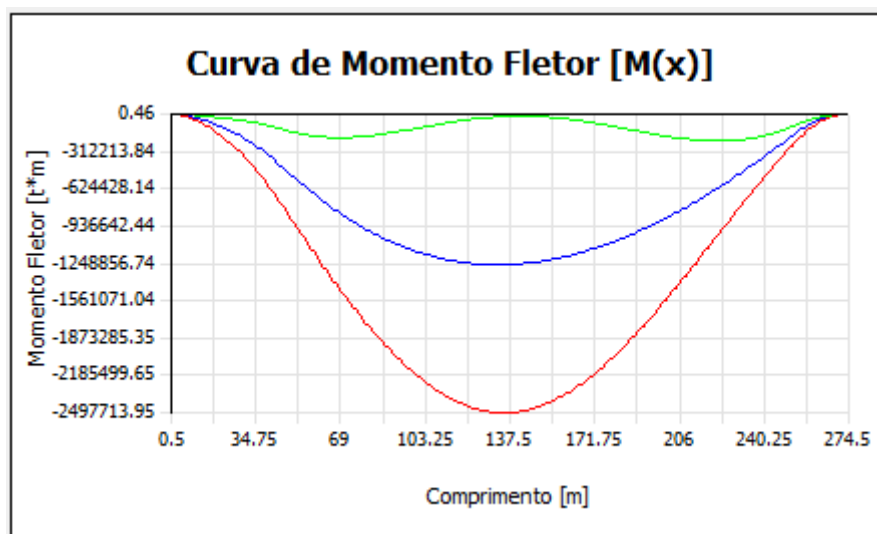
Figura 4.16 – Gráfico de Curvas de Força Cortante equilibradas



Fonte: Autor (2018)

Para alcançar a segunda condição de equilíbrio deve-se alterar o valor do Ângulo de Trim até que o valor do último elemento do Vetor Momento Fletor seja zero. Isso acarreta a alteração dos valores de Força Cortante, modificando a situação da primeira condição de equilíbrio. É possível identificar a segunda condição de equilíbrio satisfeita observando o Gráfico da Curva de Momento Fletor, onde as curvas das três condições de mar resultam num valor zero na posição de maior comprimento do navio, conforme mostra a Figura 4.17.

Figura 4.17 – Gráfico de Curvas de Momento Fletor equilibradas



Fonte: Autor (2018)

Com isso tem-se um processo iterativo para o equilíbrio da viga navio, ou seja, satisfazendo a primeira condição altera-se a segunda, e vice-versa. Felizmente se feito várias vezes, esse processo converge para um resultado onde ambas as condições são atendidas.

Para tornar o algoritmo de cálculo mais rápido usou-se o método da Bissecção para a determinação do Calado Médio e do Ângulo do Trim que zeram os valores de Força Cortante e Momento Fletor.

O método da Bissecção torna o cálculo mais rápido porque a cada valor testado, elimina-se metade da lista de valores que deveriam ser também testados, evitando ao programa o cálculo com todos os valores, como explicado na seção 2.3 deste trabalho.

O primeiro cálculo usando Bissecção é feito para zerar a Força Cortante, testando valores de Calado Médio numa faixa de valores que vai de zero até o valor do Pontal da embarcação. O segundo cálculo é feito para zerar o Momento Fletor, testando valores do Ângulo de Trim numa faixa de valores que vai de -0,0523 até 0,0523rad, aproximadamente -3 até 3 graus.

Esse cálculo é repetido até que os valores de Calado Médio e Ângulo de Trim não se alterem mais significativamente, ficando fixados àqueles que zeram tanto o último valor de Força Cortante quanto Momento Fletor.

O mesmo é feito para as três condições de mar, resultando no equilíbrio da viga navio, podendo ser observado através dos gráficos da interface. Isso gera

resultados para Calado Médio e Ângulo de Trim da embarcação na condição de carregamento analisada.

Com o navio equilibrado, valores de Força Cortante e Momento Fletor máximos podem ser determinados varrendo os vetores dos mesmos para as três condições de mar.

4.1.4. Apresentação dos Resultados de Equilíbrio

A parte que finaliza a composição da Aba é onde são mostrados os valores resultantes de Calado Médio, Ângulo de Trim, Força Cortante e Momento Fletor Máximos e Mínimos, que eram os principais valores a serem determinados pelos cálculos referentes dessa Aba do programa. A parte pode ser observada na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Parte dos principais resultados da aba Equilíbrio

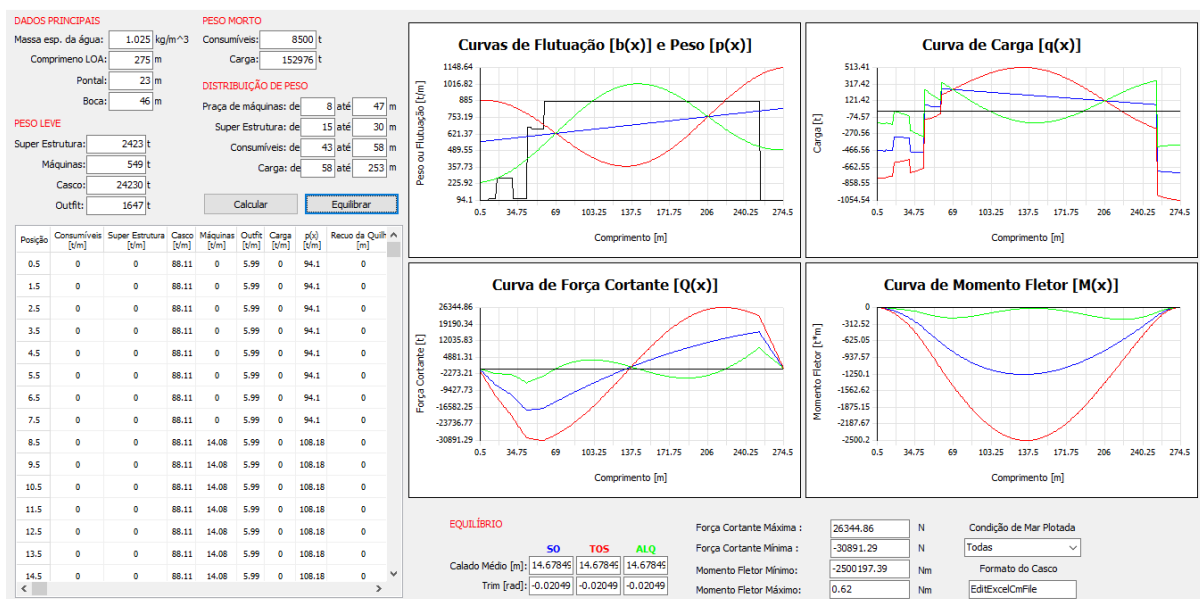
EQUILÍBRIO				Força Cortante Máxima :	26318.08	t
	SO	TOS	ALQ	Força Cortante Mínima :	-30863.77	t
Calado Médio [m]:	14.70790	14.70790	14.70790	Momento Fletor Mínimo:	-2497713.95	t*m
Trim [rad]:	-0.02053	-0.02053	-0.02053	Momento Fletor Máximo:	0.46	t*m

Fonte: Autor (2018)

Os indicadores das condições de mar estão cada um em uma cor para indicar ao usuário, qual cor representa cada uma das curvas do gráfico.

O conjunto dessas partes forma a Aba Equilíbrio, mostrada na Figura 4.19.

Figura 4.19 – Aba Equilíbrio



Fonte: Autor (2018)

4.2. DESENHO DA SEÇÃO

Para realizar os cálculos referentes a seção do Navio, foi desenvolvida uma maneira de observar o que está sendo feito através de uma representação gráfica. Essa representação gráfica da seção do navio além de facilitar a observação do arranjo estrutural, também auxilia na realização dos cálculos e na representação das tensões que estão sendo calculadas.

A representação da seção do navio é um processo complexo, onde a parte gráfica se une aos cálculos que geram informações onde o usuário de forma crítica decide onde deve alterar o projeto.

Vários métodos poderiam ser utilizados para guiar o usuário a gerar a representação da seção. Neste trabalho decidiu-se montar um passo a passo onde o usuário desenha a secção mapeando pontos por coordenadas nodais.

Através da interface da Aba Desenho de Seção, o usuário gera os pontos do desenho informando as coordenadas X e Y de cada ponto, ambas em metros. Estes são salvos e mostrados em uma lista, numerados de forma crescente. Através dessa lista o usuário consegue em qualquer momento acessar os pontos salvos. Estes pontos não aparecem no desenho da seção, apenas na tabela de pontos, mostrada na Figura 4.20.

Figura 4.20 – Tabela de Pontos

PONTOS:

x: m y: m

Ponto	X	Y
1	0	0
2	10	2
3	15	5
4	20	15
5	23	23

Ponto:

Fonte: Autor (2018)

O usuário pode editar um ponto adicionado através do botão 'Editar Ponto', indicando na caixa de texto 'Ponto' qual deve ser editado. O programa então atribui as informações contidas nas caixas de texto 'X' e 'Y' a esse ponto.

Com todos os pontos já salvos na lista o usuário pode então começar a gerar os painéis. Os painéis são gerados através dos pontos. O usuário indica dois pontos contidos na lista de pontos, sendo o primeiro o ponto inicial e o segundo o ponto final do painel. Junto dos pontos inicial e final é indicada a espessura em milímetros desse painel. Essas informações são salvas e mostradas na interface também através de uma tabela, onde os painéis são numerados na ordem crescente, apresentados pelo seu ponto inicial, final e espessura, mostrada na Figura 4.21.

Figura 4.21 – Tabela de Painéis

PAINÉIS:

P1: P2: t: mm

Painel	P1	P2	t
1	1	2	0.001
2	2	3	0.001
3	3	4	0.001
4	4	5	0.001
5	4	6	0.01

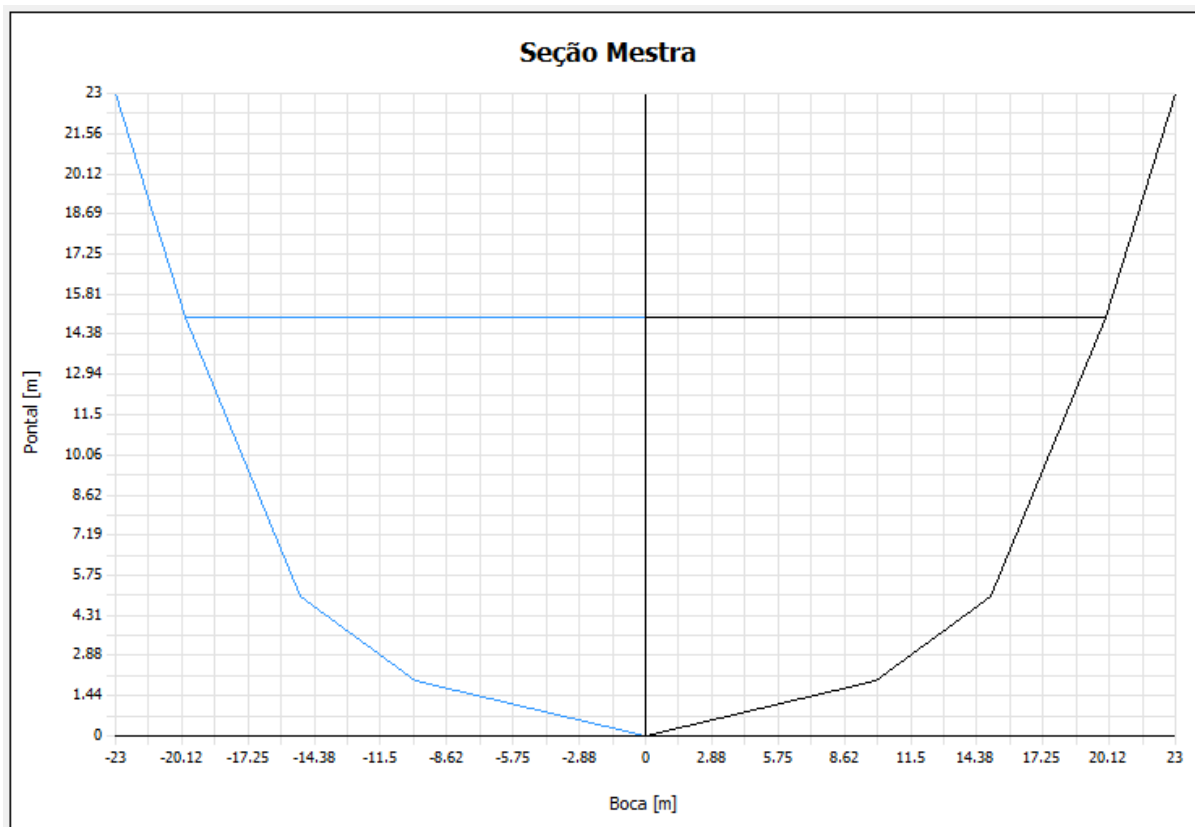
Número do Painel:

Fonte: Autor (2018)

Os painéis assim como os pontos são salvos como vetores no programa e podem ser editados. Da mesma maneira como feito para os pontos é feito para os painéis. O usuário indica qual o painel deve ser editado na caixa de texto 'Painel', então ao clique do botão 'Editar Painel', o painel indicado recebe as informações contidas nas caixas de texto 'P1', 'P2' e 't'.

A partir do momento que o usuário clica para adicionar um painel, a representação gráfica do mesmo é feita em uma imagem que faz parte da Aba Desenho de Seção. Após todos os painéis serem adicionados e desenhados, tem-se uma prévia da seção do navio, ainda sem reforçadores, como mostra a Figura 4.22.

Figura 4.22 – Desenho da Seção ainda sem reforçadores

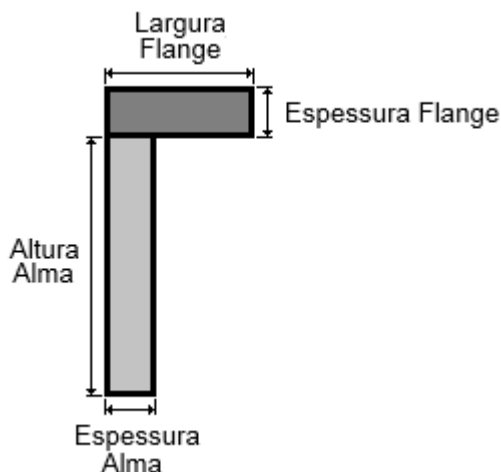


Fonte: Autor (2018)

Após isso o usuário deve informar ao programa como serão os reforçadores que a seção possuirá, ou seja, irá criar os reforçadores com as características que deseja, salvá-los e então adicioná-los aos painéis. O programa possibilita a criação de apenas um tipo de reforçador, o tipo L. O usuário então é responsável de definir

suas dimensões, sendo elas: Altura da Alma, Espessura da Alma, Largura da Flange e Espessura da Flange, como mostra a Figura 4.23.

Figura 4.23 - Dimensionamento do reforçador



Fonte: Autor (2018)

Essas quatro dimensões são informadas para o programa através da parte de reforçadores da interface da aba Desenho da Seção. São quatro caixas de texto, uma para cada dimensão, recebendo valores em unidade de medida de milímetros.

Clicando no botão 'Criar Reforçador' o programa cria esse reforçador e salva suas dimensões em forma de vetores. Os reforçadores e suas dimensões são apresentados através de uma tabela como mostrado na Figura 4.24.

Figura 4.24– Tabela de criação dos reforçadores

REFORÇADORES:

Altura Alma: mm Espessura Alma: mm
Largura Flange: mm Espessura Flange: mm

Reforçador	Altura Alma [m]	Espessura Alma [m]	Largura Flange [m]	Espessura Flange [m]
1	1.5	0.012	0.5	0.012
2	1	0.012	0.2	0.012

Número:

Fonte: Autor (2018)

Após criados, os reforçadores devem ser adicionados aos painéis. Isso é feito pelo usuário já na parte da interface referente a adição dos reforçadores aos painéis.

Para adicionar os reforçadores ao painel o usuário deve inserir mais quatro informações através de caixas de texto: quantidade de reforçadores, tipo de reforçador a ser adicionado, painel que irá receber esses reforçadores e a distância entre o ponto inicial do painel e o primeiro reforçador. Todos esses valores são mostrados na mesma tabela em que os painéis foram apresentados. A cada tipo de reforçador criado, duas colunas são adicionadas a tabela indicando a quantidade de reforçadores e a distância do primeiro reforçador, em metros, como mostra a Figura 4.25.

Figura 4.25 – Tabela de Painéis com Reforçadores

PAINÉIS: P1: P2: t: mm

REFORÇADORES NO PAINEL: Quantidade: Painel: NRef: 1º: mm

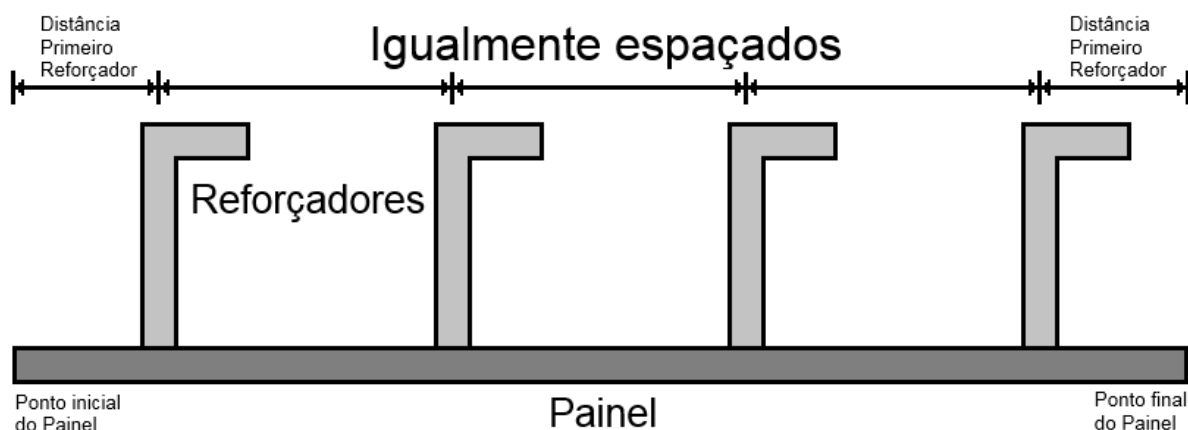
Painel	P1	P2	t	Qtd Ref 1	1º Ref 1	Qtd Ref 2	1º Ref 2
1	1	2	0.001	3	1.5		
2	2	3	0.001	3	0.7		
3	3	4	0.001			5	1.3
4	4	5	0.001			5	1
5	4	6	0.01	5	2	4	3

Número do Painel: Painel:

Fonte: Autor (2018)

A distância entre o primeiro reforçador e o ponto inicial do painel é definida para representar a parcela restante da subtração do tamanho do painel pelo valor da soma dos espaçamentos entre os reforçadores. O usuário tem como objetivo fixar uma distância entre reforçadores, porém a multiplicação entre essa distância e o número de reforçadores não resulta exatamente no tamanho do reforçador. Ao informar a distância do ponto inicial do painel até o primeiro reforçador, o usuário deve considerar como sendo a metade do valor da sobra da folga, pois a mesma distância será considerada também do último reforçador ao ponto final do painel, como mostrado na Figura 4.26.

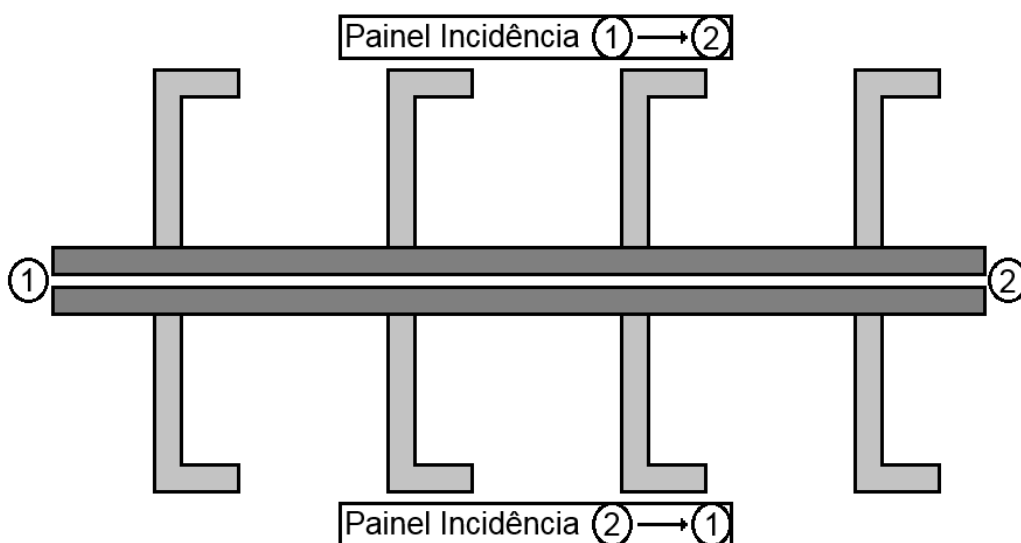
Figura 4.26 – Desenho explicativo da distância do primeiro reforçador



Fonte: Autor (2018)

Um recurso foi adicionado ao programa para possibilitar ao usuário em que lado do painel os reforçadores devem ser desenhados. Isso é feito através de como o usuário informa ao programa quais são os pontos inicial e final do painel. Caso um painel desenhado tenha adição de reforçadores e estes estejam para o lado errado, o usuário deve inverter os pontos inicial e final do painel, através do botão 'Editar Painel', para que estes sejam desenhados no outro lado. Portanto, a definição de que lado o painel irá possuir reforçadores se dá pela direção de incidência do mesmo, como esquematizado na Figura 4.27.

Figura 4.27 - Incidência de Painéis



Fonte: Autor (2018)

Com isso encerra-se o processo de desenho da seção. Agora o usuário já tem uma representação gráfica do que pode ser a seção ideal para seu navio, faltando a confirmação obtida pela análise dos resultados dos cálculos de tensão.

Ainda na aba de Desenho de Seção inicia-se o processo de cálculo para obtenção dos valores de tensão normal e cisalhante; com o cálculo das propriedades da seção. Os resultados destes cálculos são apresentados em forma de tabela na interface, elemento por elemento.

A primeira propriedade a ser calculada é a posição da linha neutra, obtida através de uma média ponderada entre a área e a posição vertical do centroide de cada elemento em relação a quilha do navio. Para maior detalhamento e facilidade ao se comparar resultados analíticos e os obtidos pelo programa são apresentados na tabela três colunas referentes ao cálculo da linha neutra, a primeira para área de cada elemento, a segunda para a posição vertical do centroide em relação a linha neutra e a terceira para o resultado da multiplicação das duas primeiras. A última linha da primeira e terceira coluna mostra a soma dos resultados de todos os elementos, como mostrado na Figura 4.28.

Figura 4.28 – Tabela de cálculos de propriedades de seção, Linha Neutra

PROPRIEDADES DE SEÇÃO:			
Painel	Área Painel [m ²]	Ycgquilha [m]	A * B [m ³]
1	0.082198	1	0.082
2	0.077831	3.5	0.272
3	0.08318	10	0.832
SOMA	0.243209		1.186

Fonte: Autor (2018)

O valor da posição da Linha Neutra é o resultado da divisão entre a soma dos elementos da terceira coluna pela soma dos da primeira.

A segunda propriedade de seção é o valor do momento de inércia da seção, e seu processo de obtenção é o mesmo que para a linha neutra. Como os elementos não estão localizados com seus centroides verticais exatamente na posição da linha neutra é necessário dividir o cálculo do momento de inércia da seção em duas partes, o do Momento de inércia de Transferência e o Próprio.

O momento de inércia de transferência é encontrado pela multiplicação da área de cada elemento pelo quadrado da distância do centroide do mesmo até a linha neutra, como mostrado na equação 2.7 da fundamentação teórica deste trabalho.

O momento de inércia próprio é resultado da multiplicação entre a área do elemento e o quadrado de sua altura dividido por doze (equação 2.8), considerando a altura do painel como sendo a distância da projeção vertical da mesma.

Os resultados de ambos os momentos também são mostrados na tabela de propriedades da seção, e suas respectivas colunas apresentam na última linha o resultado da soma de dos valores para todos os elementos (Figura 4.29).

Por fim, o momento de inércia total da seção será então a soma desses dois valores multiplicados por dois, uma vez que a seção real é composta de duas metades.

Figura 4.29 – Tabela de Propriedades de Seção, completa

PROPRIEDADES DE SEÇÃO:						
Painel	Área Painel [m ²]	Ycgquilha [m]	A * B [m ³]	YcgLN [m]	Itransf [m ⁴]	Ipróprio [m ⁴]
1	0.082198	1	0.082	-3.878	1.236	0.001
2	0.077831	3.5	0.272	-1.378	0.148	0.002
3	0.08318	10	0.832	5.122	2.182	0.083
SOMA	0.243209		1.186		3.566	0.086

Fonte: Autor (2018)

Os resultados dos cálculos das propriedades da seção somente são apresentados após o clique do botão ‘Calcular Propriedades de Seção’, que indica ao programa que a seção já está pronta para os cálculos serem realizados, e este desenha na mesma tela da seção uma linha vermelha que indica a posição da linha neutra, e preenche duas caixas de textos informando ao usuário os valores de Linha Neutra e Momento de Inércia da Seção. A parte da interface que contém o botão e as caixas de texto é mostrada na Figura 4.30.

Figura 4.30 - Resultados dos Cálculos das Propriedades de Seção

Calcular Propriedades de Seção

Momento Estático Acima LN: m³

Momento Estático Abaixo LN: m³

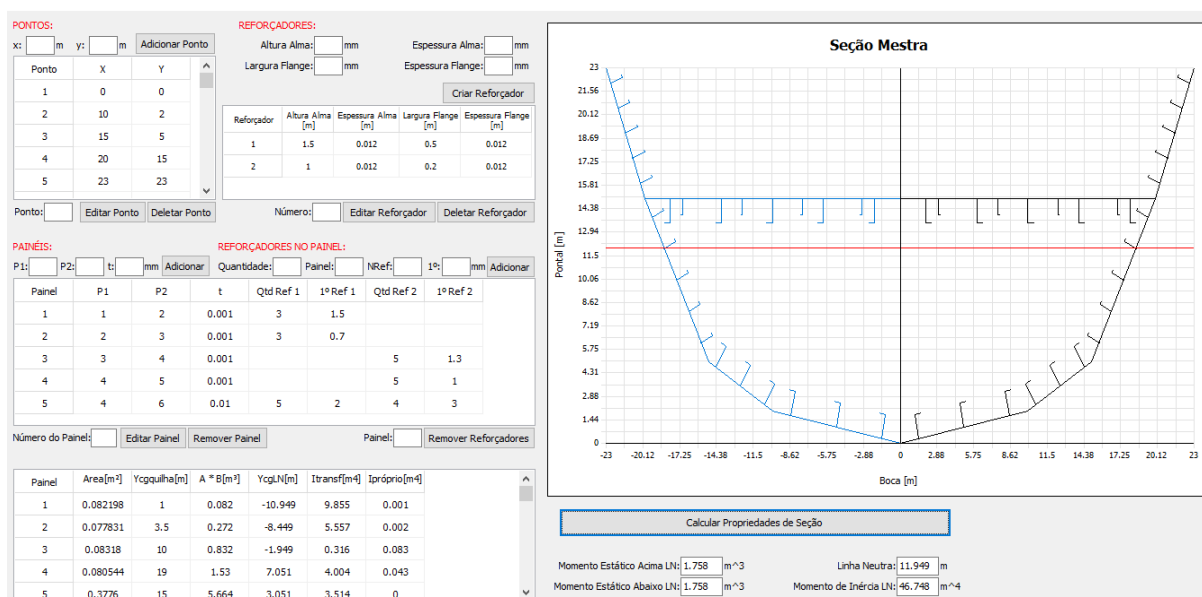
Linha Neutra: m

Momento de Inércia LN: m⁴

Fonte: Autor (2018)

Com o desenho e o cálculo das propriedades da seção prontos, é dado início ao processo de obtenção das Tensões Normal, Cisalhantes e do Momento de Inércia, encerrando o conteúdo da Aba Desenho de Seção. Uma visão geral da Aba Desenho é mostrada na Figura 4.31.

Figura 4.31 - Aba Desenho de Seção



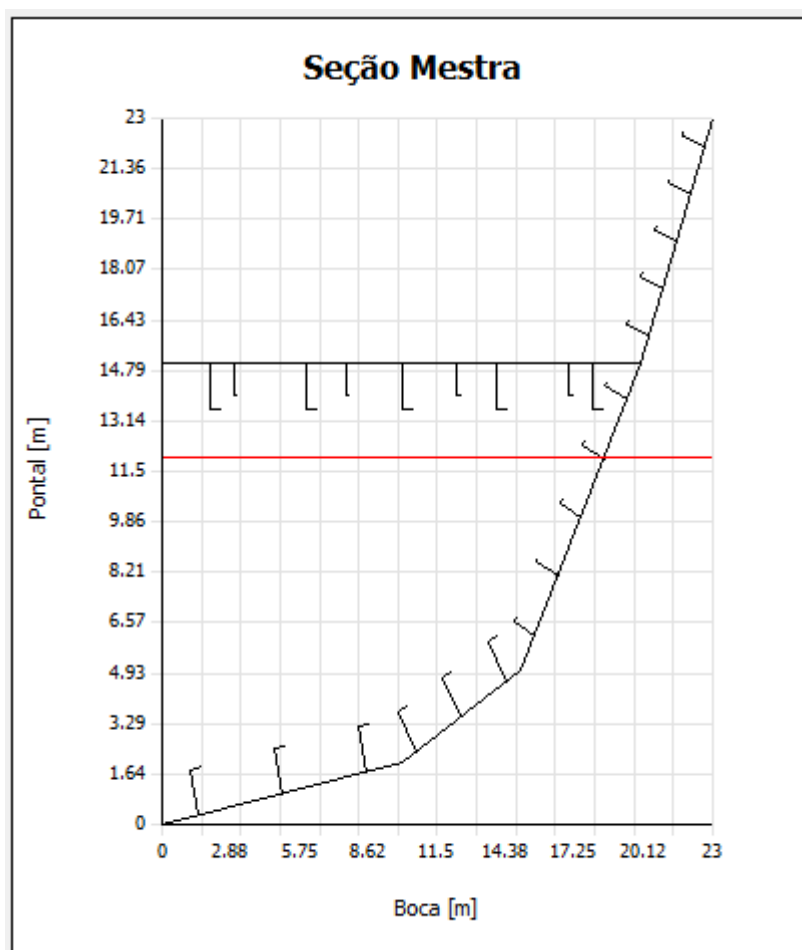
Fonte: Autor (2018)

4.3. RESULTADOS

A Aba Resultados foi criada para que, após a inserção de todas as informações necessárias, o usuário possa observar todos os resultados e analisá-los em uma única tela.

A primeira parte da aba mostra o desenho da Seção, que se repete para que o usuário não necessite voltar a aba anterior apenas para verificar algum detalhe do mesmo. O desenho dessa vez seguiu a representação tradicional, sendo apresentada apenas a metade da seção (Figura 4.32).

Figura 4.32 - Desenho de Metade da seção



Fonte: Autor (2018)

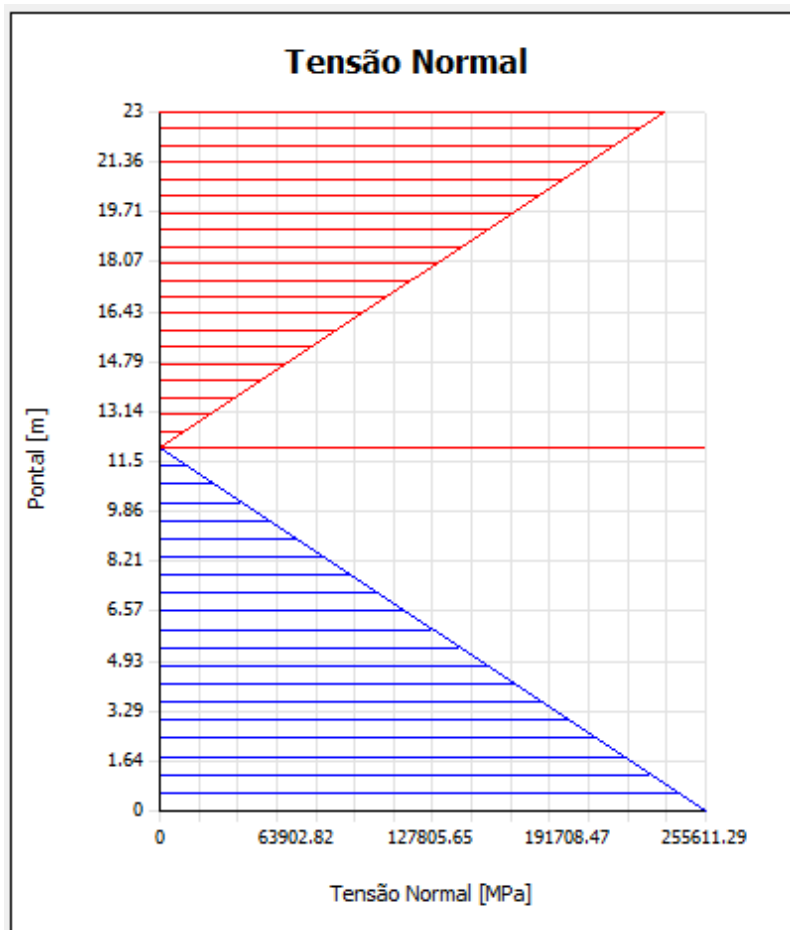
Ao lado deste está o desenho da tensão normal, que traz um gráfico proporcional ao da seção, porém substituindo a mesma por um gráfico indicando como a Tensão Normal varia na seção.

Sabe-se que na posição da Linha Neutra a tensão normal é nula, e que nas extremidades estão os valores de compressão e tração máximas.

A Tensão Normal é calculada através da multiplicação do momento fletor pela distância da posição até a Linha Neutra dividida pelo Momento de Inércia da Seção, como mostra a Equação 2.10 da fundamentação teórica deste trabalho.

A tensão normal é então desenhada sobre o desenho da seção, indicando sua magnitude por duas retas, ambas saindo da Linha Neutra e indo até os valores máximos de tração e compressão, de acordo com a Figura 4.33.

Figura 4.33 – Desenho da distribuição da Tensão Normal na seção

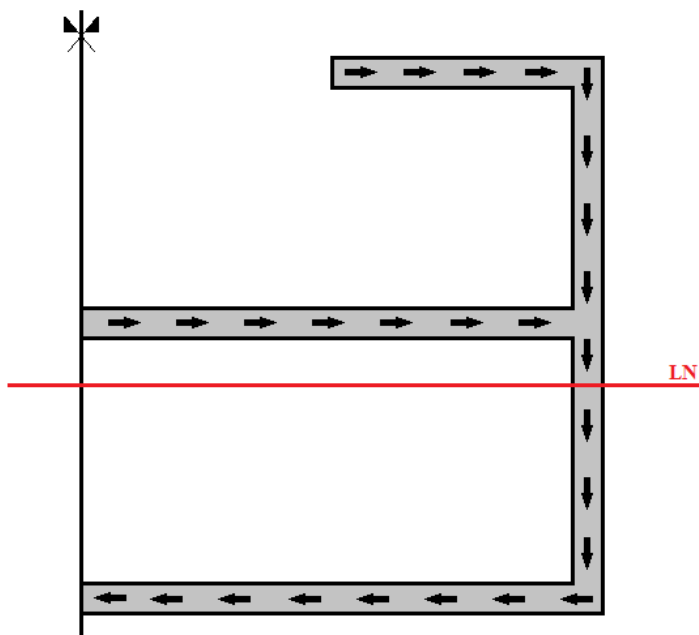


Fonte: Autor (2018)

Após o cálculo da tensão normal, são necessários os valores dos momentos estáticos de cada painel, pois esses serão usados para a determinação das tensões de cisalhamento.

O cálculo desses momentos estáticos não é tão simples, visto que dependem da geometria da seção. O valor de cada painel deve ser somado ao próximo seguindo o sentido da Força Cortante atuante na seção, mostrado na Figura 4.34.

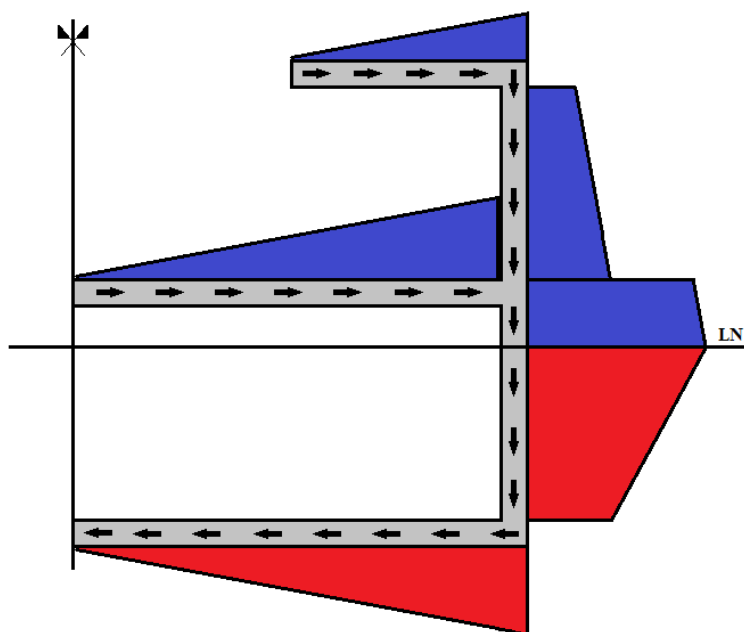
Figura 4.34 - Sentido da Força Cortante na seção



Fonte: Autor (2018)

O maior valor de momento estático será na posição da linha neutra, onde o valor do mesmo começa a ser subtraído para os próximos painéis devendo resultar em zero ao chegar na posição de corte de meia seção, exemplificado na Figura 4.35.

Figura 4.35 - Representação dos valores de Momento Estático na seção



Fonte: Autor (2018)

A parte azul da Figura 4.35 indica o aumento do momento estático ao longo da seção, percorrendo-a de acordo com a fluidez da força cortante. A parte vermelha indica que esse valor de momento estático se torna zero ao ponto em que a força cortante encontra a outra metade da seção, isso mostra que a distribuição da tensão cisalhante está em equilíbrio.

A determinação do momento estático de área em seções navais é tópico amplamente discutido por Hughes (1983), onde verifica-se que este varia linearmente para deslocamentos paralelos a linha neutra e quadraticamente para deslocamentos ortogonais a linha neutra. No entanto, por questão de simplificação, a implementação realizada, desenha tal distribuição de maneira linear, pois apenas os valores nos extremos dos painéis são calculados.

Com os valores de Momentos Estáticos é possível realizar o cálculo da Tensão Cisalhante atuante na Seção, a qual é resultante da multiplicação da Força Cortante pelo Momento Estático dividido pela multiplicação do Momento de Inércia pela espessura do painel no ponto analisado, conforme a Equação 2.12 da fundamentação teórica deste trabalho.

Os valores das Tensões Normal e Cisalhante, e Momento Estático para os pontos inicial e final de todos os painéis são mostrados através de uma tabela que faz parte da interface da aba Resultados, como mostra a Figura 4.36.

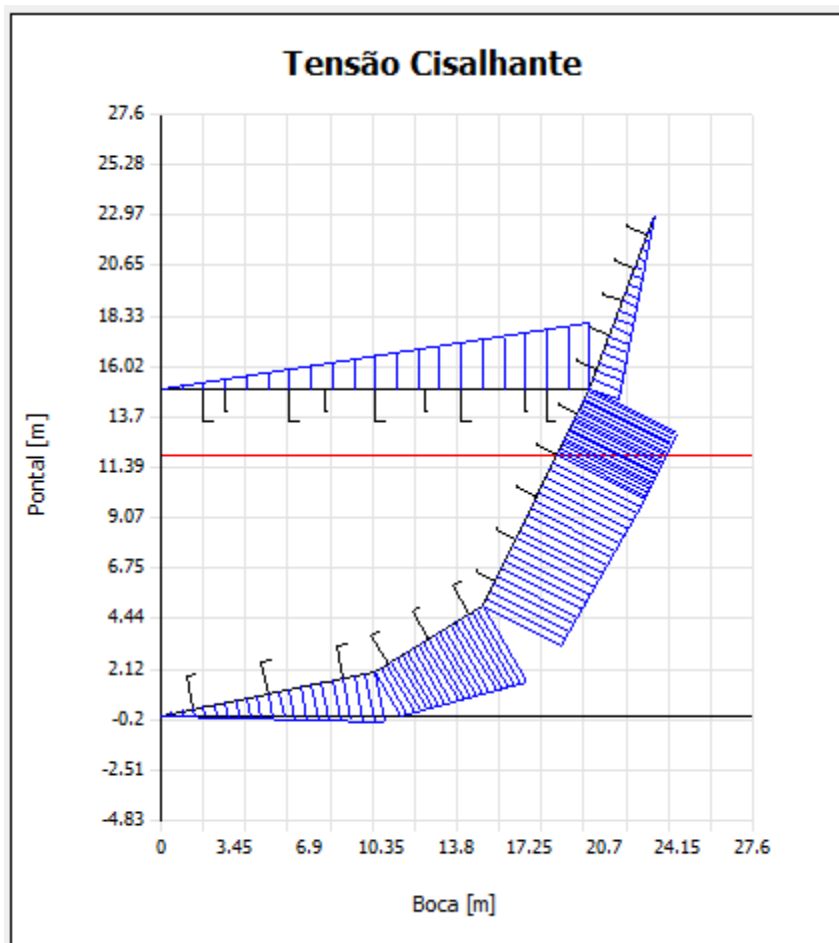
Figura 4.36 - Tabela Resultados de Tensão

Painel	P1	Nor1 [Pa]	Ms1 [m ²]	Cis1 [Pa]	P2	Nor2 [Pa]	Ms2 [m ²]	Cis2 [Pa]
1	1	-321886.91	0	0	2	-268011.88	0.9	346100.57
2	2	-268011.88	0.9	346100.57	3	-187199.34	1.5576	598988.83
3	3	-187199.34	1.5576	598988.83	4	82175.8	1.7198	661343.74
4	4	82175.8	0.5679	218378.89	5	297675.91	0	0
5	4	82175.8	1.1519	44296.49	6	82175.8	0	0

Fonte: Autor (2018)

Com os resultados de cisalhamento é possível apresentar o desenho da seção com os gráficos de tensão cisalhante para cada painel, como mostra a Figura 4.37.

Figura 4.37 - Desenho dos Resultados de Tensão Cisalhante



Fonte: Autor (2018)

Para melhor visualização e diversificação dos resultados criou-se uma caixa de seleção que permite ao usuário a seleção de resultados para as quatro condições diferentes. Três delas são referentes as condições de mar, e a quarta chamada de 'Personalizado', usa valores de Força Cortante e Momento Fletor Máximos que são informados pelo usuário em duas caixas de textos, tudo fazendo parte da Aba Resultados. Os resultados são apresentados para a condição selecionada após o clique do botão 'Resultados', e todos esses recursos são mostradas na Figura 4.38.

Figura 4.38 – Opções de visualização de resultados

Resultados

Posição ao longo do comprimento: m

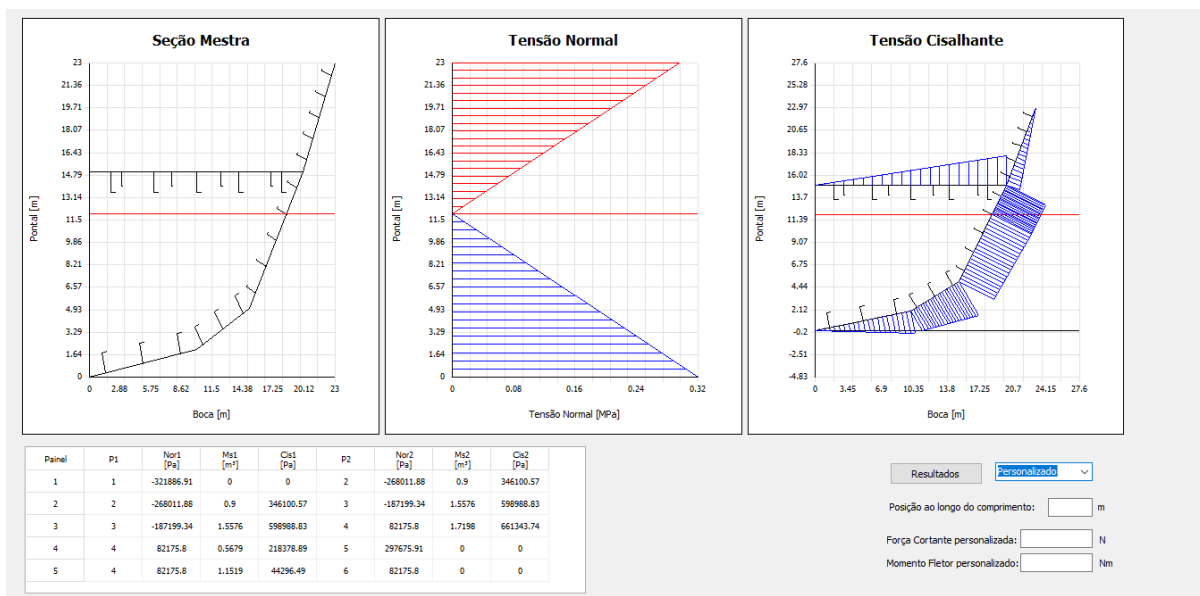
Força Cortante personalizada: N

Momento Fletor personalizado: Nm

Fonte: Autor (2018)

Com isso todos os resultados para todas as condições de mar são apresentados, completando a Aba Resultados que é a última que compõe o programa. Uma visão geral da Aba Resultados é apresentada na Figura 4.44.

Figura 4.39 – Aba Resultados



Fonte: Autor (2018)

5. VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS

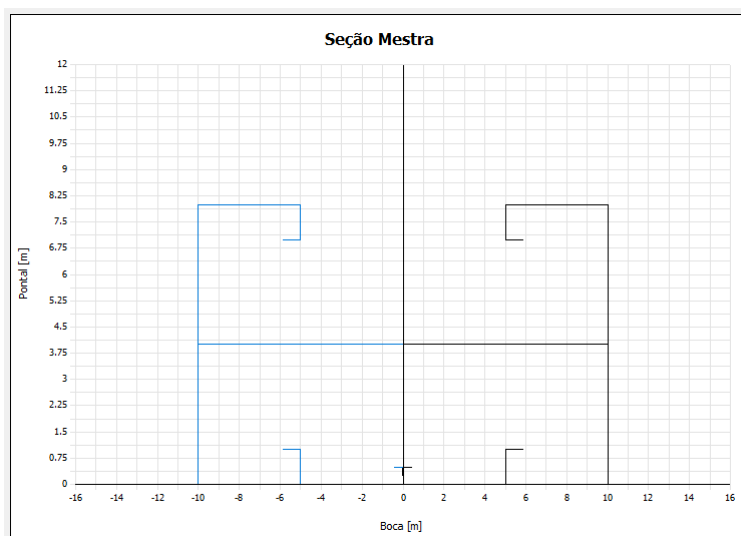
Com o novo programa funcionando e gerando resultados chega o momento dos testes. Neste capítulo são mostrados a verificação se os valores resultantes do programa estão de acordo com os gerados por cálculos analíticos ou numéricos.

Essas verificações foram separadas em quatro casos, para que diversos aspectos do programa sejam colocados à prova. Serão dois exercícios referentes ao equilíbrio da viga navio e dois referentes aos cálculos das tensões atuantes na seção.

5.1. PRIMEIRA VERIFICAÇÃO

O primeiro exercício, resolvido analiticamente e disponível no Apêndice C deste trabalho, trata de uma seção de um navio em forma de caixote com convés intermediário o qual são aplicados Força Cortante e Momento Fletor conhecidos. Esta seção tem a característica de possuir todos os painéis da mesma espessura. A mesma foi desenhada no programa e é mostrada na Figura 5.1.

Figura 5.1– Desenho da seção do exercício do Apêndice C



Fonte: Autor (2018)

Seguindo a sequência de procedimentos do programa foram calculadas as propriedades da seção e os valores de Tensão Normal e de Cisalhamento. Os valores obtidos são mostrados e comparados com as resultantes do cálculo analítico na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Comparação de Resultados de seção do Apêndice C

	Analítico	Programa
Linha Neutra [m]	3,364	3,364
Momento de Inércia [m ⁴]	7,258	7,258
Tensão Normal Máxima [MPa]	38,324	38,324
Momento Estático LN [m ³]	0,514	0,514
Tensão Cisalhante Máxima [MPa]	1,062	1,062

Fonte: Autor (2018)

Os resultados para as propriedades de seção e para as Tensões Normal e Cisalhante máximas foram idênticas em ambos os cálculos, isso mostra que o programa está fazendo os cálculos da maneira correta e que é confiável para a execução de uma análise mais complexa.

Na Aba Resultados são aplicadas a Força Cortante e o Momento Fletor por meio da opção Personalizada de geração de esforços. São gerados gráficos que mostram os valores máximos de tensão normal, se essa é de compressão ou tração, e os valores de tensão de cisalhamento para cada painel. Todos os resultados, do programa e analíticos são mostrados na figura abaixo.

5.2. SEGUNDA VERIFICAÇÃO

O segundo exercício, resolvido analiticamente e disponível no Apêndice D deste trabalho, trata da mesma seção que o primeiro, tendo como diferença a mudança da espessura de alguns painéis. Trata-se de uma seção no formato de caixote com convés intermediário, e que a partir desse possui costados e convés de menor espessura. Como o programa não mostra graficamente a diferença de espessuras a representação gráfica da mesma será idêntica ao da primeira verificação, observada na Figura 5.2.

Ainda na Aba de Desenho da Seção foram gerados os resultados dos cálculos das propriedades, e estes, comparados com os obtidos analiticamente.

Tabela 5.2– Comparação de Resultados de seção do Apêndice D

	Analítico	Programa
Linha Neutra [m]	2,875	2,875
Momento de Inércia [m ⁴]	5,687	5,687
Tensão Normal Máxima [MPa]	54,064	54,064
Momento Estático LN [m ³]	0,432	0,432
Tensão Cisalhante Máxima [MPa]	1,654	1,654

Fonte: Autor (2018)

Os resultados novamente se mostram precisos para os cálculos, mesmo com a mudança de espessura da seção, comprova que o programa está bem definido e gerando resultados confiáveis.

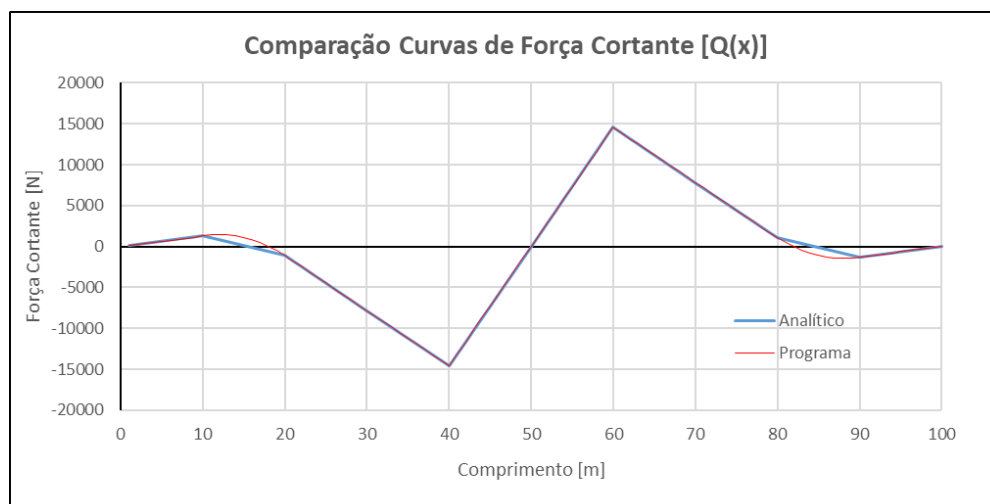
Na Aba Resultados foi selecionada a opção de gerar resultados para Força Cortante e Momento Fletor já conhecidos, gerando os gráficos que apresentam os valores de tensão normal e cisalhante aplicados na seção. A tensão normal podendo ser de compressão ou de tração, e a cisalhante apresentada para cada painel.

5.3. TERCEIRA VERIFICAÇÃO

A terceira verificação trata-se da aplicação do programa para determinação de resultados para equilíbrio da viga navio. Ou seja, um exercício onde um navio é carregado de maneira que não seja gerado ângulo trim e onde é conhecido o calado do mesmo para dada condição de carga. São analisados então os valores resultantes de Força Cortante e Momento Fletor máximos para a condição de mar Sem Onda.

A resolução do exercício se encontra no Apêndice E deste trabalho e após informar os dados do problema ao programa são gerados os gráficos para todas as curvas de equilíbrio. Como no anexo são mostrados os gráficos correspondentes apenas do cálculo analítico mostra-se aqui uma comparação desses resultados com os do programa, começando pelo gráfico de curva de Força Cortante, na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Comparação de valores de Força Cortante do Apêndice E

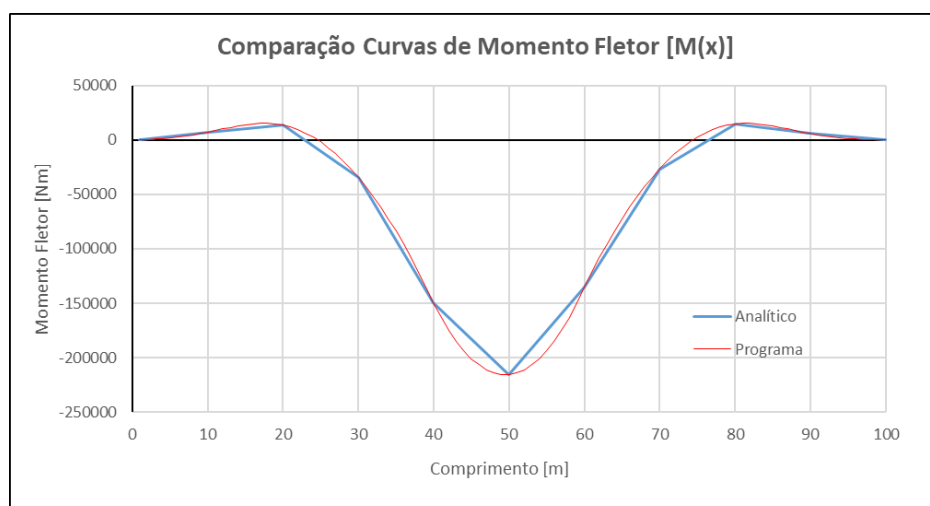


Fonte: Autor (2018)

Como visto na Figura 5.3 é clara a semelhança dos resultados de valores para Força Cortante calculada analiticamente e através do programa. Ficam claros dois trechos onde teve maior divergência, porém se esses forem mais detalhados no cálculo analítico geram resultados melhores e mais próximos aos do programa, ou seja, o programa gerou os resultados corretos, pois o cálculo analítico realizou uma aproximação linear por trechos.

Resultados através dos cálculos analíticos e do programa também foram obtidos para o Momento Fletor, como mostra a Figura 5.4.

Figura 5.4 - Comparação de valores de Momento Fletor do Apêndice E



Fonte: Autor (2018)

No gráfico de comparação dos Momentos da Figura 5.4 também é possível notar a semelhança das curvas. Como o valor do momento foi feito apenas para dez posições ao longo da embarcação este se une por seguimentos de retas, o que não se aproxima de uma curva perfeita. Mas se feito para muitos pontos a curva de Momento Fletor calculada analiticamente tende a ser exatamente igual a gerada pelo programa, mostrando que o programa está gerando resultados corretos.

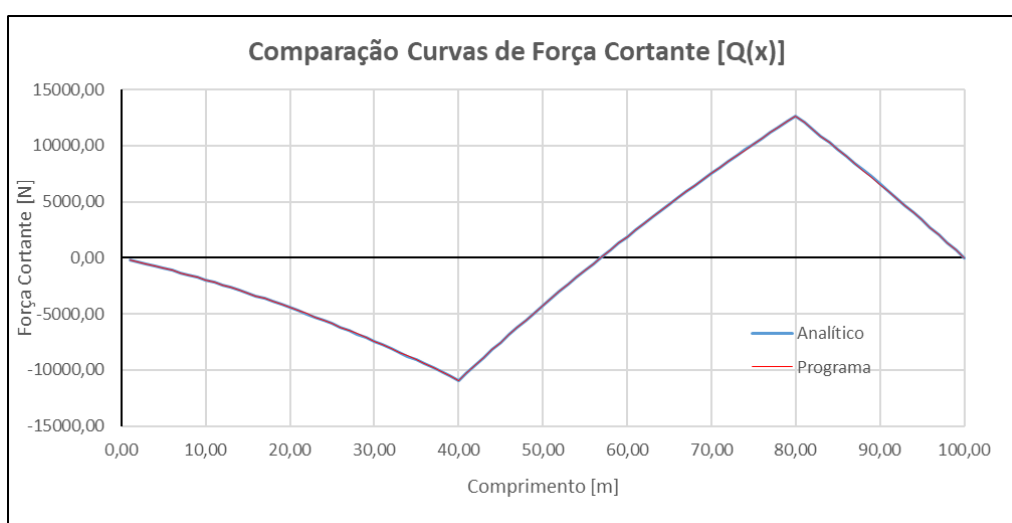
5.4. QUARTA VERIFICAÇÃO

A quarta verificação irá testar os valores dos resultados gerados pelo programa quanto a variação do Ângulo Trim de um navio. Nesse caso o programa necessita equilibrar o navio para encontrar o Calado Médio e Ângulo Trim ideais ao mesmo tempo, e com isso se torna o teste mais completo.

No Apêndice F deste trabalho é desenvolvido um exercício de viga navio numericamente, visto que se torna inviável a resolução analítica.

Também neste exercício serão comparados os gráficos de Força Cortante e Momento Fletor gerados analiticamente e pelo programa. Na Figura 5.5 é observada a Curva de Força Cortante para ambos.

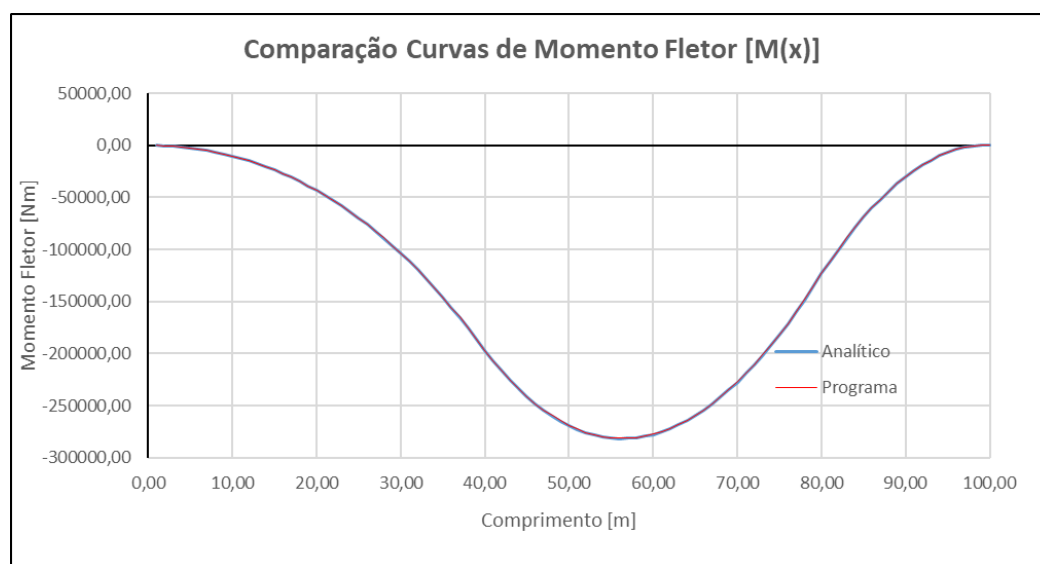
Figura 5.5 – Comparação de valores de Força Cortante do Apêndice F



Fonte: Autor (2018)

É possível observar que é quase impossível identificar alguma diferença nos resultados das duas curvas, mostrando quase imperceptível diferença. Na Figura 5.6 é mostrado o gráfico para o Momento Fletor.

Figura 5.6 - Comparação de valores de Momento Fletor do Apêndice F



Fonte: Autor (2018)

Também com valores praticamente iguais o programa mostra bons resultados no gráfico da Figura 5.6.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou o desenvolvimento de um programa para a análise e síntese estrutural de um sistema naval. Através dele o usuário consegue simular diversas condições de carga a fim de analisar diferentes carregamentos, bem como analisar a magnitude dos esforços primários (globais) que agem sobre a embarcação.

O módulo de equilíbrio desenvolvido permite modelar diferentes condições de carga e, por meio do algoritmo de bissecção, determinar a posição de equilíbrio (Calado médio e Ângulo trim) da embarcação em cada condição analisada.

Destaca-se que o programa permite a importação de dados referentes ao formato do casco do navio (curva referente à altura da quilha) e a exportação dos valores das curvas de equilíbrio da viga navio. Apresenta todos os recursos necessários para uma análise satisfatória (realista e coerente) de equilíbrio.

No módulo de modelagem da seção mestra desenvolvido, o usuário pode desenhar a seção da embarcação por meio da discretização dos pontos que delimitam os painéis estruturais. A seguir, o programa permite calcular as propriedades de seção, além de realizar a avaliação dos campos de tensão normal e tensão cisalhante ao longo da seção.

A seguir realizou-se 4 estudos de casos visando avaliar a coerência e precisão dos resultados calculados pelo programa desenvolvido. Em todos os casos os resultados foram rigorosamente os mesmos dentro dos limites de precisão utilizados em ambas as resoluções.

Observa-se que o programa reproduziu coerentemente o comportamento estrutural esperado, obtendo resultados bastante satisfatórios quando comparados aos resultados analíticos.

Assim, como resultado final, apresenta-se uma ferramenta que permite, analisando os resultados obtidos, rapidamente auxiliar o projetista a buscar novas configurações de arranjo de carga e/ou referentes ao projeto estrutural da seção mestra, permitindo o aprimoramento do projeto a fim de buscar uma seção ideal para o navio, unindo a redução de massa com a garantia da resistência estrutural do casco.

Por fim, destaca-se o enorme potencial que o programa desenvolvido possui como ferramenta educacional, permitindo a professores e alunos realizar exemplos, verificar exercícios e estudar o comportamento de diferentes condições de carga e de diferentes arranjos estruturais, no estudo da estrutura global de um navio.

Certos de ter alcançado os objetivos propostos, recomenda-se que se continue o desenvolvido realizado, incluindo-se o estudo da estrutura local, bem como a incorporação de técnicas baseadas no método dos elementos finitos para a estimativa da tensão cisalhante em seções multicelulares e na análise da estrutura transversal. Além disso, poder-se-ia incorporar algoritmos de projeto estrutural baseado nas normas de Sociedade Classificadoras, bem como incluir técnicas de otimização visando a redução automatizada do peso da estrutura do projeto.

REFERÊNCIAS

AUGUSTO, O. B. **A estrutura secundária do navio**. 2004. 33 p. Apostila. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

AUGUSTO, O. B. **A estrutura terciária do navio: (Introdução à Teoria de Placas)**. 2004. 51 p. Apostila. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

AUGUSTO, O. B. **PROTEUS: sistema para o Projeto Racional Otimizado e Automatizado da Estrutura de Embarcações**. 1996. 60 p. Manual. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

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

Det Norske Veritas, New Buildings Hull and Equipments Main Class - Hull Structural Design, Ships with Length Less than 100 meters, Part 3 Chapter 2, January 2012.

HUGHES, O. F. **Ship structural design: a rationally-based, computer-aided, optimization approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983.

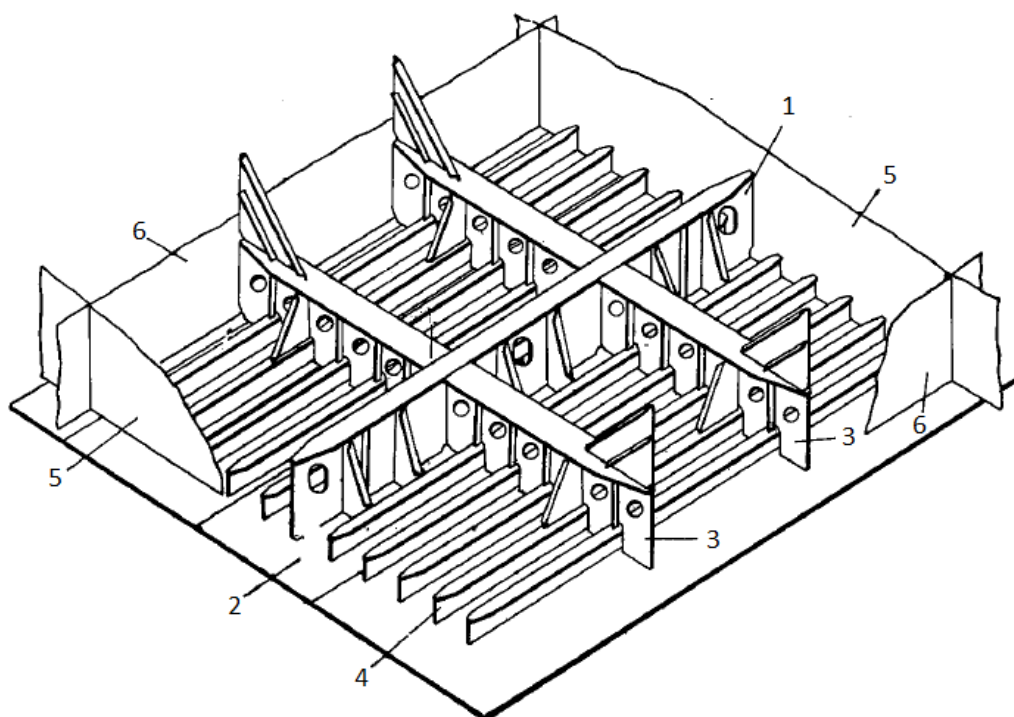
TANCREDI, T. P. **A estrutura primária do navio: Teoria de Vigas – Viga Navio**. 2006. 20 p. Apostila. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

APÊNDICE A

Estrutura Secundária

A estrutura secundária é composta pelo painel de reforçadores leves e pesados, e chapas, relacionados entre duas anteparas transversais. Como mostrados na Figura A1 os perfis leves são aqueles que limitam as dimensões e enrijecem as chapas, já os perfis pesados são aqueles onde os perfis leves se apoiam transmitindo a carga recebida das chapas.

Figura A1 - Detalhe de um painel do fundo (1-Quilha, 2-Chapeamento, 3-Hastilha, 4-Perfil leve, 5-Anteparara transversal, 6-Anteparara longitudinal).

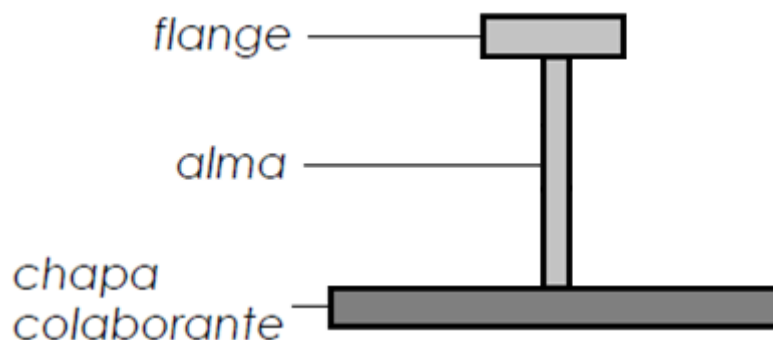


Fonte: Augusto (2004)

Com isso nota-se que na estrutura secundária está contida a estrutura terciária. Porém tensões secundárias estão relacionadas com deformações secundárias e tensões terciárias estão relacionadas com deformações terciárias.

Em decorrer dos reforçadores leves estarem fixados as chapas do navio, estas tornam-se parte integrante na resistência à deformação secundária e devem ser consideradas nos cálculos, sendo chamadas de Chapas Colaborantes. O arranjo entre alma, flange e chapa colaborante pode ser observado na Figura A2.

Figura A2 - Perfil e Chapa Colaborante



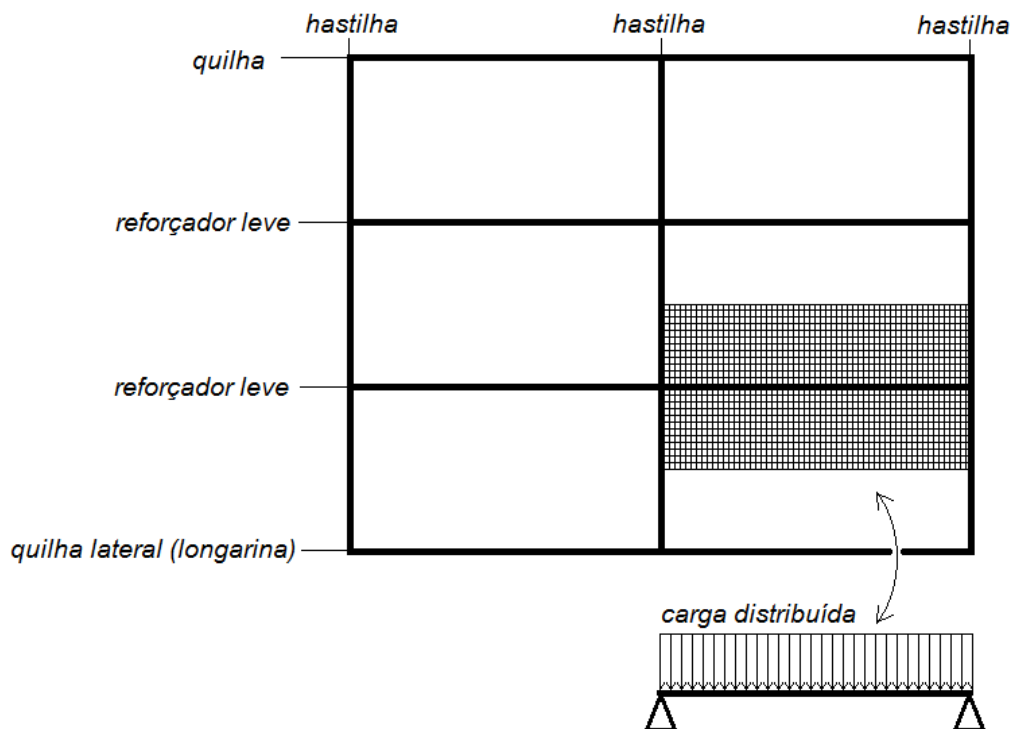
Fonte: Autor

Concentrando-se no cálculo das tensões secundárias, estas são separadas em duas partes, as tensões secundárias nos reforçadores pesados (σ'_2) e as tensões secundárias nos reforçadores leves (σ''_2). Os valores dos leves são calculados desconsiderando qualquer deformação dos pesados, e os valores dos pesados desconsiderando deformações nos leves.

Vale ressaltar que em alguns casos a chapa colaborante de perfis pesados engloba perfis leves que, portanto, devem ser considerados nos cálculos de rigidez do perfil pesado.

A distribuição de cargas é efetuada de maneira simples, onde cada reforço recebe toda a carga aplicada ao longo de seu comprimento, transmitindo-a reforços mais rígidos que lhe dão apoio. Na Figura A3 é possível observar o exemplo do carregamento representado pela área hachurada distribuído de maneira homogênea através do reforçador, que transfere esta carga para as hastilhas que são os reforçadores pesados rígidos em relação aos leves.

Figura A3 - Exemplo de carga distribuída em parte da grelha de reforçadores



Fonte: Autor

Então sabendo como o painel de reforçadores reage aos esforços a ele impostos podem ser calculados os campos de tensão secundária através da Equação A1.

$$\sigma_2 = \frac{M(z - z_{LN})}{I_{LN}} \quad (A1)$$

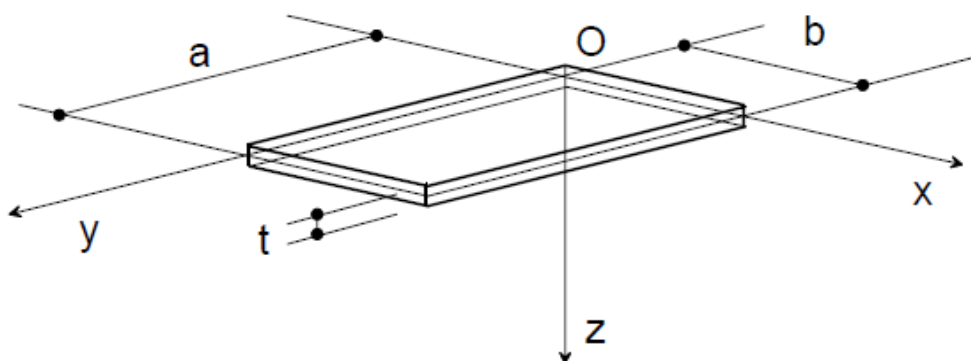
A tensão secundária é calculada analogamente a tensão normal da seção do navio.

APÊNDICE B

Estrutura Terciária

Corresponde a estrutura terciária de uma embarcação, a unidade de chapa limitada por reforçadores longitudinais leves e transversais pesados, que garante a estanqueidade do mesmo como mostrado na Figura B1.

Figura B1 - Exemplo de unidade de chapa e sistema de referência



Fonte: Augusto (2004)

Existem dois tipos de cavernamento, longitudinal e transversal. O que rege o tipo de cavernamento são as dimensões das chapas em relação a embarcação. Se o lado maior da unidade de chapa for paralelo ao eixo proa-popa dizemos que o cavernamento é longitudinal, caso contrário o cavernamento é transversal. Tomando como exemplo a Figura B1, para que o cavernamento seja longitudinal, o eixo proa-popa deve ser paralelo ao eixo y , já para que seja transversal o eixo proa-popa deve ser paralelo ao eixo x .

Como as chapas são limitadas por quatro apoios, estas fletam em duas direções diferentes, com isso algumas hipóteses são feitas para continuar com os cálculos. Considera-se que o material permanece com deformação elástica, que o

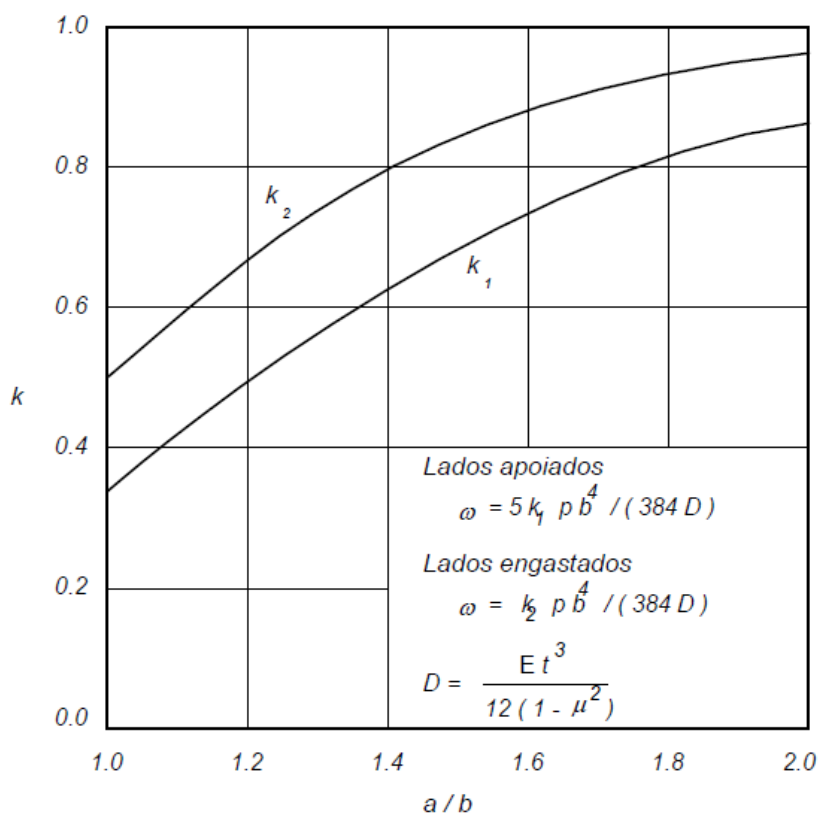
plano de meia espessura não se deforma devido a flexão, e que nas deformações de flexão as contribuições σ_z , τ_{xz} e τ_{yz} podem ser desprezadas. Assim o módulo de rigidez pode ser determinado de acordo com a Equação B1.

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (B1)$$

Dessa maneira quanto maior o módulo de elasticidade e a espessura da chapa, menor a deflexão.

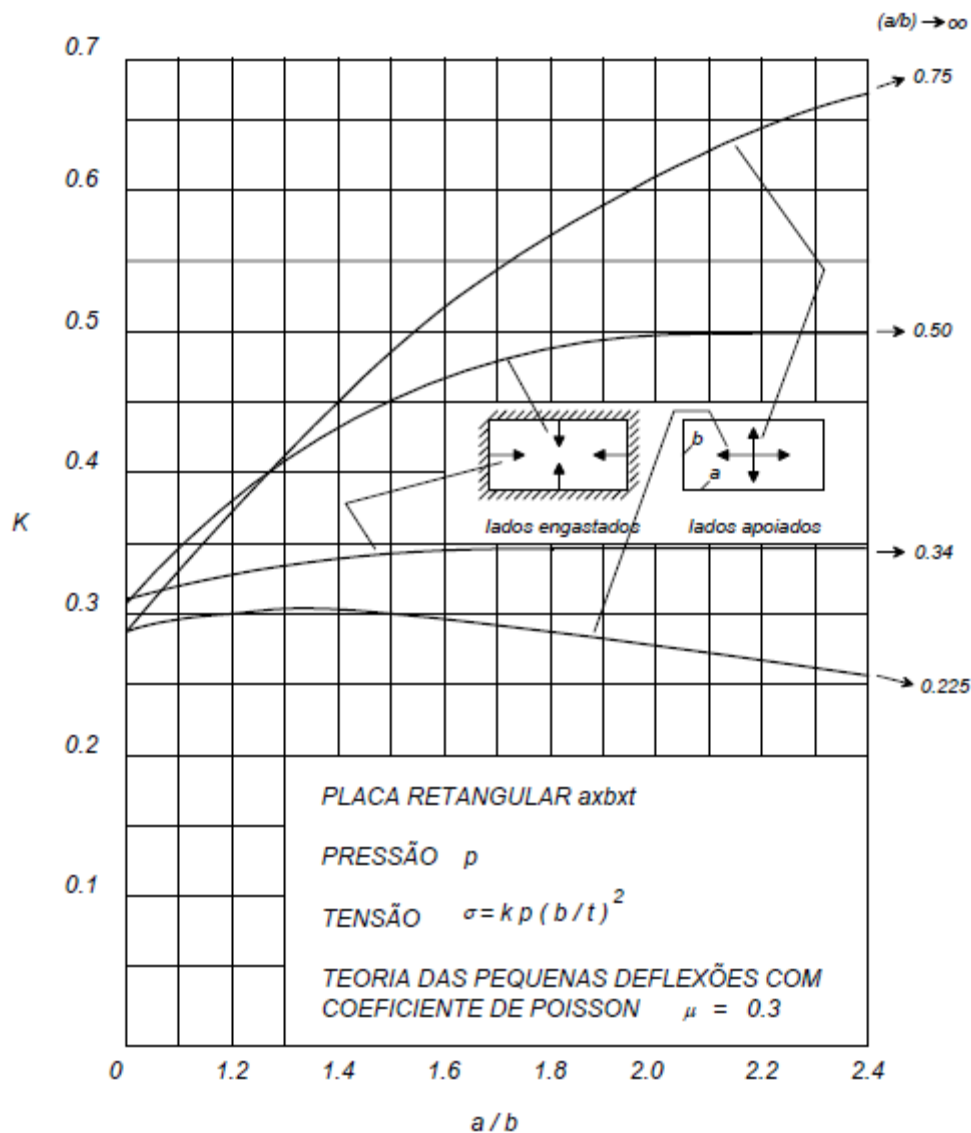
Baseado nas hipóteses assumidas e na equação do módulo de rigidez chega-se na equação de flexão em chapas, que será mostrada em forma de gráficos, apresentados nas Figuras B2 e B3 em termos de tensões e deflexões para os dois casos mais utilizados da engenharia naval.

Figura B2 - Deflexão máxima em placas retangulares sob pressão uniforme



Fonte: Augusto (2004)

Figura B3 - Tensões em placas retangulares sob pressão uniforme



Fonte: Augusto (2004)

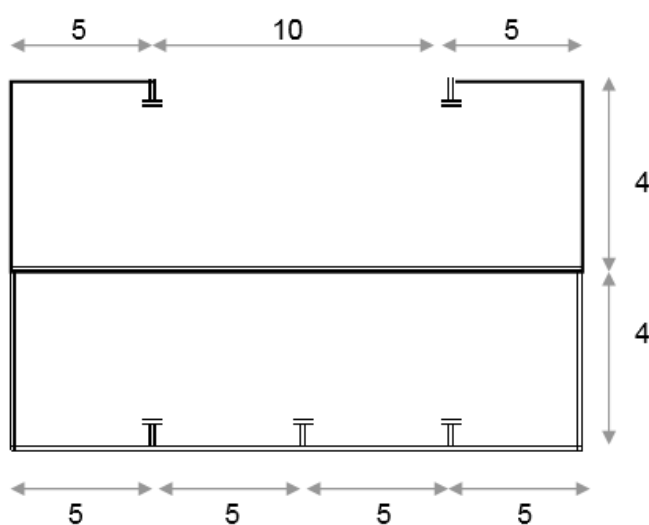
Geralmente na engenharia naval utilizam-se os modelos de placas com lados engastados devido a simetria de carregamento. Quando uma única placa está sob pressão seus engastes tendem a rotacionar junto com as extremidades da placa, devido a sua deflexão, porém se todas as placas estão sob pressão a rotação dos engastes pode ser considerado nula, ou seja, um engaste perfeito.

APÊNDICE C

Cálculo Tensões Seção

A seguir deve-se determinar a distribuição das Tensões Primárias na seção de Máximo Momento Fletor (60000kNm) e Máxima Força Cortante (150kN), representadas na figura.

Figura C1 – Desenho de seção exercício
Apêndice C

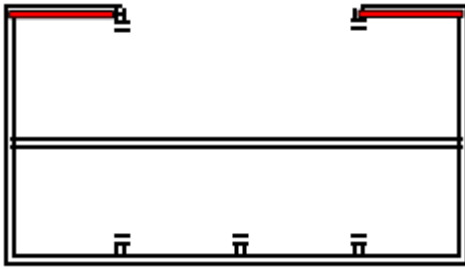


- Desenho da Seção da Barcaça (dimensões em metros)
- Espessura das chapas: 10mm
- Área de cada reforçador: 0,024m²

Fonte: Autor (2018)

Determinando a posição da linha neutra:

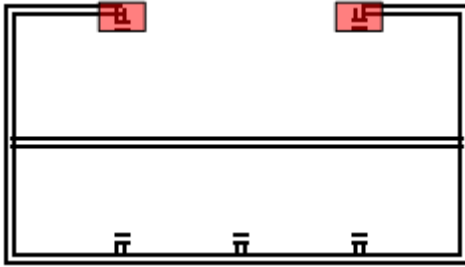
$$y_{LN} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{e,i} y_{q,i})}{\sum_{i=1}^n A_{e,i}}$$



Convés Superior:

$$A_{e,1} = 2(5 * 0,01) = 0,1m^2$$

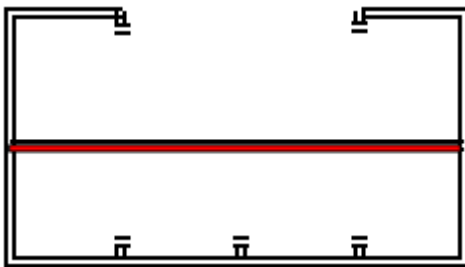
$$(A_{e,1}y_{q.1}) = (0,1 * 8) = 0,8m^3$$



Sicordas:

$$A_{e,2} = 2 * 0,024 = 0,048m^2$$

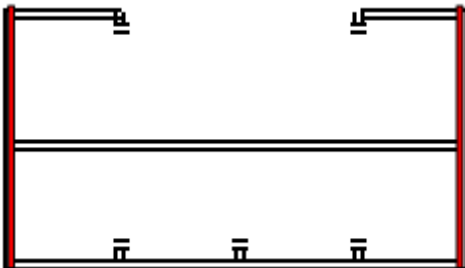
$$(A_{e,2}y_{q.2}) = (0,048 * 8) = 0,384m^3$$



Convés Médio:

$$A_{e,3} = (20 * 0,01) = 0,2m^2$$

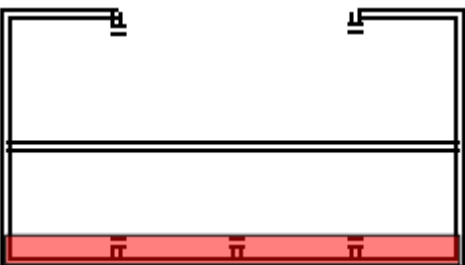
$$(A_{e,3}y_{q.3}) = (0,2 * 4) = 0,8m^3$$



Costados:

$$A_{e,4} = 2(8 * 0,01) = 0,16m^2$$

$$(A_{e,4}y_{q.4}) = (0,16 * 4) = 0,64m^3$$



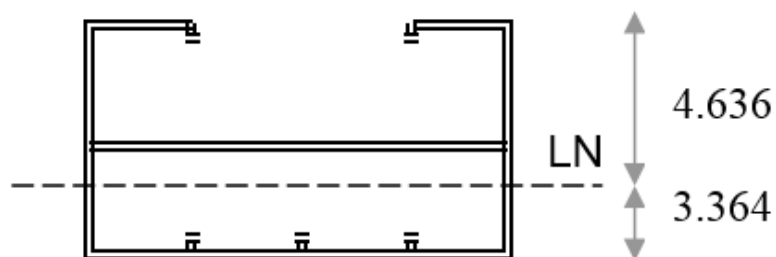
Convés Inferior e Quilhas:

$$A_{e5} = (20 * 0,01) + (3 * 0,024) = 0,272m^2$$

$$(A_{e,5}y_{q.5}) = (0,272 * 0) = 0m^3$$

$$y_{LN} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{e,i}y_{q,i})}{\sum_{i=1}^n A_{e,i}} = \frac{0,8 + 0,384 + 0,8 + 0,64 + 0}{0,1 + 0,048 + 0,2 + 0,16 + 0,272} = 3,36410m$$

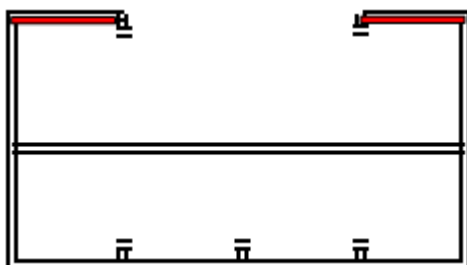
Figura C2 – Determinação da linha neutra exercício Apêndice C



Fonte: Autor (2018)

Determinando o Momento de Inércia da Seção em Relação à Linha Neutra:

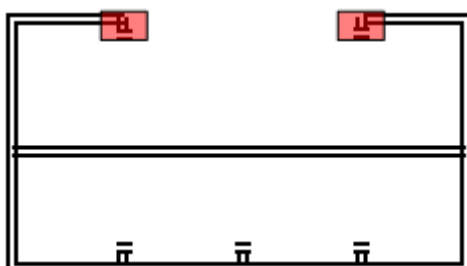
$$I_{LN} = \sum_{i=1}^n (I_{p,i} + I_{t,i})$$



Convés Superior:

$$I_{p,1} = \frac{2(5 * 0,01^3)}{12} \approx 0m^4$$

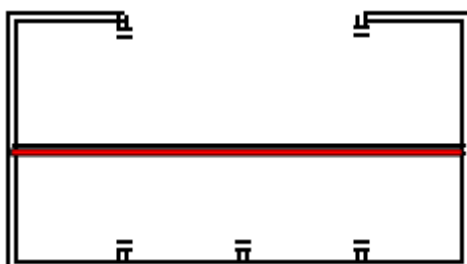
$$I_{t,1} = 0,1(8 - 3,364)^2 = 2,14915m^4$$



Sicordas:

$$I_{p,2} = \frac{2(0,15 * 0,15^3)}{12} \approx 0m^4$$

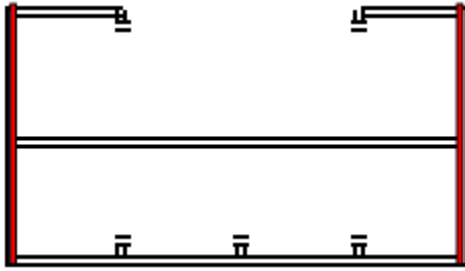
$$I_{t,2} = 0,048(8 - 3,364)^2 = 1,03159m^4$$



Convés Médio:

$$I_{p,3} = \frac{(20 * 0,01^3)}{12} \approx 0m^4$$

$$I_{t,3} = 0,2(4 - 3,364)^2 = 0,08087m^4$$



Costados:

$$I_{p,4} = \frac{2(0,01 * 8^3)}{12} = 0,85333m^4$$

$$I_{t,4} = 0,16(4 - 3,364)^2 = 0,06469m^4$$



Convés Inferior:

$$I_{p,5} = \frac{(20 * 0,01^3)}{12} \approx 0m^4$$

$$I_{t,5} = 0,2(3,364 - 0)^2 = 2,26343m^4$$



Quilhas:

$$I_{p,6} = \frac{3(0,15 * 0,15^3)}{12} \approx 0m^4$$

$$I_{t,6} = 0,072(3,364 - 0)^2 = 0,81483m^4$$

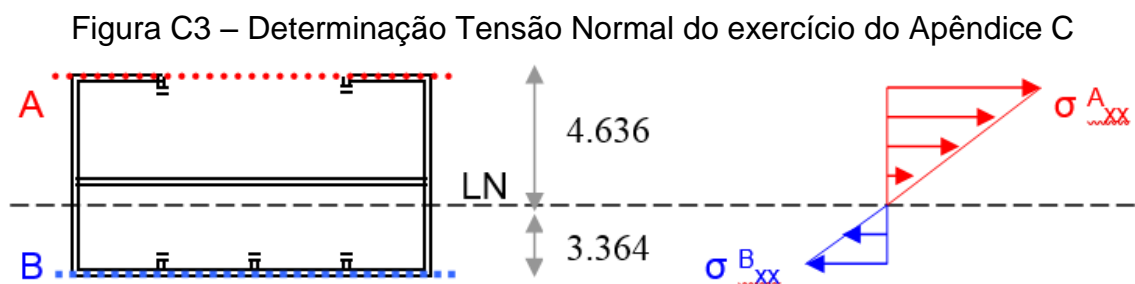
$$I_{LN} = \sum_{i=1}^n (I_{p,i} + I_{t,i})$$

$$I_{LN} = (2,15) + (1,03) + (0,08) + (0,85 + 0,12) + (2,26) + (0,81)$$

$$I_{LN} = 7,25792m^4$$

Determinando a distribuição da Tensão Normal:

$$\sigma_{xx} = \frac{M(y_q - y_{LN})}{I_{LN}}$$



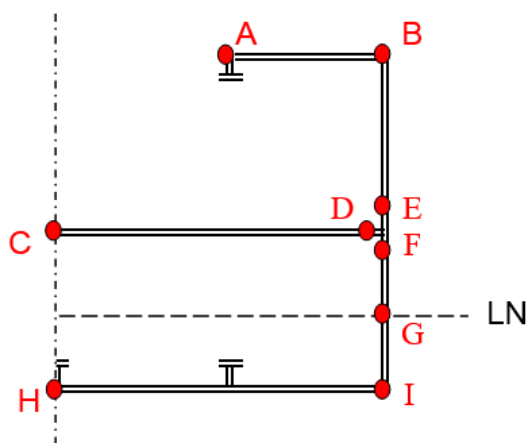
Fonte: Autor (2018)

$$\sigma_{xx}^A = \frac{60000000(8 - 3,36410)}{7,25792} = 38,32413 \text{MPa (Tração)}$$

$$\sigma_{xx}^B = \frac{60000000(3,36410 - 0)}{7,257923} = 27,81043 \text{MPa (Compressão)}$$

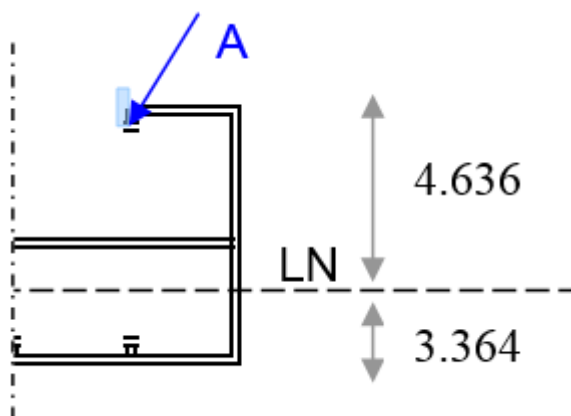
Determinando o Momento Estático ao longo da Seção:

Figura C4 – Pontos de Momento Estático da Seção do Apêndice C

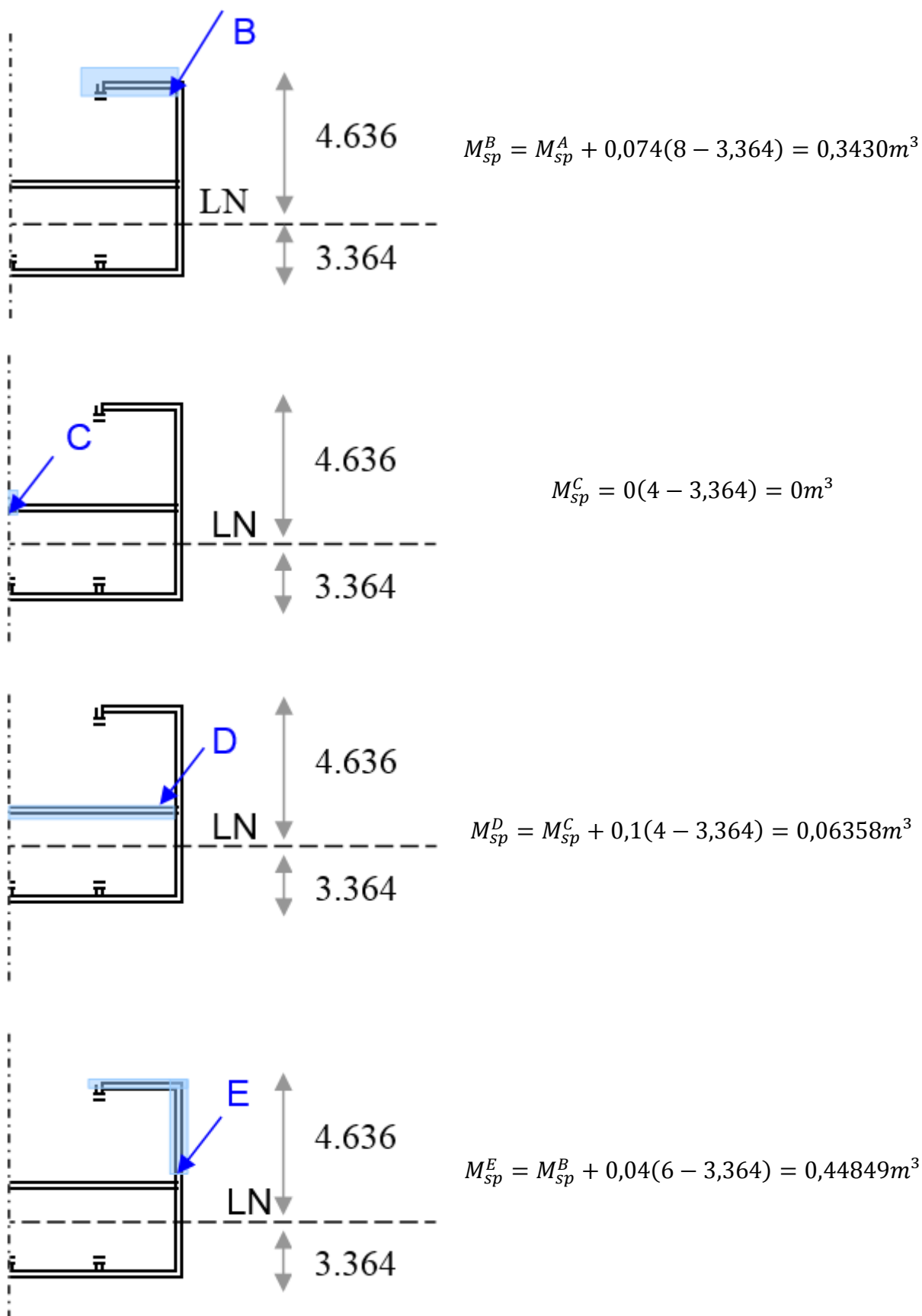


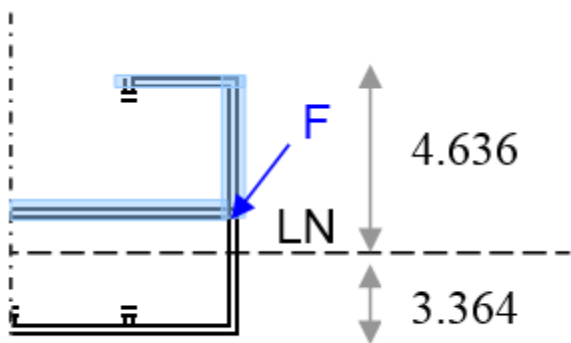
$$M_{se} = A_e(y_q - y_{LN})$$

Fonte: Autor (2018)

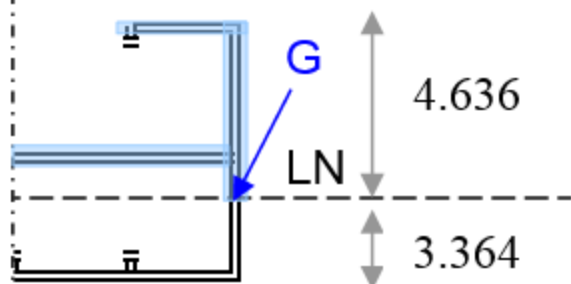


$$M_{sp}^A = 0(8 - 3,364) = 0 \text{m}^3$$



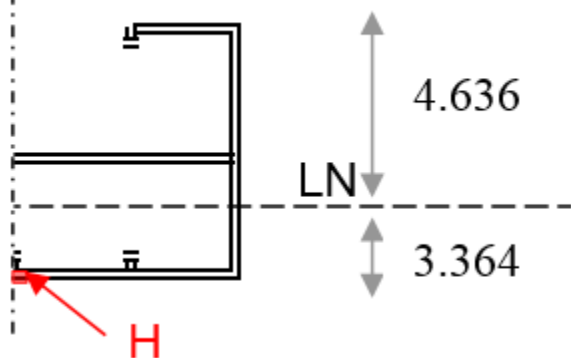


$$M_{sp}^F = M_{sp}^E + M_{sp}^D = 0,512082m^3$$

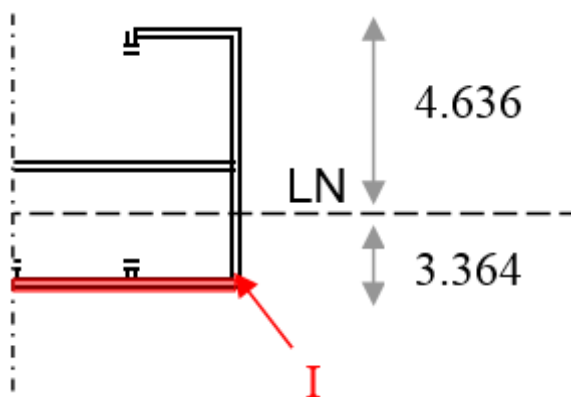


$$M_{sp}^G = M_{sp}^F + 0,00318(3,682 - 3,364)$$

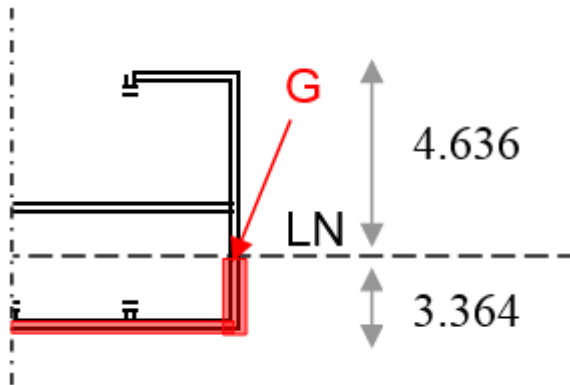
$$M_{sp}^G = 0,514103879m^3$$



$$M_{sp}^H = 0(3,364 - 0) = 0m^3$$



$$M_{sp}^I = M_{sp}^H + 0,136(3,364) = 0,4575179m^3$$

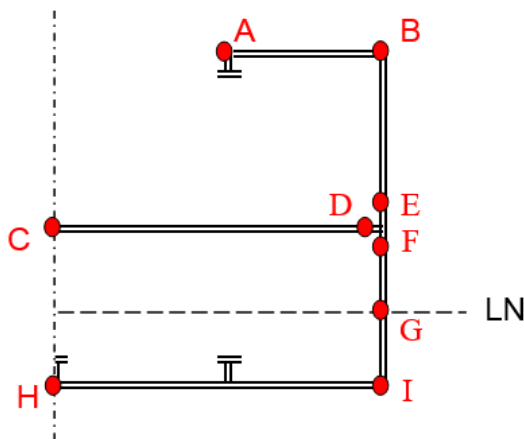


$$M_{sp}^G = M_{sp}^I + 0,03364(3,364 - 1,682)$$

$$M_{sp}^G = 0,514103879m^3$$

Verificação: o M_{se}^G calculado acima da Linha Neutra é igual ao M_{se}^G calculado por baixo da mesma, logo, os cálculos de Momento Estático estão corretos.

Determinando a Tensão de Cisalhamento nos pontos chaves:



$$\tau_{xy} = \frac{QM_{sp}}{I_{LN}t_p}$$

$$\tau_{xy}^A = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^A}{I_{LN}t_p^A} = \frac{150000 * 0}{7,25792 * 0,01} = 0MPa$$

$$\tau_{xy}^B = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^B}{I_{LN}t_p^B} = \frac{150000 * 0,3430}{7,25792 * 0,01} = 0,708996MPa$$

$$\tau_{xy}^C = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^C}{I_{LN}t_p^C} = \frac{150000 * 0}{7,25792 * 0,01} = 0MPa$$

$$\tau_{xy}^D = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^D}{I_{LN}t_p^D} = \frac{150000 * 0,06358}{7,25792 * 0,01} = 0,131421MPa$$

$$\tau_{xy}^E = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^E}{I_{LN}t_p^E} = \frac{150000 * 0,44849}{7,25792 * 0,01} = 0,926901MPa$$

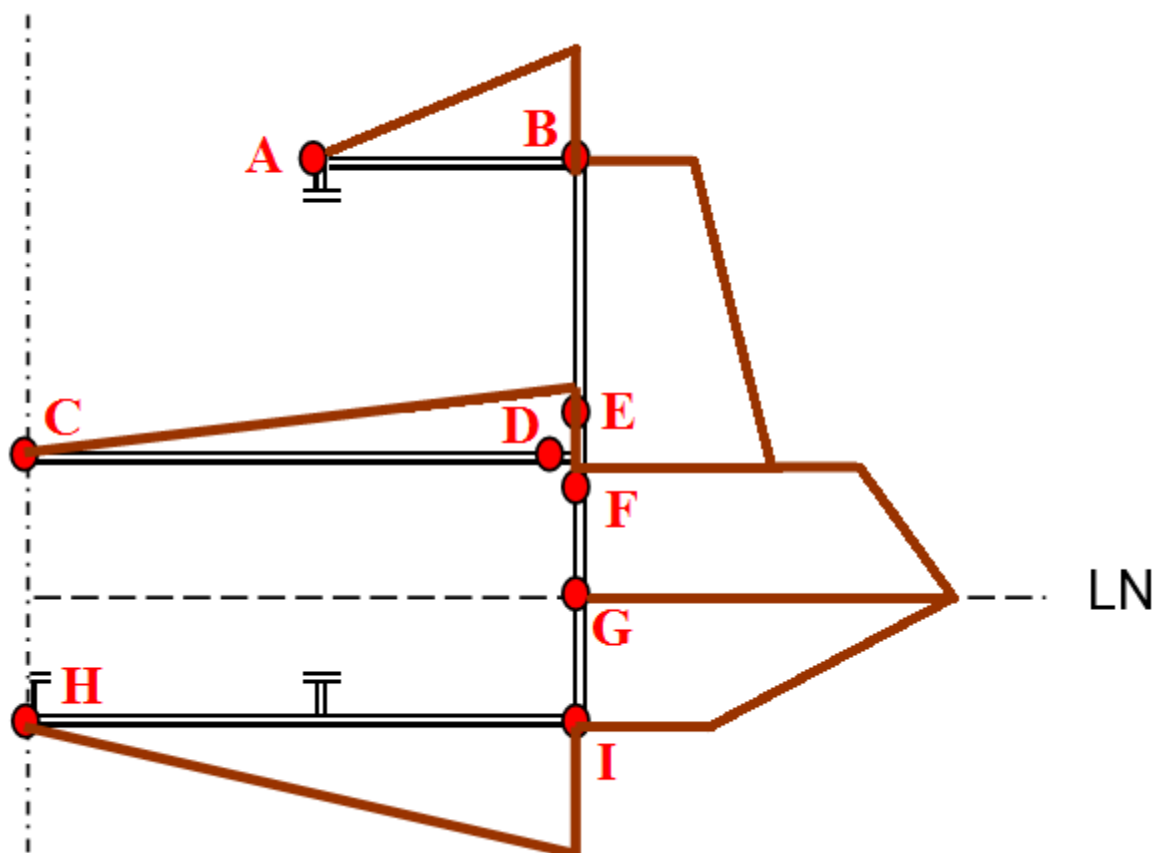
$$\tau_{xy}^F = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^F}{I_{LN}t_p^F} = \frac{150000 * 0,512082}{7,25792 * 0,01} = 1,058322MPa$$

$$\tau_{xy}^G = \frac{Q_{m\acute{a}x} M_{sp}^G}{I_{LN} t_p^G} = \frac{150000 * 0,514103}{7,25792 * 0,01} = 1,062501 MPa$$

$$\tau_{xy}^H = \frac{Q_{m\acute{a}x} M_{sp}^H}{I_{LN} t_p^H} = \frac{150000 * 0}{7,25792 * 0,01} = 0 MPa$$

$$\tau_{xy}^I = \frac{Q_{m\acute{a}x} M_{sp}^I}{I_{LN} t_p^I} = \frac{150000 * 0,4575179}{7,25792 * 0,01} = 0,945554 MPa$$

Figura C5 – Gráfico de Tensões Cisalhantes do Apêndice C



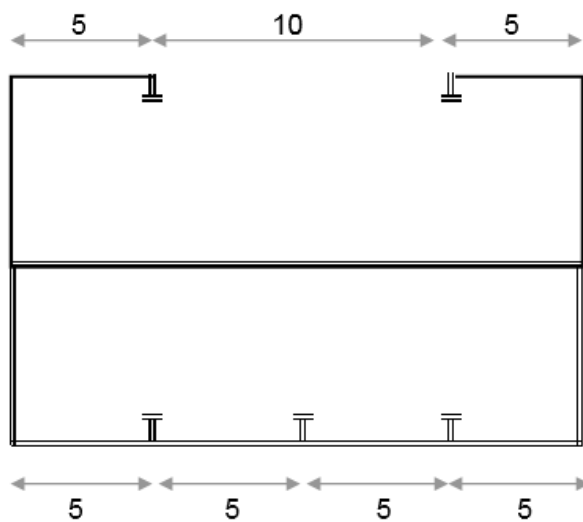
Fonte: Autor (2018)

APÊNDICE D

Cálculo Tensões Seção de Duas Espessuras

A seguir deve-se determinar a distribuição das Tensões Primárias na seção de Máximo Momento Fletor (60000kNm) e Máxima Força Cortante (150kN), representadas na figura.

Figura D1 – Desenho de seção exercício
Apêndice D

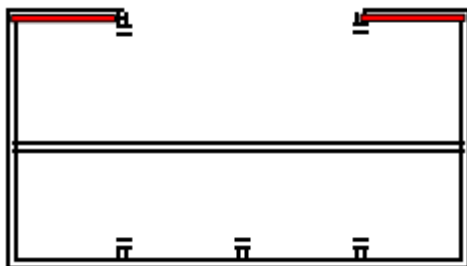


- Desenho da Seção da Barcaça (dimensões em metros)
- Espessura das chapas da Superestrutura: 5mm
- Espessura das chapas do Tanque: 10mm
- Área de cada reforçador: 0,024m²

Fonte: Autor (2018)

Determinando a posição da linha neutra:

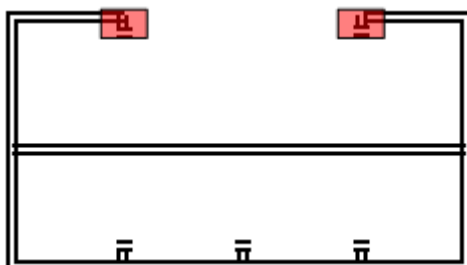
$$y_{LN} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{e,i} y_{q,i})}{\sum_{i=1}^n A_{e,i}}$$



Convés Superior:

$$A_{e,1} = 2(5 * 0,005) = 0,05m^2$$

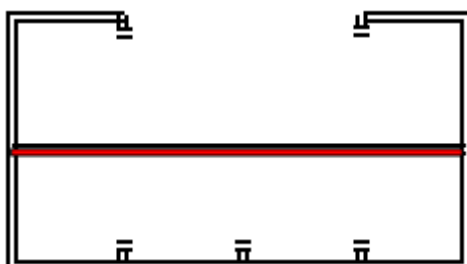
$$(A_{e,1}y_{q.1}) = (0,05 * 8) = 0,4m^3$$



Sicordas:

$$A_{e,2} = 2 * 0,024 = 0,048m^2$$

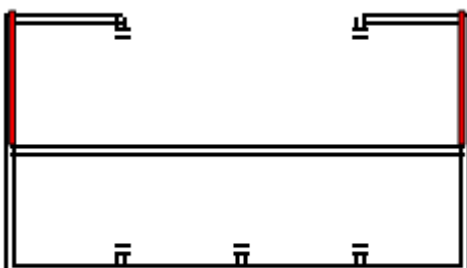
$$(A_{e,2}y_{q.2}) = (0,048 * 8) = 0,384m^3$$



Convés Médio:

$$A_{e,3} = (20 * 0,01) = 0,2m^2$$

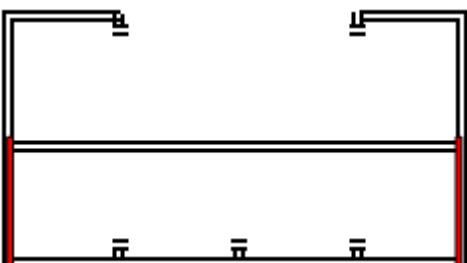
$$(A_{e,3}y_{q.3}) = (0,2 * 4) = 0,8m^3$$



Costados Superiores:

$$A_{e,4} = 2(4 * 0,005) = 0,04m^2$$

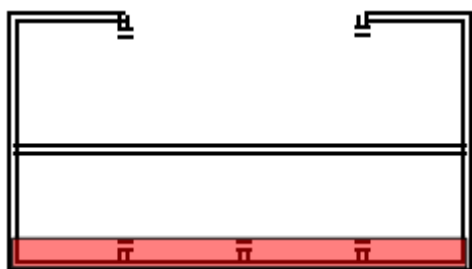
$$(A_{e,4}y_{q.4}) = (0,04 * 6) = 0,24m^3$$



Costados Inferiores:

$$A_{e,5} = 2(4 * 0,01) = 0,08m^2$$

$$(A_{e,5}y_{q.5}) = (0,08 * 2) = 0,16m^3$$



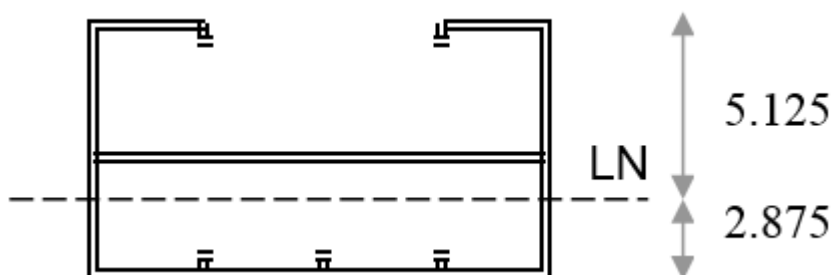
Convés Inferior e Quilhas:

$$A_{e6} = (20 * 0,01) + (3 * 0,024) = 0,272m^2$$

$$(A_{e,6}y_{q,6}) = (0,272 * 0) = 0m^3$$

$$y_{LN} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{e,i}y_{q,i})}{\sum_{i=1}^n A_{e,i}} = \frac{0,4 + 0,384 + 0,8 + 0,24 + 0,16 + 0}{0,05 + 0,048 + 0,2 + 0,04 + 0,08 + 0,272} = 2,875362319m$$

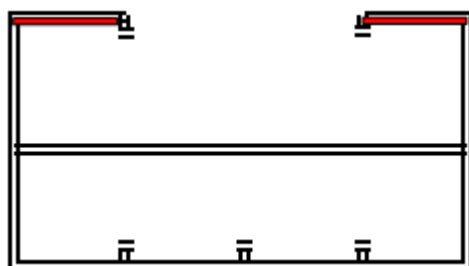
Figura D2 – Determinação da linha neutra exercício Apêndice D



Fonte: Autor (2018)

Determinando o Momento de Inércia da Seção em Relação à Linha Neutra:

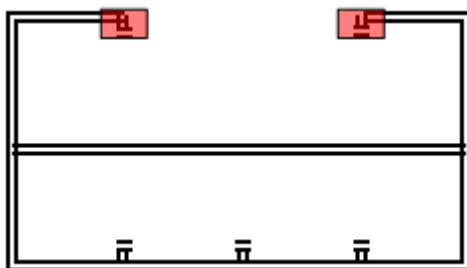
$$I_{LN} = \sum_{i=1}^n (I_{p,i} + I_{t,i})$$



Convés Superior:

$$I_{p,1} = \frac{2(5 * 0,005^3)}{12} \approx 0m^4$$

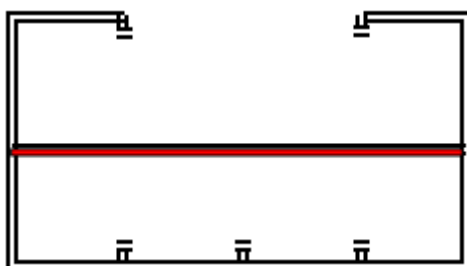
$$I_{t,1} = 0,05(8 - 2,875)^2 = 1,313095568m^4$$



Sicordas:

$$I_{p,2} = \frac{2(0,15 * 0,15^3)}{12} \approx 0m^4$$

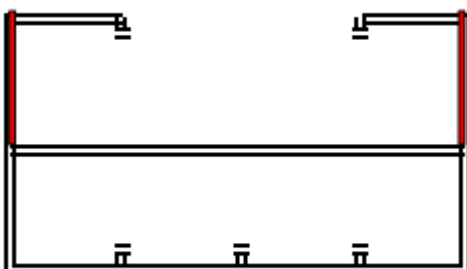
$$I_{t,2} = 0,048(8 - 2,875)^2 = 1,260571745m^4$$



Convés Médio:

$$I_{p,3} = \frac{(20 * 0,01^3)}{12} \approx 0m^4$$

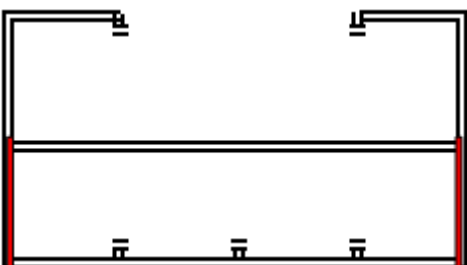
$$I_{t,3} = 0,2(4 - 2,875)^2 = 0,2529619828m^4$$



Costados Superiores:

$$I_{p,4} = \frac{2(0,005 * 4^3)}{12} = 0,0533333333333333m^4$$

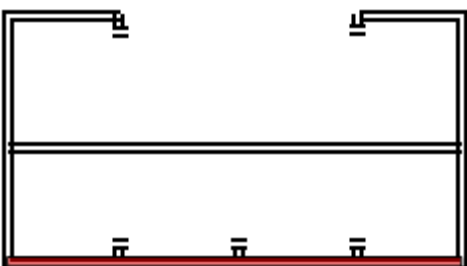
$$I_{t,4} = 0,04(6 - 2,875)^2 = 0,3905344255m^4$$



Costados Inferiores:

$$I_{p,5} = \frac{2(0,01 * 4^3)}{12} = 0,1066666667 m^4$$

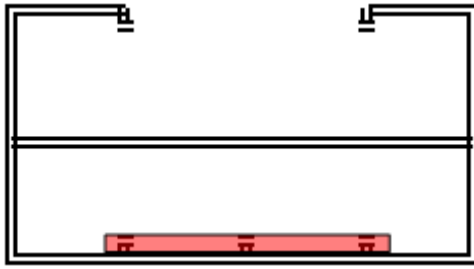
$$I_{t,5} = 0,08(2,875 - 2)^2 = 0,06130073514m^4$$



Convés Inferior:

$$I_{p,6} = \frac{(20 * 0,01^3)}{12} \approx 0m^4$$

$$I_{t,6} = 0,2(2,875 - 0)^2 = 1,653541693m^4$$



Quilhas:

$$I_{p,7} = \frac{3(0,15 * 0,15^3)}{12} \approx 0m^4$$

$$I_{t,7} = 0,072(2,875 - 0)^2 = 0,5952750095m^4$$

$$I_{LN} = \sum_{i=1}^n (I_{p,i} + I_{t,i})$$

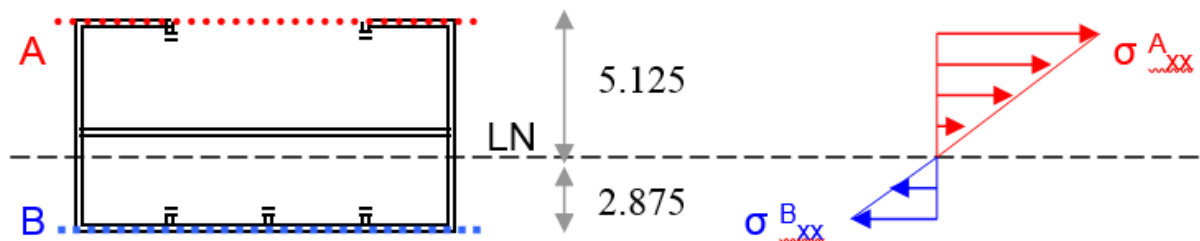
$$I_{LN} = (1,31) + (1,26) + (0,25) + (0,05 + 0,39) + (0,11 + 0,06) + (1,65) + (0,6)$$

$$I_{LN} = 5,687281159 m^4$$

Determinando a distribuição da Tensão Normal:

$$\sigma_{xx} = \frac{M(y_q - y_{LN})}{I_{LN}}$$

Figura D3 – Determinação Tensão Normal do exercício do Apêndice D



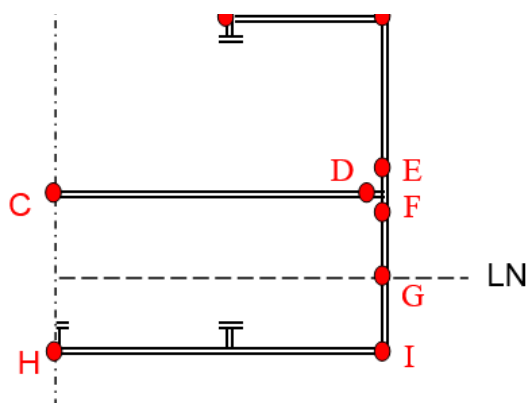
Fonte: Autor (2018)

$$\sigma_{xx}^A = \frac{60000000(8 - 2,875362319)}{5,687281159} = 54,06419206MPa \text{ (Tração)}$$

$$\sigma_{xx}^B = \frac{60000000(2,875362319 - 0)}{5,687281159} = 30,3346598MPa \text{ (Compressão)}$$

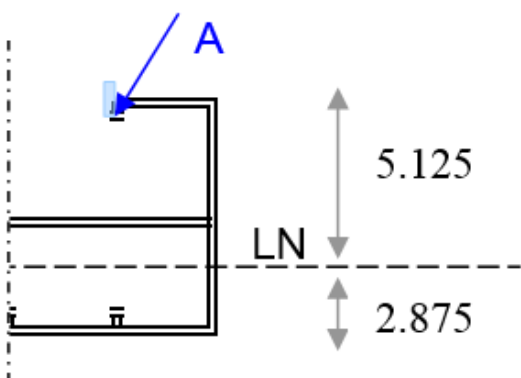
Determinando o Momento Estático ao longo da Seção:

Figura D4 – Pontos de Momento Estático ao longo da Seção

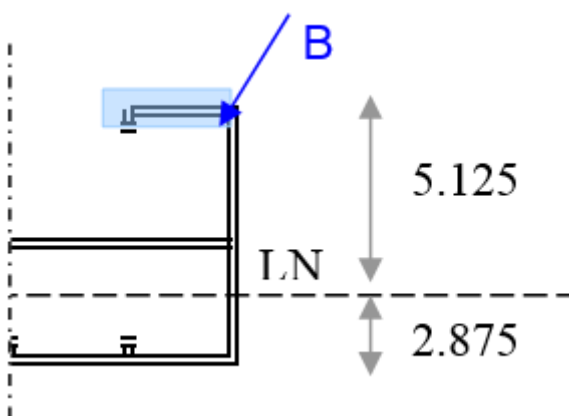


Fonte: Autor (2018)

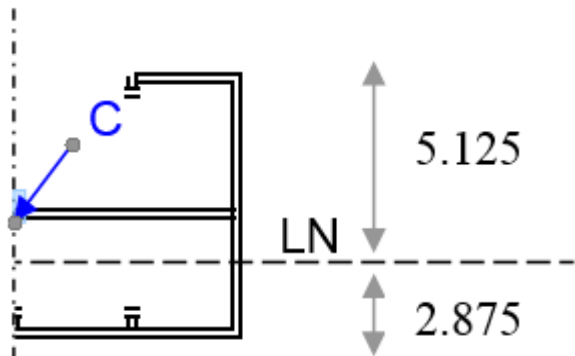
$$M_{se} = A_e(y_q - y_{LN})$$



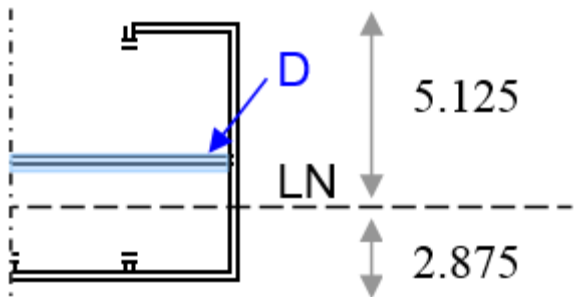
$$M_{sp}^A = 0(8 - 2,875) = 0m^3$$



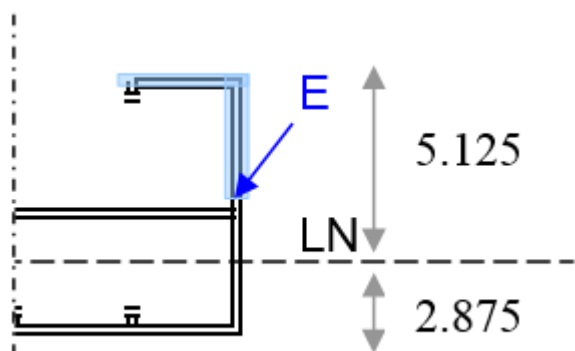
$$M_{sp}^B = M_{sp}^A + 0,049(8 - 2,875) = 0,2511m^3$$



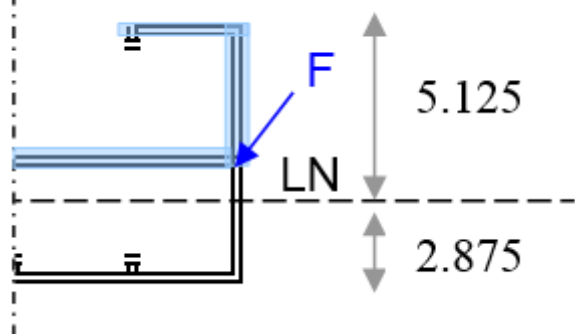
$$M_{sp}^C = 0(4 - 2,875) = 0m^3$$



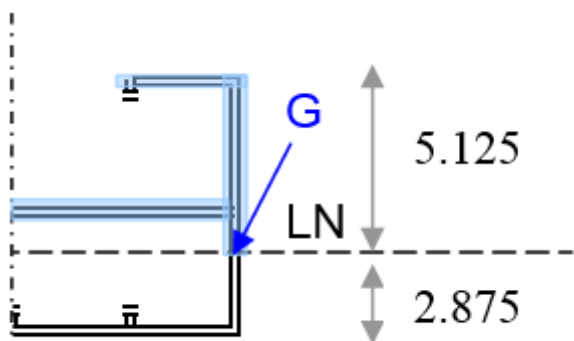
$$M_{sp}^D = M_{sp}^C + 0,1(4 - 2,875) = 0,112463m^3$$



$$M_{sp}^E = M_{sp}^B + 0,02(6 - 2,875) = 0,3136m^3$$

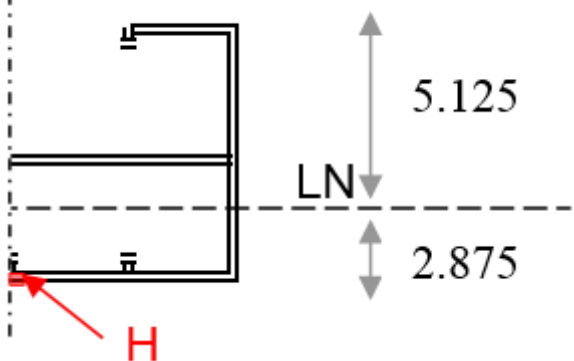


$$M_{sp}^F = M_{sp}^E + M_{sp}^D = 0,4260637681m^3$$

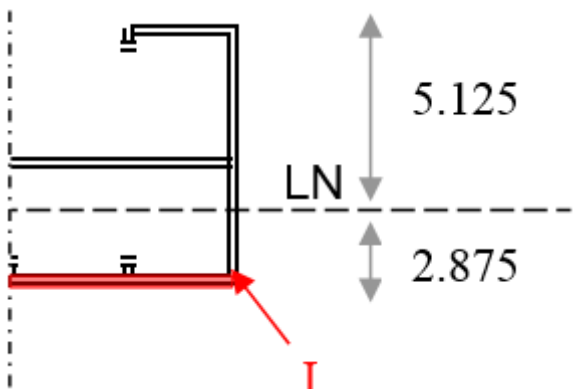


$$M_{sp}^G = M_{sp}^F + 0,01125(3,4375 - 2,875)$$

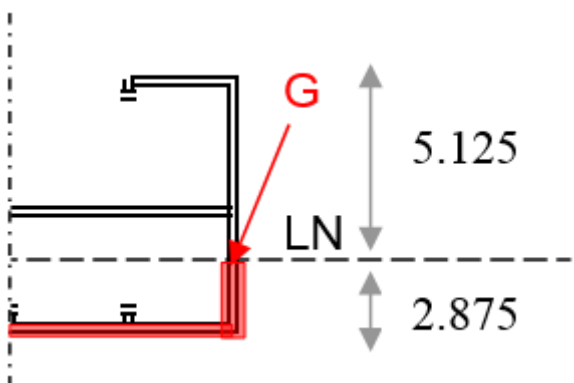
$$M_{sp}^G = 0,4323878177m^3$$



$$M_{sp}^H = 0(2,875 - 0) = 0m^3$$



$$M_{sp}^I = M_{sp}^H + 0,136(2,875) = 0,39104927m^3$$

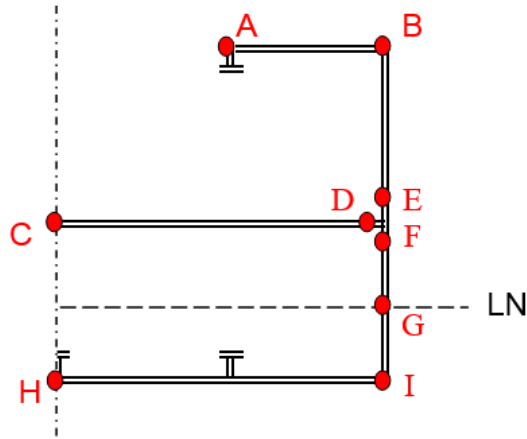


$$M_{sp}^G = M_{sp}^I + 0,02875(2,875 - 1,4375)$$

$$M_{sp}^G = 0,4323878177m^3$$

Verificação: o M_{se}^G calculado acima da Linha Neutra é igual ao M_{se}^G calculado por baixo da mesma, logo, os cálculos de Momento Estático estão corretos.

Determinando a Tensão de Cisalhamento nos pontos chaves:



$$\tau_{xy} = \frac{QM_{sp}}{I_{LN}t_p}$$

$$\tau_{xy}^A = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^A}{I_{LN}t_p^A} = \frac{150000 * 0}{5,687281159 * 0,005} = 0MPa$$

$$\tau_{xy}^B = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^B}{I_{LN}t_p^B} = \frac{150000 * 0,2511}{5,687281159 * 0,005} = 1,324572705MPa$$

$$\tau_{xy}^C = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^C}{I_{LN}t_p^C} = \frac{150000 * 0}{5,687281159 * 0,01} = 0MPa$$

$$\tau_{xy}^D = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^D}{I_{LN}t_p^D} = \frac{150000 * 0,112463}{5,687281159 * 0,01} = 0,2966191533MPa$$

$$\tau_{xy}^E = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^E}{I_{LN}t_p^E} = \frac{150000 * 0,3136}{5,687281159 * 0,005} = 1,654217496MPa$$

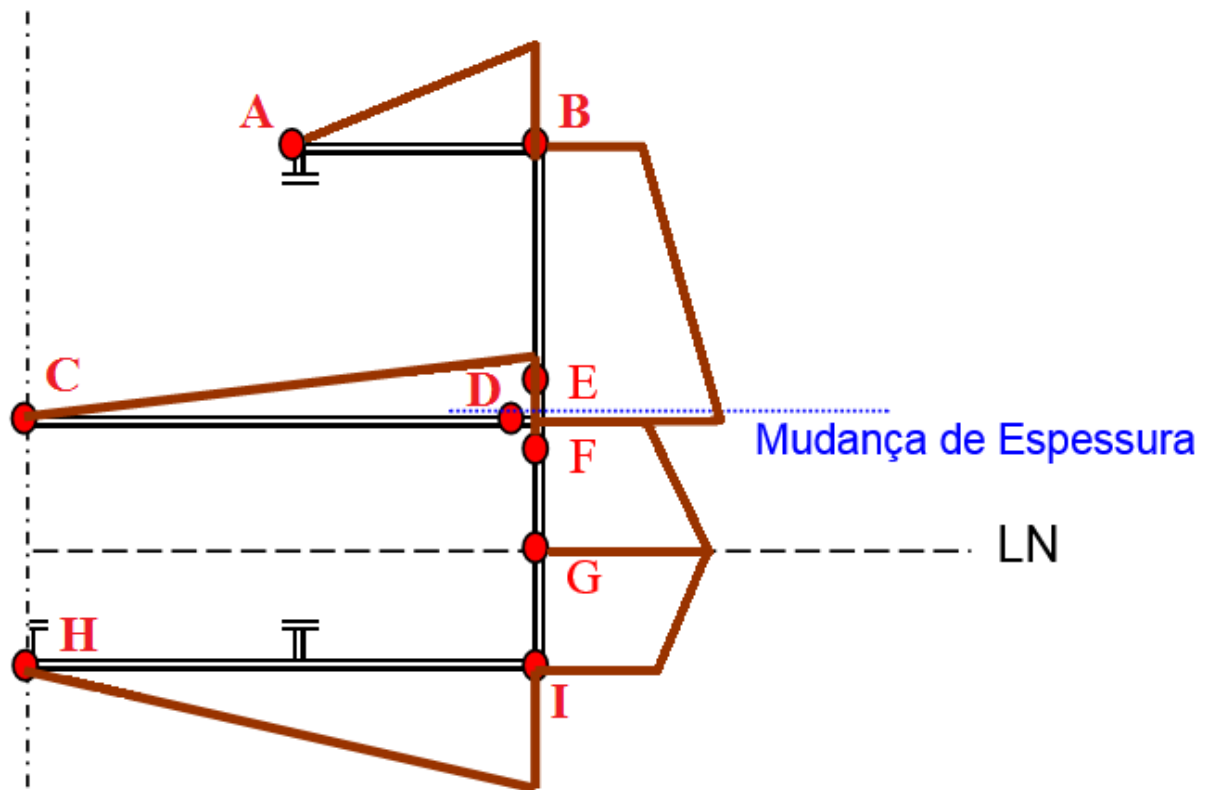
$$\tau_{xy}^F = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^F}{I_{LN}t_p^F} = \frac{150000 * 0,4260637681}{5,687281159 * 0,01} = 1,123727901MPa$$

$$\tau_{xy}^G = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^G}{I_{LN}t_p^G} = \frac{150000 * 0,4323878177}{5,687281159 * 0,01} = 1,140407355MPa$$

$$\tau_{xy}^H = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^H}{I_{LN}t_p^H} = \frac{150000 * 0}{5,687281159 * 0,01} = 0MPa$$

$$\tau_{xy}^I = \frac{Q_{m\acute{a}x}M_{sp}^I}{I_{LN}t_p^I} = \frac{150000 * 0,39104927m}{5,687281159 * 0,01} = 1,031378433MPa$$

Figura D5 – Gráfico de Tensões Cisalhantes do Apêndice D



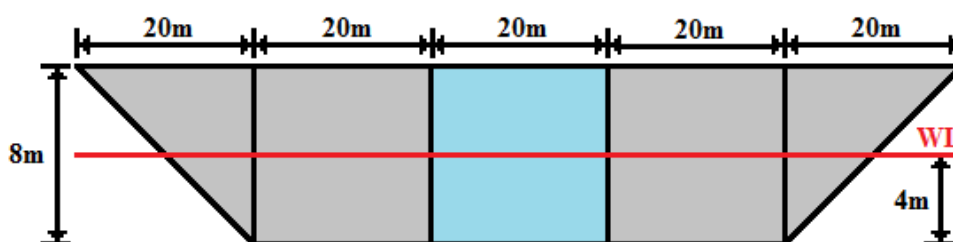
Fonte: Autor (2018)

APÊNDICE E

Exemplo Barcaça Sem Ângulo Trim

Um navio com casco prismático de proa e popa em forma de cunha, cujas dimensões aparecem na figura abaixo, possui Boca (B) de $20m$, e três tanques. Considerando que o Peso Leve (P_{leve}) deste navio é de $1300t$ e que no tanque central carrega $4355t$ de Lastro (P_{lastro}) construa os gráficos das Curvas de Pesos, Flutuação, Carga, Força Cortante e Momento Fletor referentes ao equilíbrio do mesmo. Considere Comprimento total da embarcação (C_{total}) de $100m$ e Gravidade (g) de $9,8m/s^2$, Calado (T) de $4m$ e Massa Específica da Água ($\rho_{\acute{a}gua}$) de $1,025ton/m^3$.

Figura E1 – Barcaça de proa e popa em forma de cunha



Fonte: Autor (2018)

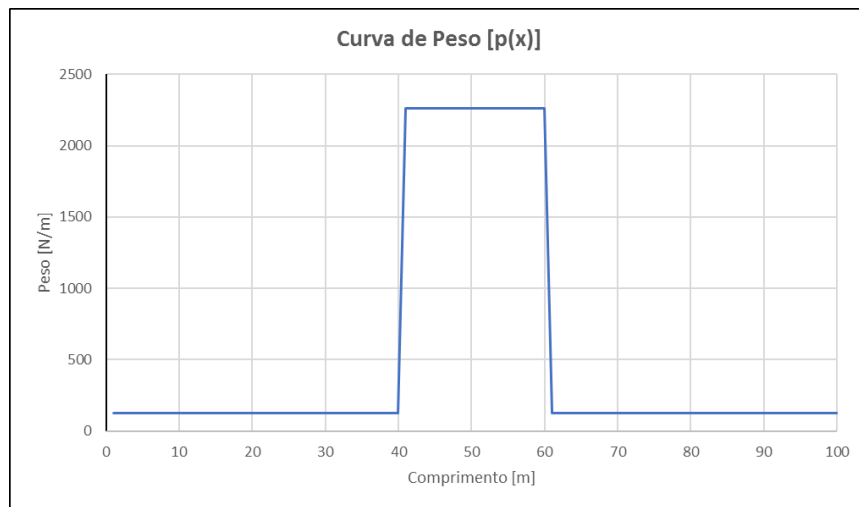
Curva de Pesos:

$$p(x < 40) = \frac{P_{leve} * g}{C_{total}} = \frac{1300 * 9,8}{100} = 127,48N/m$$

$$p(40 < x < 60) = \frac{(P_{leve} + P_{lastro})g}{C_{total}} = \frac{(1300 + 4355)9,8}{100} = 2262,88N/m$$

$$p(60 < x < 100) = \frac{P_{leve} * g}{C_{total}} = \frac{1300 * 9,8}{100} = 127,48N/m$$

Figura E2 – Gráfico Curva de Pesos Apêndice E



Fonte: Autor (2018)

Curva de Flutuação:

$$b(x < 10) = 0 \text{ N/m}$$

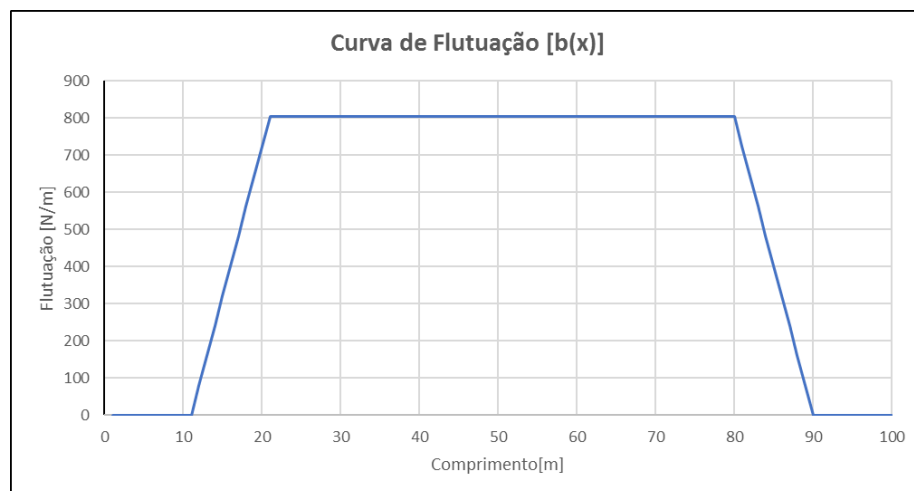
$$b(10 < x < 20) = \text{linear como a forma do casco}$$

$$b(20 < x < 80) = T * B * \rho_{\text{água}} * g = 4 * 20 * 1,025 * 9,8 = 803,703 \text{ N/m}$$

$$b(80 < x < 90) = \text{linear como a forma do casco}$$

$$b(90 < x < 100) = 0 \text{ N/m}$$

Figura E3 – Gráfico Curva de Flutuação Apêndice E



Fonte: Autor (2018)

Curva de Carga:

$$q(x) = p(x) - b(x)$$

$$q(x < 10) = 127,48 - 0 = 127,48N/m$$

$$q(10 < x < 20) = \text{linear de } 127,48N/m \text{ até } -676,216N/m$$

$$q(20 < x < 40) = 127,48 - 803,703 = -676,216N/m$$

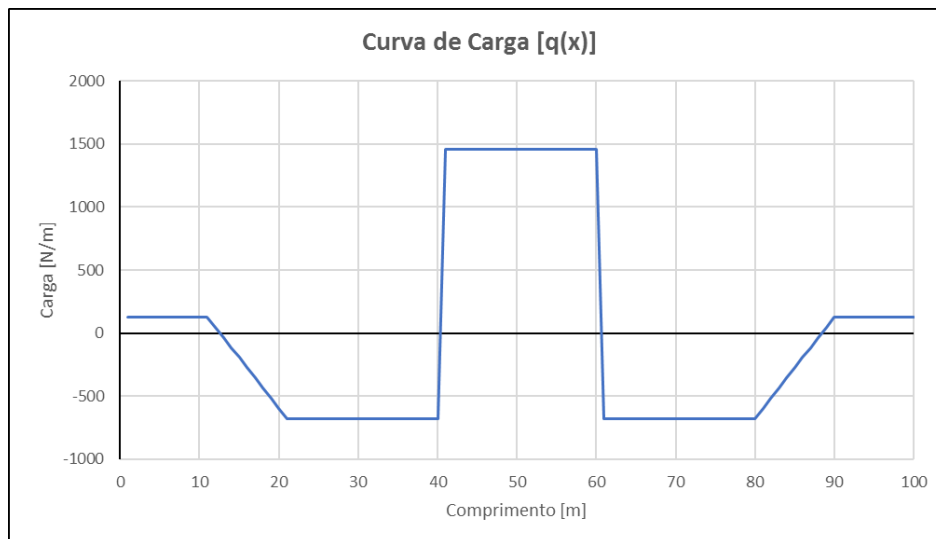
$$q(40 < x < 60) = 2262,88 - 803,703 = 1459,18N/m$$

$$q(60 < x < 80) = 127,48 - 803,703 = -676,216N/m$$

$$q(80 < x < 90) = \text{linear de } -676,216N/m \text{ até } 127,48N/m$$

$$q(90 < x < 100) = 127,48 - 0 = 127,48N/m$$

Figura E4 – Gráfico Curva de Carga Apêndice E



Fonte: Autor (2018)

Curva de Força Cortante:

$$Q(x) = \sum_{x=1}^n q(x)$$

$$Q(x = 0) = \sum_{x=1}^0 q(x) = 0N$$

$$Q(x = 10) = \sum_{x=1}^{10} q(x) = 1274,87N$$

$$Q(x = 20) = \sum_{x=1}^{20} q(x) = -1067,5N$$

$$Q(x = 30) = \sum_{x=1}^{30} q(x) = -7829,66N$$

$$Q(x = 40) = \sum_{x=1}^{40} q(x) = -14591,82N$$

$$Q(x = 50) = \sum_{x=1}^{50} q(x) = 0N$$

$$Q(x = 60) = \sum_{x=1}^{60} q(x) = 14591,82N$$

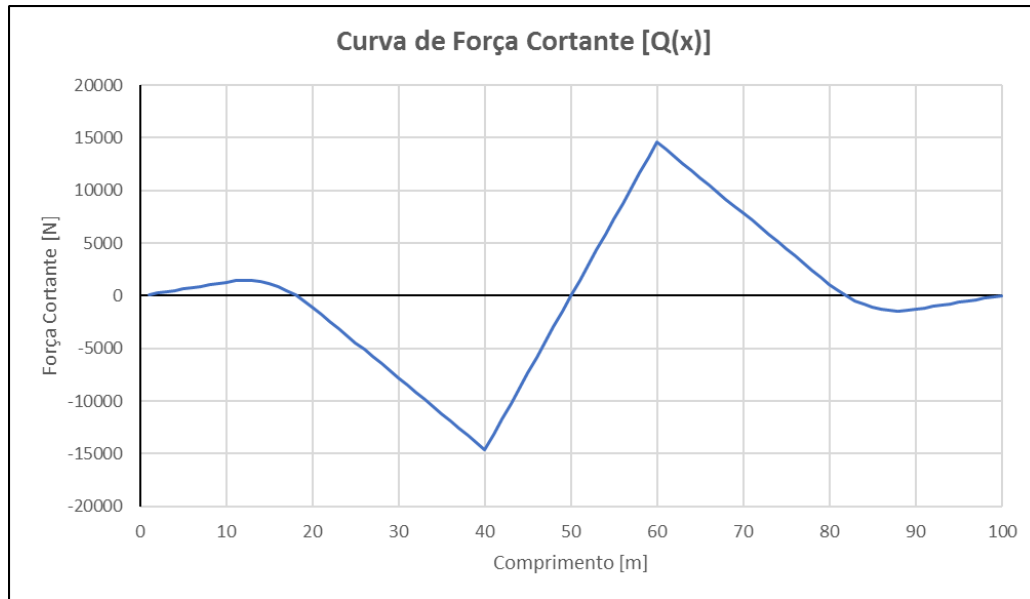
$$Q(x = 70) = \sum_{x=1}^{70} q(x) = 7829,66N$$

$$Q(x = 80) = \sum_{x=1}^{80} q(x) = 1067,5N$$

$$Q(x = 90) = \sum_{x=1}^{90} q(x) = -1274,87N$$

$$Q(x = 100) = \sum_{x=1}^{100} q(x) = 0N$$

Figura E5 – Gráfico Curva de Força Cortante Apêndice E



Fonte: Autor (2018)

Curva de Momento Fletor:

$$M(x) = \sum_{x=1}^n Q(x)$$

$$M(x = 0) = \sum_{x=1}^0 Q(x) = 0Nm$$

$$M(x = 10) = \sum_{x=1}^{10} Q(x) = 7011,75Nm$$

$$M(x = 20) = \sum_{x=1}^{20} Q(x) = 13507,11Nm$$

$$M(x = 30) = \sum_{x=1}^{30} Q(x) = -34359,74Nm$$

$$M(x = 40) = \sum_{x=1}^{40} Q(x) = -149848,21Nm$$

$$M(x = 50) = \sum_{x=1}^{50} Q(x) = -215511,39Nm$$

$$M(x = 60) = \sum_{x=1}^{60} Q(x) = -135256,39Nm$$

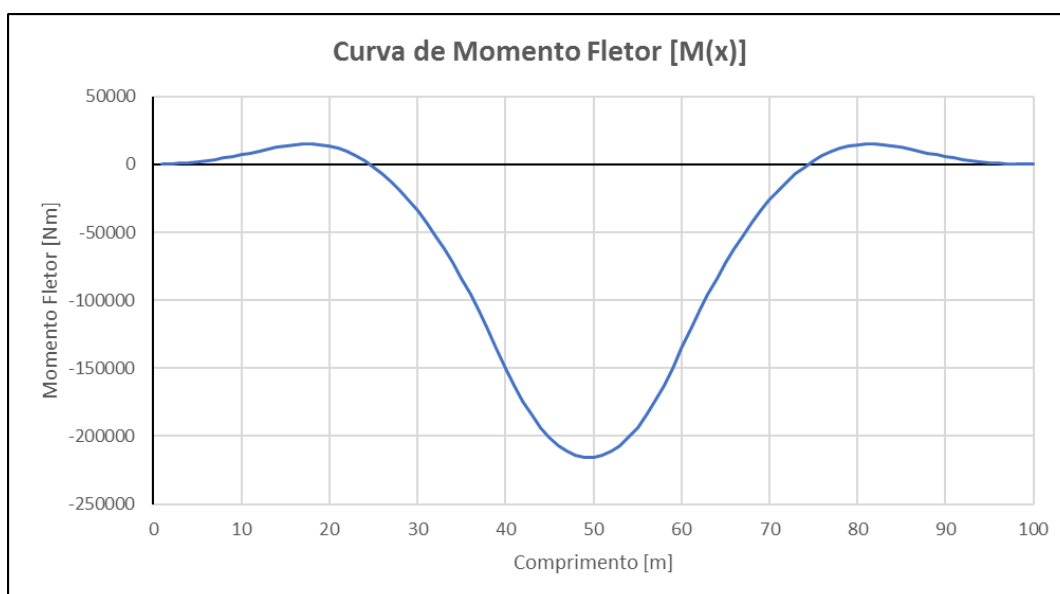
$$M(x = 70) = \sum_{x=1}^{70} Q(x) = -26530,08Nm$$

$$M(x = 80) = \sum_{x=1}^{80} Q(x) = 14574,61Nm$$

$$M(x = 90) = \sum_{x=1}^{90} Q(x) = 5736,89Nm$$

$$M(x = 100) = \sum_{x=1}^{100} Q(x) = 0Nm$$

Figura E6 – Gráfico Curva Momento Fletor Apêndice E



Fonte: Autor (2018)

Valores de Força Cortante e Momento Fletor Máximos:

$$M_{m\acute{a}x} = abs[M(50)] = 215511,39Nm$$

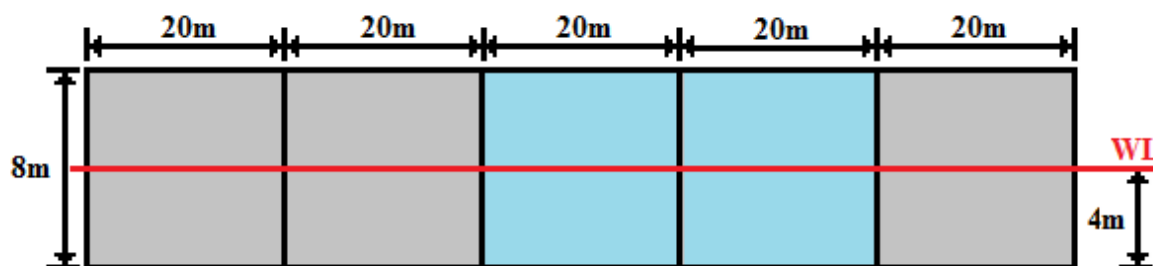
$$Q_{m\acute{a}x} = abs[Q(40)] = Q(60) = 14591,82N$$

APÊNDICE F

Exemplo Barcaça Com Ângulo Trim

Um navio com casco prismático, cujas dimensões aparecem na figura abaixo, possui Boca (B) de $20m$, e cinco tanques. Considerando que o Peso Leve (P_{leve}) deste navio é de $1300t$ e que nos tanques 3 e 4 carrega um total de $4355t$ de Lastro (P_{lastro}) construa os gráficos das Curvas de Pesos, Flutuação, Carga, Força Cortante e Momento Fletor referentes ao equilíbrio do mesmo. Considere Comprimento total da embarcação (C_{total}) de $100m$ e Gravidade (g) de $9,8m/s^2$, Calado (T) de $4m$ e Massa Específica da Água ($\rho_{\acute{a}gua}$) de $1,025ton/m^3$.

Figura F1 – Navio de casco prismático



Fonte: Autor (2018)

Exercício resolvido de forma numérica, e seu resultados mostrados a seguir:

Tabela F1 - Parte 1 da tabela de resultados do Apêndice F

Posição	Deslocamento Leve	Lastro	T(x)	p(x)	b(x)	q(x)	Q(x)	M(x)
m	N	N	m	N/m	N/m	N/m	N	Nm
1,00	127,49	0,00	1,50	127,49	300,86	-173,37	-173,37	-173,37
2,00	127,49	0,00	1,52	127,49	305,98	-178,49	-351,86	-525,23
3,00	127,49	0,00	1,55	127,49	311,11	-183,62	-535,48	-1060,72
4,00	127,49	0,00	1,57	127,49	316,23	-188,75	-724,23	-1784,94
5,00	127,49	0,00	1,60	127,49	321,36	-193,87	-918,10	-2703,04
6,00	127,49	0,00	1,63	127,49	326,48	-199,00	-1117,10	-3820,14
7,00	127,49	0,00	1,65	127,49	331,61	-204,12	-1321,22	-5141,36
8,00	127,49	0,00	1,68	127,49	336,73	-209,25	-1530,46	-6671,82
9,00	127,49	0,00	1,70	127,49	341,86	-214,37	-1744,84	-8416,66
10,00	127,49	0,00	1,73	127,49	346,98	-219,50	-1964,34	-10380,99
11,00	127,49	0,00	1,75	127,49	352,11	-224,62	-2188,96	-12569,95
12,00	127,49	0,00	1,78	127,49	357,24	-229,75	-2418,71	-14988,66
13,00	127,49	0,00	1,80	127,49	362,36	-234,87	-2653,58	-17642,24
14,00	127,49	0,00	1,83	127,49	367,49	-240,00	-2893,58	-20535,83
15,00	127,49	0,00	1,85	127,49	372,61	-245,13	-3138,71	-23674,54
16,00	127,49	0,00	1,88	127,49	377,74	-250,25	-3388,96	-27063,49
17,00	127,49	0,00	1,91	127,49	382,86	-255,38	-3644,34	-30707,83
18,00	127,49	0,00	1,93	127,49	387,99	-260,50	-3904,84	-34612,67
19,00	127,49	0,00	1,96	127,49	393,11	-265,63	-4170,46	-38783,13
20,00	127,49	0,00	1,98	127,49	398,24	-270,75	-4441,22	-43224,35
21,00	127,49	0,00	2,01	127,49	403,36	-275,88	-4717,10	-47941,45
22,00	127,49	0,00	2,03	127,49	408,49	-281,00	-4998,10	-52939,55
23,00	127,49	0,00	2,06	127,49	413,62	-286,13	-5284,23	-58223,78
24,00	127,49	0,00	2,08	127,49	418,74	-291,25	-5575,48	-63799,26

Fonte: Autor (2018)

Tabela F2 – Parte 2 da tabela de resultados do Apêndice F

Posição	Deslocamento Leve	Lastro	T(x)	p(x)	b(x)	q(x)	Q(x)	M(x)
m	N	N	m	N/m	N/m	N/m	N	Nm
25,00	127,49	0,00	2,11	127,49	423,87	-296,38	-5871,86	-69671,12
26,00	127,49	0,00	2,14	127,49	428,99	-301,51	-6173,37	-75844,49
27,00	127,49	0,00	2,16	127,49	434,12	-306,63	-6480,00	-82324,49
28,00	127,49	0,00	2,19	127,49	439,24	-311,76	-6791,76	-89116,25
29,00	127,49	0,00	2,21	127,49	444,37	-316,88	-7108,64	-96224,89
30,00	127,49	0,00	2,24	127,49	449,49	-322,01	-7430,65	-103655,54
31,00	127,49	0,00	2,26	127,49	454,62	-327,13	-7757,78	-111413,32
32,00	127,49	0,00	2,29	127,49	459,74	-332,26	-8090,04	-119503,36
33,00	127,49	0,00	2,31	127,49	464,87	-337,38	-8427,42	-127930,78
34,00	127,49	0,00	2,34	127,49	470,00	-342,51	-8769,93	-136700,71
35,00	127,49	0,00	2,36	127,49	475,12	-347,63	-9117,57	-145818,28
36,00	127,49	0,00	2,39	127,49	480,25	-352,76	-9470,33	-155288,60
37,00	127,49	0,00	2,42	127,49	485,37	-357,89	-9828,21	-165116,82
38,00	127,49	0,00	2,44	127,49	490,50	-363,01	-10191,22	-175308,04
39,00	127,49	0,00	2,47	127,49	495,62	-368,14	-10559,36	-185867,40
40,00	127,49	0,00	2,49	127,49	500,75	-373,26	-10932,62	-196800,02
41,00	127,49	1067,70	2,52	1195,19	505,87	689,31	-10243,31	-207043,33
42,00	127,49	1067,70	2,54	1195,19	511,00	684,19	-9559,13	-216602,46
43,00	127,49	1067,70	2,57	1195,19	516,13	679,06	-8880,07	-225482,52
44,00	127,49	1067,70	2,59	1195,19	521,25	673,93	-8206,13	-233688,65
45,00	127,49	1067,70	2,62	1195,19	526,38	668,81	-7537,32	-241225,98
46,00	127,49	1067,70	2,65	1195,19	531,50	663,68	-6873,64	-248099,61
47,00	127,49	1067,70	2,67	1195,19	536,63	658,56	-6215,08	-254314,69
48,00	127,49	1067,70	2,70	1195,19	541,75	653,43	-5561,65	-259876,34
49,00	127,49	1067,70	2,72	1195,19	546,88	648,31	-4913,34	-264789,67

Fonte: Autor (2018)

Tabela F3 – Parte 3 da tabela de resultados do Apêndice F

Posição	Deslocamento Leve	Lastro	T(x)	p(x)	b(x)	q(x)	Q(x)	M(x)
m	N	N	m	N/m	N/m	N/m	N	Nm
50,00	127,49	1067,70	2,75	1195,19	552,00	643,18	-4270,16	-269059,83
51,00	127,49	1067,70	2,77	1195,19	557,13	638,06	-3632,10	-272691,93
52,00	127,49	1067,70	2,80	1195,19	562,25	632,93	-2999,17	-275691,09
53,00	127,49	1067,70	2,82	1195,19	567,38	627,81	-2371,36	-278062,46
54,00	127,49	1067,70	2,85	1195,19	572,51	622,68	-1748,68	-279811,14
55,00	127,49	1067,70	2,88	1195,19	577,63	617,55	-1131,13	-280942,26
56,00	127,49	1067,70	2,90	1195,19	582,76	612,43	-518,70	-281460,96
57,00	127,49	1067,70	2,93	1195,19	587,88	607,30	88,61	-281372,35
58,00	127,49	1067,70	2,95	1195,19	593,01	602,18	690,78	-280681,57
59,00	127,49	1067,70	2,98	1195,19	598,13	597,05	1287,84	-279393,73
60,00	127,49	1067,70	3,00	1195,19	603,26	591,93	1879,77	-277513,97
61,00	127,49	1067,70	3,03	1195,19	608,38	586,80	2466,57	-275047,40
62,00	127,49	1067,70	3,05	1195,19	613,51	581,68	3048,24	-271999,15
63,00	127,49	1067,70	3,08	1195,19	618,63	576,55	3624,79	-268374,36
64,00	127,49	1067,70	3,10	1195,19	623,76	571,43	4196,22	-264178,14
65,00	127,49	1067,70	3,13	1195,19	628,89	566,30	4762,52	-259415,62
66,00	127,49	1067,70	3,16	1195,19	634,01	561,17	5323,70	-254091,92
67,00	127,49	1067,70	3,18	1195,19	639,14	556,05	5879,74	-248212,18
68,00	127,49	1067,70	3,21	1195,19	644,26	550,92	6430,67	-241781,51
69,00	127,49	1067,70	3,23	1195,19	649,39	545,80	6976,47	-234805,04
70,00	127,49	1067,70	3,26	1195,19	654,51	540,67	7517,14	-227287,90
71,00	127,49	1067,70	3,28	1195,19	659,64	535,55	8052,69	-219235,22
72,00	127,49	1067,70	3,31	1195,19	664,76	530,42	8583,11	-210652,11
73,00	127,49	1067,70	3,33	1195,19	669,89	525,30	9108,40	-201543,71
74,00	127,49	1067,70	3,36	1195,19	675,01	520,17	9628,58	-191915,13

Fonte: Autor (2018)

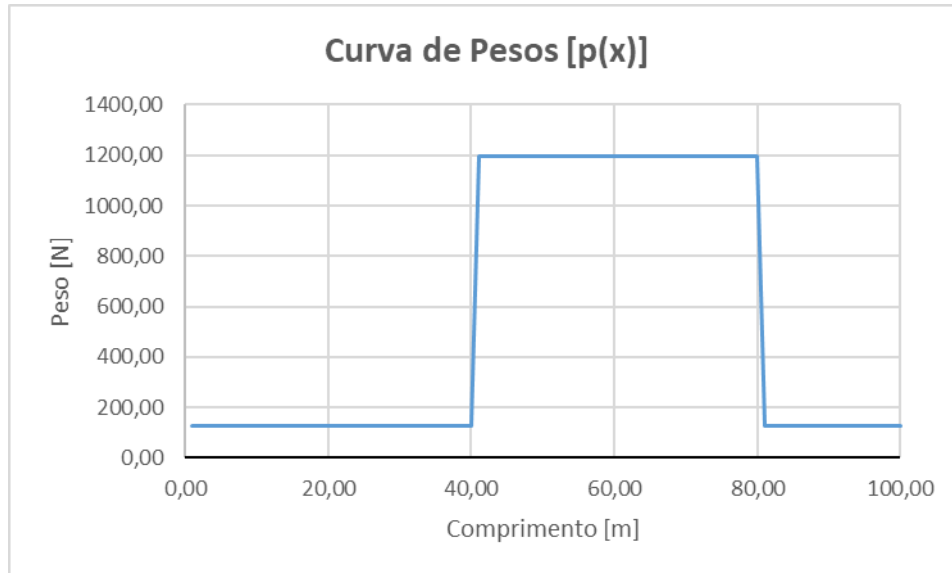
Tabela F4 – Parte 4 da tabela de resultados do Apêndice F

Posição	Deslocamento Leve	Lastro	T(x)	p(x)	b(x)	q(x)	Q(x)	M(x)
m	N	N	m	N/m	N/m	N/m	N	Nm
75,00	127,49	1067,70	3,39	1195,19	680,14	515,05	10143,62	-181771,51
76,00	127,49	1067,70	3,41	1195,19	685,27	509,92	10653,54	-171117,97
77,00	127,49	1067,70	3,44	1195,19	690,39	504,79	11158,34	-159959,63
78,00	127,49	1067,70	3,46	1195,19	695,52	499,67	11658,00	-148301,63
79,00	127,49	1067,70	3,49	1195,19	700,64	494,54	12152,55	-136149,08
80,00	127,49	1067,70	3,51	1195,19	705,77	489,42	12641,97	-123507,11
81,00	127,49	0,00	3,54	127,49	710,89	-583,41	12058,56	-111448,55
82,00	127,49	0,00	3,56	127,49	716,02	-588,53	11470,03	-99978,52
83,00	127,49	0,00	3,59	127,49	721,14	-593,66	10876,37	-89102,15
84,00	127,49	0,00	3,62	127,49	726,27	-598,78	10277,59	-78824,57
85,00	127,49	0,00	3,64	127,49	731,39	-603,91	9673,68	-69150,89
86,00	127,49	0,00	3,67	127,49	736,52	-609,03	9064,65	-60086,24
87,00	127,49	0,00	3,69	127,49	741,65	-614,16	8450,49	-51635,75
88,00	127,49	0,00	3,72	127,49	746,77	-619,28	7831,20	-43804,55
89,00	127,49	0,00	3,74	127,49	751,90	-624,41	7206,79	-36597,76
90,00	127,49	0,00	3,77	127,49	757,02	-629,54	6577,26	-30020,50
91,00	127,49	0,00	3,79	127,49	762,15	-634,66	5942,60	-24077,91
92,00	127,49	0,00	3,82	127,49	767,27	-639,79	5302,81	-18775,10
93,00	127,49	0,00	3,84	127,49	772,40	-644,91	4657,90	-14117,20
94,00	127,49	0,00	3,87	127,49	777,52	-650,04	4007,86	-10109,34
95,00	127,49	0,00	3,90	127,49	782,65	-655,16	3352,70	-6756,65
96,00	127,49	0,00	3,92	127,49	787,77	-660,29	2692,41	-4064,24
97,00	127,49	0,00	3,95	127,49	792,90	-665,41	2026,99	-2037,24
98,00	127,49	0,00	3,97	127,49	798,03	-670,54	1356,45	-680,79
99,00	127,49	0,00	4,00	127,49	803,15	-675,66	680,79	0,00
100,00	127,49	0,00	4,02	127,49	808,28	-680,79	0,00	0,00

Fonte: Autor (2018)

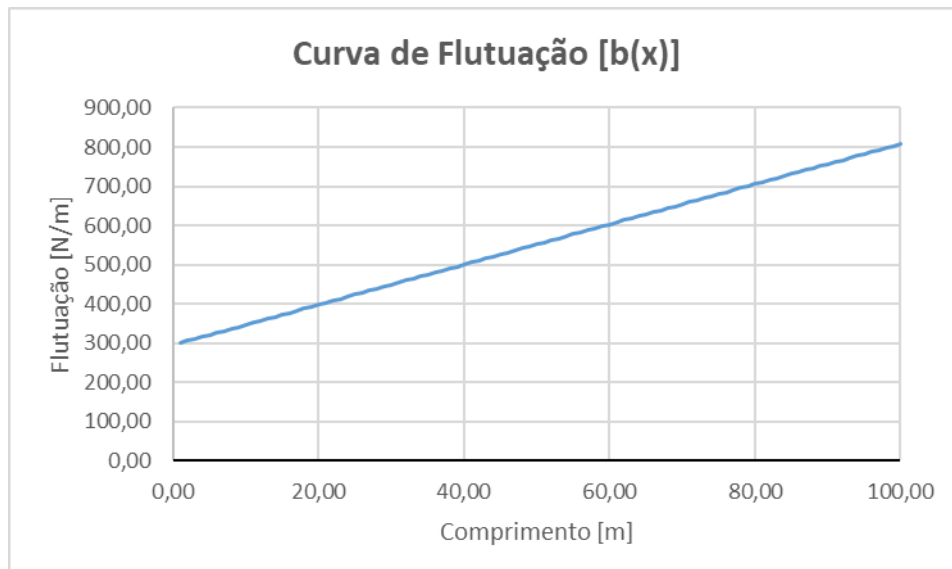
Gráficos das Curvas de Equilíbrio:

Figura F2 – Gráfico da Curva de Pesos do Apêndice F



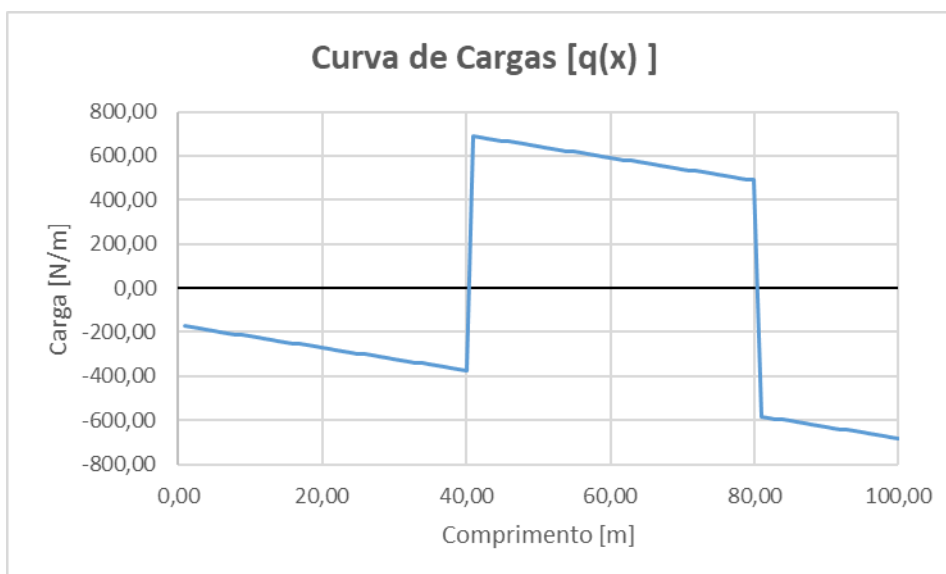
Fonte: Autor (2018)

Figura F3 – Gráfico da Curva de Flutuação do Apêndice F



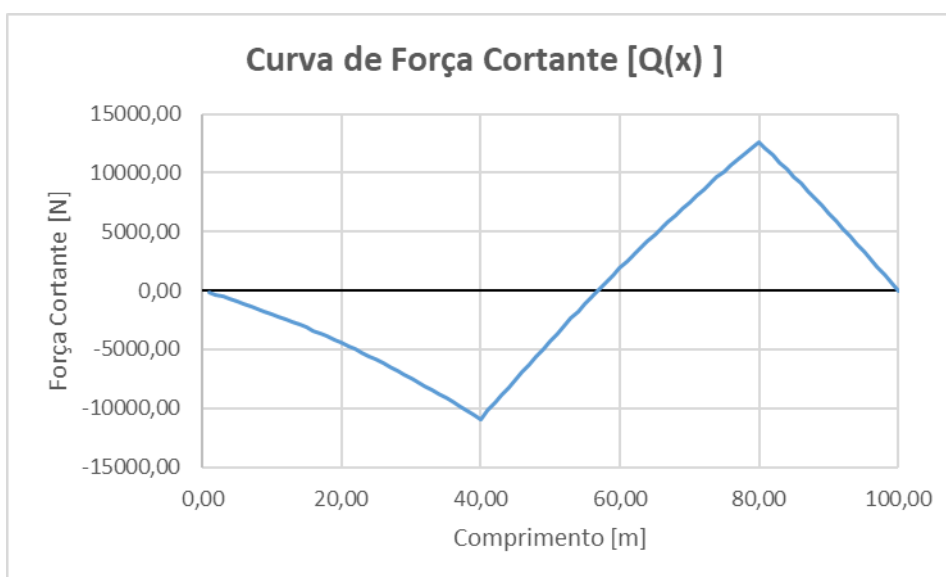
Fonte: Autor (2018)

Figura F4 – Gráfico de Curva de Cargas do Apêndice F



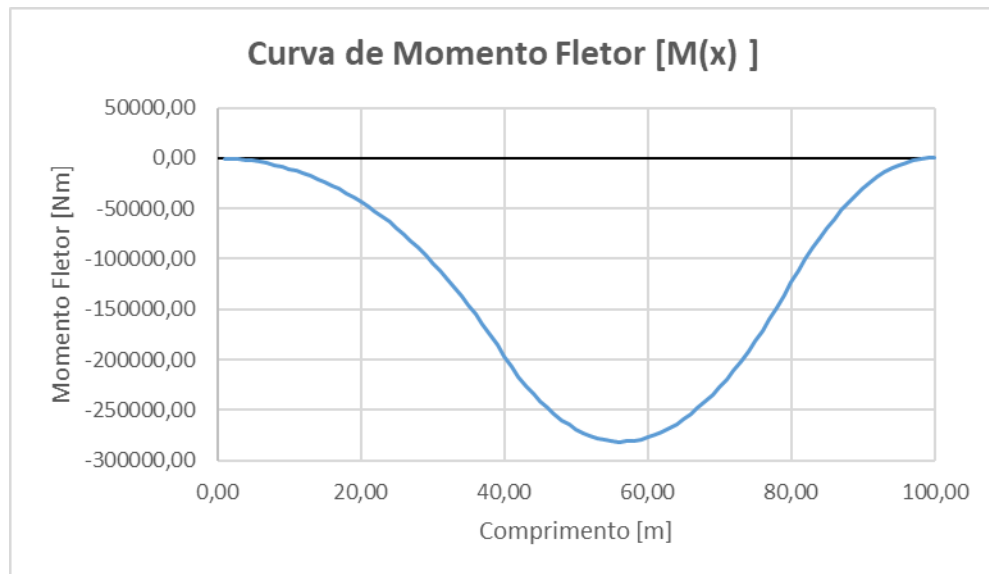
Fonte: Autor (2018)

Figura F5 – Gráfico da Curva de Força Cortante do Apêndice F



Fonte: Autor (2018)

Figura F6 – Gráfico da Curva de Momento Fletor do Apêndice F



Fonte: Autor (2018)

Valores para Calado médio e Ângulo Trim resultantes do equilíbrio:

Calado Médio = 2,7476m

Ângulo Trim = -0,02551rad