



**Universidade do Estado do Amazonas – UEA**  
**Escola Superior de Tecnologia – EST**  
**Curso de Engenharia Naval**

**Thayná Bulcão Péres**

**AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA MASSA ADICIONAL HIDRODINÂMICA DE  
UMA Balsa TANQUE PETROLEIRA AO LONGO DA ROTA DE  
NAVEGAÇÃO**

**Manaus – AM**

**2023**



**Universidade do Estado do Amazonas – UEA**  
**Escola Superior de Tecnologia – EST**  
**Curso de Engenharia Naval**

**Thayná Bulcão Péres**

**AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA MASSA ADICIONAL HIDRODINÂMICA DE  
UMA Balsa TANQUE PETROLEIRA AO LONGO DA ROTA DE  
NAVEGAÇÃO**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação  
em Engenharia Naval da Escola  
Superior de Tecnologia da  
Universidade do Estado do  
Amazonas, para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Naval.**

**Orientador: Ricardo Homero Ramírez Gutiérrez, D.Sc.**

**Manaus – AM**  
**2023**

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

P437aa Péres, Thayná Bulcão  
Avaliação da Variação da Massa Adicional Hidrodinâmica de uma Balsa Tanque Petroleira ao Longo da Rota de Navegação / Thayná Bulcão Péres. Manaus : [s.n], 2023.  
36 f.: il., color.; 29 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Naval - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.  
Inclui bibliografia  
Orientador: Ricardo Homero Ramírez Gutiérrez

1. Massa Adicional Hidrodinâmica. 2. Balsa Tanque. 3. Rhinoceros. 4. ANSYS-AQWA. 5. Navegação. I. Ricardo Homero Ramírez Gutiérrez (Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Avaliação da Variação da Massa Adicional Hidrodinâmica de uma Balsa Tanque Petroleira ao Longo da Rota de Navegação

**AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA MASSA ADICIONAL HIDRODINÂMICA DE  
UMA Balsa TANQUE PETROLEIRA AO LONGO DA ROTA DE  
NAVEGAÇÃO**

**Thayná Bulcão Péres**

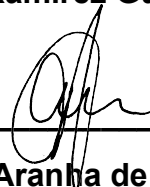
**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Naval da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval.**

**Examinada por:**




---

**Ricardo Homero Ramirez Gutierrez, D.Sc. – UEA**



---

**Marina Aranha de Sousa, M.Sc. – UEA**



---

**Ulisses A. Monteiro, D.Sc. - UFRJ**

**Manaus – AM**

**2023**

**“O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada.**

**Caminhando e semeando, no fim terás o que colher”**

**- Cora Coralina**

**“A felicidade pode ser encontrada mesmo nas horas mais difíceis,**

**se você lembrar de acender a luz”**

**- J. K. Rowling**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado o dom da vida, por toda força e sabedoria que me proporcionou ao longo da minha trajetória acadêmica, em momentos de grande tribulação foi minha fé que me manteve firme e forte na caminhada.

A minha mãe, Tatiana, que sempre foi minha maior apoiadora e meu maior exemplo, por todos os esforços e sacrifícios que fez por mim para que hoje eu pudesse estar finalizando essa jornada. Aos meus avós, João, Nazaré e Fátima, por serem meu coração que bate fora do peito, por todo o amor e carinho que proporcionam a mim, em especial a minha avó Fátima, que proporcionou os estudos adequados e a qualidade de vida necessária para que hoje eu pudesse estar aqui. Ao meu pai, Paulo César (in memoriam), por todos os anos que tive o privilégio de viver com o senhor e por ter me amado até o fim.

Aos meus tios, Mônica, Cláudia, Luiz e Michel, por todo suporte e apoio ao longo desses anos. Ao meu irmão, Paulo Victor, e aos meus primos, Karla, Alessandro, Camila, Sophia, João Arthur, João Almeida, Pedro e Maria Luiza por todo companheirismo e serem meus momentos de alegria e descontração.

Aos meus amigos, Lorena, João Paulo, João Victor, Nathalie e Matheus por estarem comigo todos esses anos, por torcerem por mim, vibrarem comigo por todas minhas vitórias, serem meus suportes nos momentos difíceis e serem meus momentos de felicidade e descontração. Em especial, a minha amiga Lorena, por ser minha fiel escudeira e por sempre me escutar e apoiar. As meninas do condômino, em especial, Ana Rita e Rachel, por me mostrarem que a beleza da vida é vivê-la.

Ao corpo docente da área de Engenharia Naval da EST-UEA, por todo o conhecimento que puderam me proporcionar ao longo dos meus anos de universidade. Em especial ao meu orientador, Ricardo Homero, por todo suporte, orientação e apoio que ofereceu ao longo da elaboração deste trabalho.

As minhas amigas e parceiras desde o início da graduação, Jafia e Maria Eduarda, por todo apoio emocional, cada matéria que fizemos juntas, cada estudo compartilhado, cada ajuda que me ofereceram, esses anos não seriam os mesmos sem vocês. Ao meu amigo e fiel dupla de curso, Daniel Bitencourtt, por todo apoio mútuo no decorrer da graduação, por cada nota que esperamos

juntos, por ser um dos pilares para que eu conseguisse ultrapassar a linha de chegada.

Ao meu projeto do coração, Urutau Aerodesign, onde puder ter contato com trabalho em equipe, aprimorar minhas ferramentas em engenharia e por me ensinar que liderança é a habilidade de motivar e inspirar pessoas de forma positiva. Em especial aos meus amigos de equipe, Aretha, Elissa, Caio Dias, Caio Liarte, Sarah, Natalia e Pedro.

Ao meu gestor na Waldemiro P. Lustoza (WPL), Luiz Paulo Machado, por todo apoio e ensinamento transmitido, por ser um exemplo de líder e engenheiro, por ser alguém que sempre buscou o melhor de mim na área profissional e por sempre me mostrar que algo pode ser feito, basta saber procurar. A minha equipe de manutenção, por sempre tirar minhas dúvidas e me proporcionar conhecimentos únicos.

A diretoria da WPL, Jéssica e Moysés Sabbá, pela chance a mim concedida de estagiar na empresa e iniciar minha vida profissional, principalmente por enxergarem em mim um potencial que pudesse vir a acrescentar na empresa. Ao Williams, Evaldo e Daniel por todos os almoços e conversas compartilhadas, em especial ao Williams por me mostrar os primórdios do tema deste trabalho. Ao Sr. Roque, por todo o aprendizado e experiência na área de navegação transmitido a mim.

Aos meus amigos de trabalho, Izandro e Raiany, por todo apoio, carinho e cuidado que tem por mim, por sempre me escutarem, por todos os almoços e lanches partilhados, principalmente por tornarem o ambiente de trabalho mais leve.

Por último, mas não menos importante, a EJNS Manaus, em especial a minha equipe Aparecida, por sempre me apoiarem e estarem ao meu lado, por me escutarem e serem meus alicerces na caminhada de fé.

Para finalizar, agradeço a todos que passaram pela minha vida e contribuíram de alguma forma para que eu estivesse aqui. Cada um de vocês são responsáveis por essa conquista!

## RESUMO

A navegação fluvial na região norte é de extrema importância, uma vez que grande parte das cidades são banhadas pelos rios, estes que por vezes sofrem secas severas e cheias avassaladoras, por conta disso faz-se necessário a avaliação das embarcações que navegam nessa região, visando o melhor desempenho delas. O presente trabalho aborda a avaliação da massa adicional hidrodinâmica de uma balsa tanque petroleira ao longo da sua rota de navegação, onde será realizada a modelagem de uma embarcação tridimensional no software Rhinoceros e logo após analisadas no software ANSYS-AQWA. Ao fim, realizando a avaliação dos resultados obtidos pelas análises no software, onde foi encontrado 72 valores de massas adicionais e chegando a algumas conclusões como o fato de quanto mais distante o fundo da embarcação se encontra do fundo do rio, menor é sua massa adicional.

Palavras-chave: Massa Adicional Hidrodinâmica, Balsa Tanque, Rhinoceros, ANSYS-AQWA, Navegação.



## **ABSTRACT**

River navigation in the northern region is extremely important, since most cities are bathed by rivers, which sometimes suffer severe droughts and overwhelming floods, because of this it is necessary to evaluate the vessels that navigate in this region, aiming at their best performance. The present work deals with the evaluation of the additional hydrodynamic mass of an oil tanker ferry along its navigation route, where the modeling of a three-dimensional vessel will be carried out in the Rhinoceros software and soon after analyzed in the ANSYS-AQWA software. At the end, performing the evaluation of the results obtained by the analyzes in the software, where 72 additional mass values were found and reaching some conclusions such as the fact that the further the bottom of the vessel is from the bottom of the river, the smaller its additional mass.

Key-words: Additional Hydrodynamic Mass, Raft Tank, Rhinoceros, ANSYS AQWA, Navigation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Movimento do navio no fluido .....	15
Figura 2.2 – Cilindro com movimentação vertical .....	16
Figura 3.1 - Vista da operação da balsa tanque WPL 2020 .....	18
Figura 3.2 – Escala do Rio Madeira do Mês de Outubro (2007 a 2021) .....	19
Figura 3.3 – Larguras do Rio Madeira pelo Autotrac .....	20
Figura 3.4 – Modelagem da embarcação no software Rhinoceros .....	21
Figura 3.5 – Casco com o calado de 0,793m .....	22
Figura 3.6 – Modelagem do casco no software Rhinoceros .....	22
Figura 3.7 - Iniciando o AQWA .....	23
Figura 3.8 – Geometria do casco .....	23
Figura 3.9 – Inserção das características do fluido .....	24
Figura 3.10 – Inserção das características da massa .....	24
Figura 3.11 – Malha .....	25
Figura 4.1 – Gráfico da Massa Adicional x Frequência do caso 7 .....	26

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características principais WPL 2020 .....	18
Tabela 3.2 - Calados de operação .....	19
Tabela 3.3 – Profundidade do Rio Madeira 2011 a 2021 .....	20
Tabela 3.4 – Larguras do Rio Madeira .....	20
Tabela 3.5 - Configuração das cavernas .....	21
Tabela 4.1 – Coeficientes de Massa Adicional para Balsa 100% Carregada ..	26
Tabela 4.2 – Coeficientes de Massa Adicional para Balsa 50% Carregada ....	27
Tabela 4.3 – Coeficientes de Massa Adicional para Balsa Sem Carga .....	27

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Navegação Fluvial no Rio Madeira.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>13</b>
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Massa Adicional .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.1 Coeficientes da Massa Adicional .....</b>	<b>15</b>
<b>3 ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 Apresentação da Embarcação .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 Dados do Rio Madeira.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3 Definição dos Casos .....</b>	<b>21</b>
<b>3.4 Modelo Rhinoceros .....</b>	<b>21</b>
<b>3.5 Massa Adicional (ANSYS-AQWA) .....</b>	<b>22</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>26</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>29</b>
<b>6 PERSPECTIVAS .....</b>	<b>30</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>32</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

A navegação em vias fluviais tem como aspecto diferencial a baixa profundidade, principalmente em períodos de seca dos rios, e por consequência desse fato é gerado uma restrição de calado em que as embarcações podem operar. Essa proximidade com o fundo, ocasiona um aumento da velocidade de escoamento na área que envolve o casco, produzindo uma região de baixa pressão, tendo como consequência o aumento do calado da embarcação.

A massa adicional é o efeito de uma massa "aparente", ou seja, de uma massa maior do que ela realmente é, isso acontece porque quando um corpo está submerso e possui aceleração, essa aceleração faz com que o fluido no entorno cause uma influência na massa do corpo também, gerando esse efeito de uma massa maior, o efeito da massa adicional.

A vibração na área naval é uma das principais causas de problemas em embarcações, uma vez que possui várias fontes que podem gerar vibrações e que podem afetar toda a sua estrutura, podendo ocasionar a parada do navio e consequentemente trazer perdas a níveis econômicos.

O ramo de pesquisa da massa adicional está crescendo cada vez mais na área da engenharia naval uma vez que a vibração de uma estrutura está também ligada ao aumento da massa adicional, principalmente quando a navegação ocorre em áreas com pouca profundidade. Por conta desse aumento da massa adicional ocorre uma redução nos valores das frequências naturais de vibração da embarcação, isso faz com que essas frequências naturais venham a coincidir com as frequências de excitação, podendo a levar a embarcação a uma condição de ressonância, sendo capaz de trazer danos ao navio.

Por conta disso, avaliar a alteração da massa adicional de uma embarcação torna-se importante, uma vez que obtendo os valores dessa massa e suas respectivas frequências, é possível procurar meios das frequências naturais e de excitação não coincidam.

### **1.1 Navegação Fluvial no Rio Madeira**

Os rios na região amazônica são muito utilizados como vias de transporte, uma vez que a maioria das cidades são rodeadas por eles, o que torna essas vias de grande importância para a região, como o rio Madeira que em seu curso

de mais de 3000 quilômetros percorre os estados do Amazonas e Rondônia e é um importante canal de transporte tanto de pessoas quanto de cargas para a região, uma vez que por meio dele é possível ligar as capitais dos dois estados.

A navegação fluvial por vezes torna-se complexa, principalmente quando precisa acontecer com baixas profundidades, tendo como exemplo o rio Madeira, onde sua profundidade varia muito no decorrer do ano, chegando a níveis menores que 3 metros em época de seca e a níveis maiores que 14 metros na época da cheia, por isso torna-se importante a análise de embarcações nesse rio, uma vez que a embarcação que navega na época da cheia e a mesma que fará a mesma rota de navegação na seca, por vezes deslocando o mesmo peso.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar a variação da massa adicional hidrodinâmica de uma balsa tanque petroleira ao longo da rota de navegação pelo Rio Madeira. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- I. Obter os coeficientes de massa adicional de uma balsa tanque petroleira que opera no Rio Madeira utilizando o *software* comercial *ANSYS-AQWA*;
- II. Avaliar como as características do rio influenciam diretamente no aumento ou diminuição da massa adicional.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Massa Adicional

Tem-se que as embarcações são projetadas para operarem em um meio que é contínuo e líquido, por conta disso, esse meio define os efeitos iniciais que irão rodear a embarcação. O casco estando submerso na água, está sujeito a essas forças inerciais, forças essas que são proporcionais à aceleração da superfície da embarcação e conseqüentemente envolvem uma massa acelerada junto a massa do navio, ou seja, põe a embarcação estar submersa e possuir aceleração, essa aceleração faz com que o fluido que envolve o casco se torne uma “massa” que é somada a massa da embarcação. Esse efeito é descrito como massa adicional hidrodinâmica.

As reações causadas pela massa adicional podem modificar o comportamento da estrutura da embarcação, visto que por vezes o valor dessa massa chega a ser até cem por cento da massa da própria embarcação parcialmente submersa, por isso é uma peça importante na hora de realizar análises estruturais, principalmente quando trata-se de embarcações que navegam em vias com pouca profundidade.

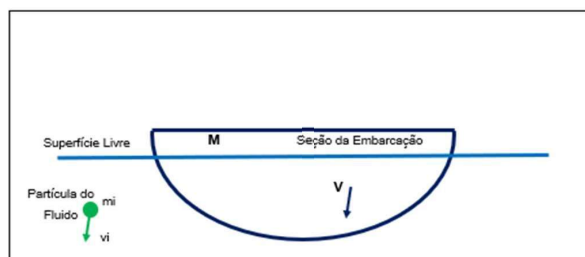
Dubua, em 1776, foi o precursor na identificação do efeito da massa adicional, em virtude dos resultados obtidos dos cálculos das forças hidrodinâmicas atuantes em um objeto em movimento num fluido considerado incompressível e não viscoso foram distintos dos resultados experimentais. Porém, as primeiras expressões matemáticas obtidas para a massa adicional de uma esfera foram desenvolvidas por Green em 1833 e Stokes em 1843. Após isso, vários pesquisadores desenvolveram diferentes expressões e coeficientes para o cálculo da massa adicional de um corpo arbitrário.

Grande parte dos cálculos são elaborados para cilindros de seções retangulares, circulares e elípticas, devido à simplicidade de suas formas e considerando o corpo flutuando em um fluido infinito, sem interferências de superfícies próximas. Sabendo o fluido que envolve esses cilindros é possível fazer o cálculo da massa.

### 2.1.1 Coeficientes da Massa Adicional

Considerando a seção transversal de uma embarcação, tem-se que durante o avanço da mesma na água, o fluido acaba movendo-se para permitir que o navio se desloque, ao fim desse deslocamento é possível ver que o fluido retorna para a posição na qual a embarcação passou, logo observa-se que esse fluido realiza um movimento oscilatório, que acaba produzindo uma reação em cadeia para todo o fluido. Pela Figura 2.1, tem-se que a energia cinética é dada por:

Figura 2.1 - Movimento do navio no fluido



Fonte: Elaboração Própria

$$EC = \frac{1}{2} Mv^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} m_i v_i^2 \quad (2.1)$$

Onde:

EC – Energia Cinética

M - Massa da Embarcação

v - Velocidade vertical da embarcação (movimento de heave)

$m_i$  - Massa da Partícula

$v_i$  – Velocidade Vertical da partícula

Seguindo a equação (2.1), a primeira parcela refere-se à seção do navio, enquanto a segunda se refere ao movimento das partículas fluidas. Simplificando a equação acima e levando em consideração que a energia cinética das partículas que se movimentam no fluido é metade do produto da massa total ( $M'$ ) e a velocidade vertical v. Tem-se que:

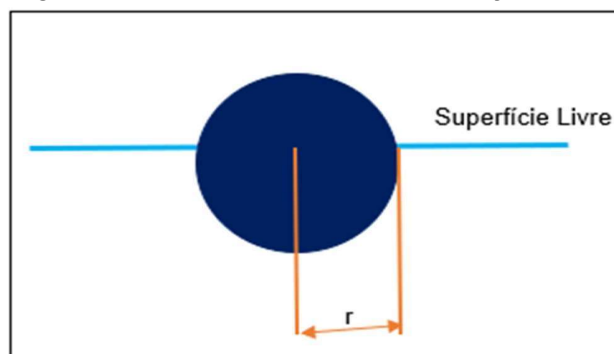
$$EC = \frac{1}{2} Mv^2 + \frac{1}{2} M'v^2 = \frac{1}{2} (M + M')v^2 \quad (2.2)$$

Chamando o termo  $M'$  de massa adicional, tem-se que a mesma varia de acordo com as características da seção, ou seja, de acordo com características



da embarcação e das propriedades do fluido. Para realização desse cálculo, inicialmente considera-se uma seção simples de um cilindro de raio “r”, parcialmente submerso em um fluido de densidade  $\rho$ , flutuando com seu centroide coincidindo com a altura da linha d’água, conforme a Figura 2.2. Sendo assumido que o cilindro oscila verticalmente e que possui um movimento de pequena amplitude.

Figura 2.2 – Cilindro com movimentação vertical



Fonte: Elaboração Própria

A massa adicional para um cilindro totalmente submerso é dada como:

$$M' = \rho\pi.r^2 \quad (2.3)$$

Onde:

$\rho$  - Massa Específica do fluido; r - Raio do cilindro.

Com isso, o valor da massa adicional do cilindro com metade do volume submerso vai ser igual à metade da situação em que está totalmente submerso. E levando-se em consideração o comprimento do cilindro, tem-se:

$$M' = \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{L/2} \rho\pi.r^2 \quad (2.4)$$

Onde:

L - Comprimento do cilindro;

A equação (2.4) faz com que seja considerado que a massa do fluido em números seja igual à massa do cilindro. Com isso, é revelado a grande importância do cálculo da massa adicional, que para este caso chega a representar um acréscimo de 100% da sua massa total.

Para os casos de cálculo da massa adicional para embarcações não se deve utilizar de forma direta as aproximações obtidas através do cilindro, haja

vista que as seções de um navio não possuem formas circulares perfeitas como a de um cilindro. Dito isso, pesquisadores, então, propuseram o uso do método de Transformação Conforme, onde é possível determinar os resultados para seções típicas do navio a partir dos resultados de uma seção circular.

Esse método considera o escoamento em torno do cilindro e o transforma para um escoamento em torno de uma seção com outra forma, no caso a de uma embarcação, fazendo com que a energia cinética do movimento seja encontrada, e com isso, fazendo possível a determinação da massa adicional da seção considerada, a expressão que representa ocasionada pelo movimento vertical da seção, por unidade comprimento, é dada por:

$$M' = \lambda_{33} = \rho \frac{\pi B^2}{8} k_{33} \quad (2.5)$$

Onde:

P - massa específica do fluido

B - boca do navio

K<sub>33</sub> - coeficiente de correção de massa adicional vertical, baseado na transformação conforme.

Após realizar os cálculos dos coeficientes de correção da massa adicional para cada seção, leva-se em consideração que o escoamento real em torno do casco é tridimensional e não bidimensional, conforme calculado. Townsin, em 1968, propôs uma correção através de uma formulação que utiliza o parâmetro J, como mostrado a seguir:

$$J_n = 1,02 - 3\left(1,2 - \frac{1}{n}\right) \frac{B}{L} \quad (2.6)$$

Onde:

n - Número de nós de cada modo de vibração considerado

B - Boca da embarcação

L - Comprimento entre as perpendiculares

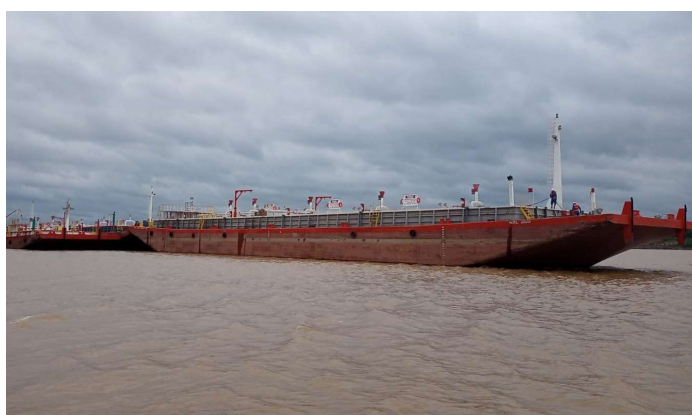
Tem-se então que quanto maior o número de nós associados ao modo de vibração menor será o valor de J<sub>n</sub>.

### 3 ESTUDO DE CASO

#### 3.1 Apresentação da Embarcação

O presente trabalho tem como foco a avaliação da variação da massa adicional hidrodinâmica de uma balsa tanque petroleira ao longo da rota de operação no Rio Madeira e cuja navegação é realizada, em algumas épocas do ano, em águas rasas. Visando esse sentindo foi escolhido a balsa tanque WPL 2020, que é uma balsa que opera nesse rio transportando derivados de petróleo. A Figura 3.1 apresenta a embarcação em estudo durante sua operação.

Figura 3.1 - Vista da operação da balsa tanque WPL 2020



Fonte: Elaboração Própria

As principais características da WPL 2020 são listadas na Tabela 3.1

Tabela 3.1 - Características principais WPL 2020

WPL 2020	
Descrição	Dimensões Principais
Comprimento total (LOA)	75,00 m
Comprimento entre perpendiculares (LPP)	72,72 m
Boca Moldada (B)	17,00 m
Pontal Moldado (D)	4,60 m
Calado Moldado de Projeto (T)	3,91 m
Calado Máximo Carregado (T <sub>máx</sub> )	4,158 m

Fonte: Elaboração Própria

Esta embarcação transporta derivados de petróleo, vindo a transportar diferentes tipos de produtos em seus tanques, sendo assim, dependendo da carga poderá variar seu deslocamento, calado e capacidade. A tabela 3.2 apresenta calados na qual a WPL 2020 trabalha conforme sua operação.



logo após separou-se nos 4 trimestres do ano, onde ao final chegou-se a 4 níveis do Rio Madeira, os quais foram usados para as análises. A Tabela 3.3 traz os valores dos níveis em cada mês e ao final trás os 4 níveis usados no estudo.

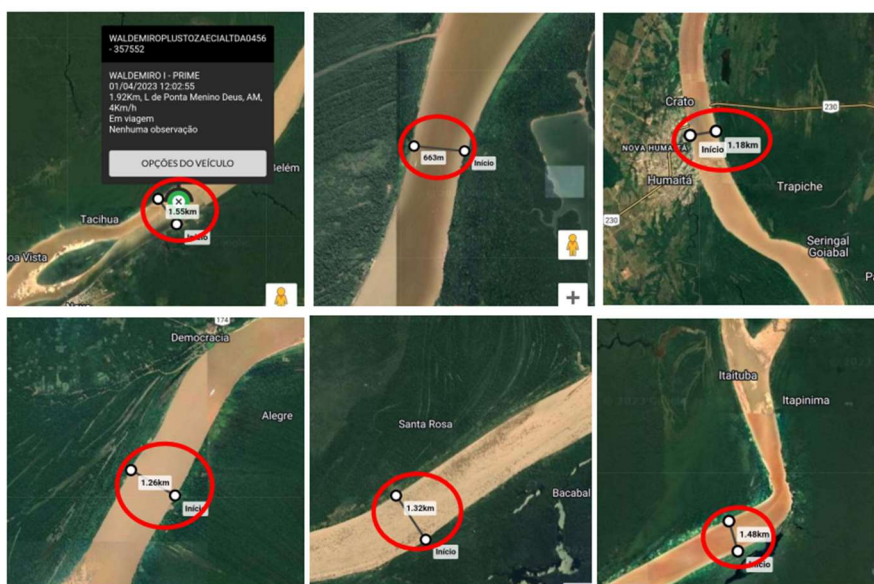
Tabela 3.3 – Profundidade do Rio Madeira 2011 a 2021

Profundidade do Rio Madeira 2011 a 2021				
	Janeiro	Fevereiro	Março	Média
1° Trimestre	12,33	14,42	15,84	<b>14,20</b>
	<b>Abril</b>	<b>Mai</b>	<b>Junho</b>	
2° Trimestre	15,08	13,29	10,61	<b>12,99</b>
	<b>Julho</b>	<b>Agosto</b>	<b>Setembro</b>	
3° Trimestre	7,54	4,74	3,39	<b>5,22</b>
	<b>Outubro</b>	<b>Novembro</b>	<b>Dezembro</b>	
4° Trimestre	3,61	5,38	8,61	<b>5,87</b>

Fonte: Elaboração Própria

No caso da largura dos trechos do rio, a medição foi realizada através do dispositivo de comunicação via satélite, Autotrac, onde selecionou-se 6 larguras diferentes, como evidenciadas na Figura 3.3 e explicitadas na Tabela 3.4.

Figura 3.3 – Larguras do Rio Madeira pelo Autotrac



Fonte: Elaboração Própria

Tabela 3.4 – Larguras do Rio Madeira

	Distância
Larguras do trechos do Rio Madeira Rota Manaus-PVH	663 m
	1180 m
	1260 m
	1320 m
	1480 m
	1550 m

Fonte: Elaboração Própria

### 3.3 Definição dos Casos

De posse dos dados da embarcação WPL 2020 e do rio Madeira, foi possível realizar combinações entre as larguras, calados, profundidades e deslocamento, ao fim totalizando 72 casos a serem analisados, com diferentes distribuições de valores, podendo ser visto no Anexo IV.

### 3.4 Modelo Rhinoceros

Com o objetivo de realizar o estudo em questão, primeiramente foi necessário gerar a modelagem da embarcação e para tal fim foi escolhido o *software Rhinoceros 7 Corporate*.

A partir do Plano de Arranjo Geral, que pode ser visto no Anexo I, da Seção Estrutural de Proa e Popa, visualizado no Anexo II, e da Seção Mestra, mostrada no Anexo III, pode-se verificar que ao longo do comprimento da embarcação há um total de 51 cavernas, do espelho de popa (caverna 0) até a proa (caverna 50), sendo as cavernas de 0 a 11 iguais as cavernas de 39 a 50. Na tabela 3.5 é possível observar como fica a configuração das cavernas.

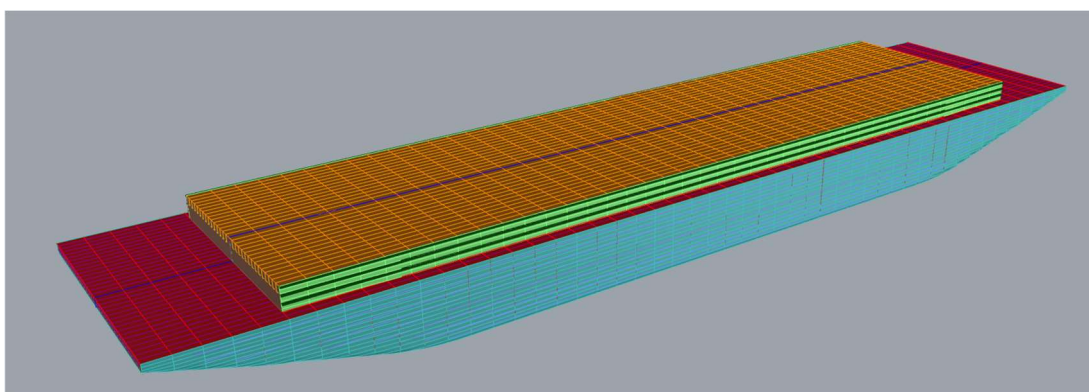
Tabela 3.5 - Configuração das cavernas

Cavernas	Início	Final
Popa	0	11
Corpo Paralelo	12	38
Proa	39	50

Fonte: Elaboração Própria

Em posse disso e dos planos da embarcação foi possível modelar o contorno das cavernas e conseqüentemente toda a estrutura da balsa, como pode ser verificado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Modelagem da embarcação no software Rhinoceros



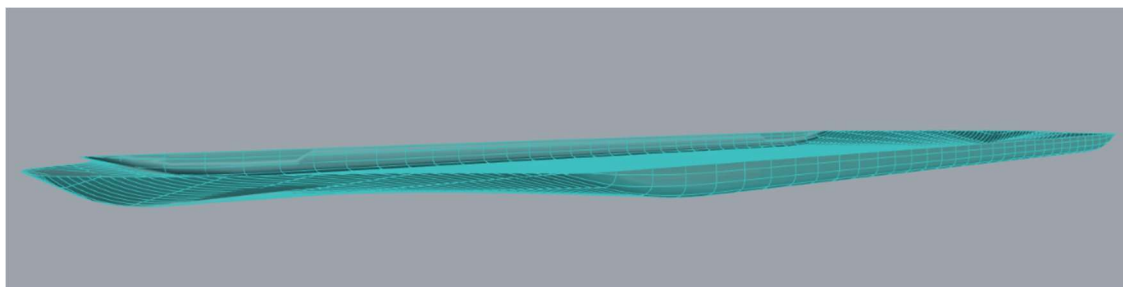
Fonte: Elaboração Própria

### 3.5 Massa Adicional (ANSYS-AQWA)

Para encontrar os valores de massa adicional hidrodinâmica em altas frequências foi utilizado o *software* AQWA, realizando as análises no módulo '*Hydrodynamic Diffraction*' (AQWA), que faz parte do pacote do *software* Ansys Workbench.

A fim de serem realizadas as avaliações da massa a partir dos calados da embarcação, ainda no Rhinoceros é feito o fatiamento do casco, partindo do tamanho do seu calado, ou seja, o casco é cortado para o calado de 4,158m, 2,156m e 0,793m. Na figura 3.5 é possível visualizar um exemplo do descrito acima, onde o casco já foi fatiado para o calado de 0,793m.

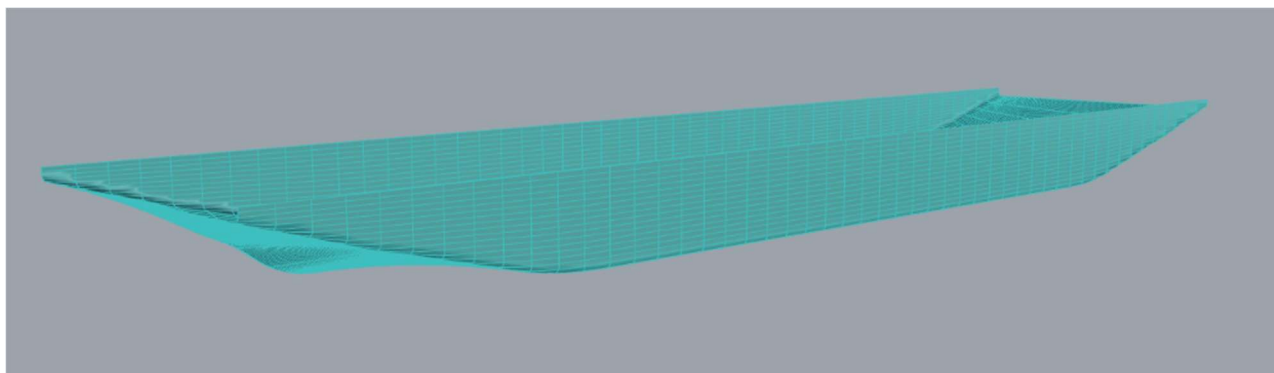
Figura 3.5 – Casco com o calado de 0,793m



Fonte: Elaboração Própria

Para efetuar as análises apenas o casco da embarcação foi exportado do *software* Rhinoceros 7 Corporate, no formato “.igs” para poder ser executado no *Ansyes Workbench*, como é possível visualizar na Figura 3.6.

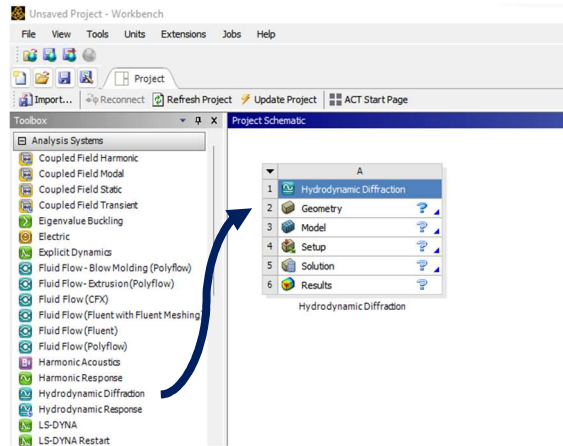
Figura 3.6 – Modelagem do casco no software Rhinoceros



Fonte: Elaboração Própria

No Ansys, abriu-se o modo Workbench, onde foi usado o complemento *Hydrodynamic Diffraction*, que corresponde ao AQWA, como pode ser visualizado na Figura 3.7.

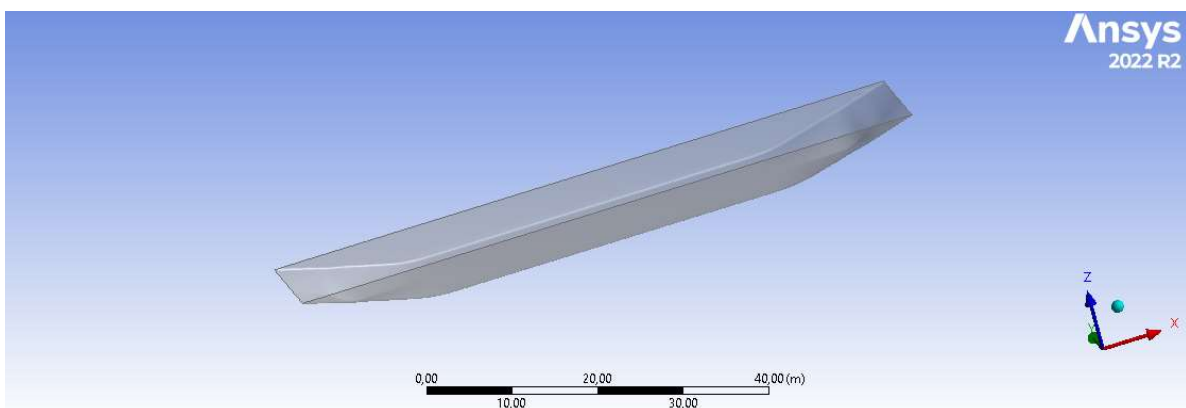
Figura 3.7 - Iniciando o AQWA



Fonte: Elaboração Própria

A geometria é importada no item “*Geometry*”, onde algumas configurações devem ser determinadas para que assim seja possível executar os cálculos de maneira correta, como a utilização do modo Surface Flip, para que a direção normal do modelo esteja direcionada para fora do casco e não para dentro. A Figura 3.8 traz o casco da embarcação já importado no *software*. E com as configurações realizadas, a geometria está pronta para ser utilizada pelo AQWA.

Figura 3.8 – Geometria do casco



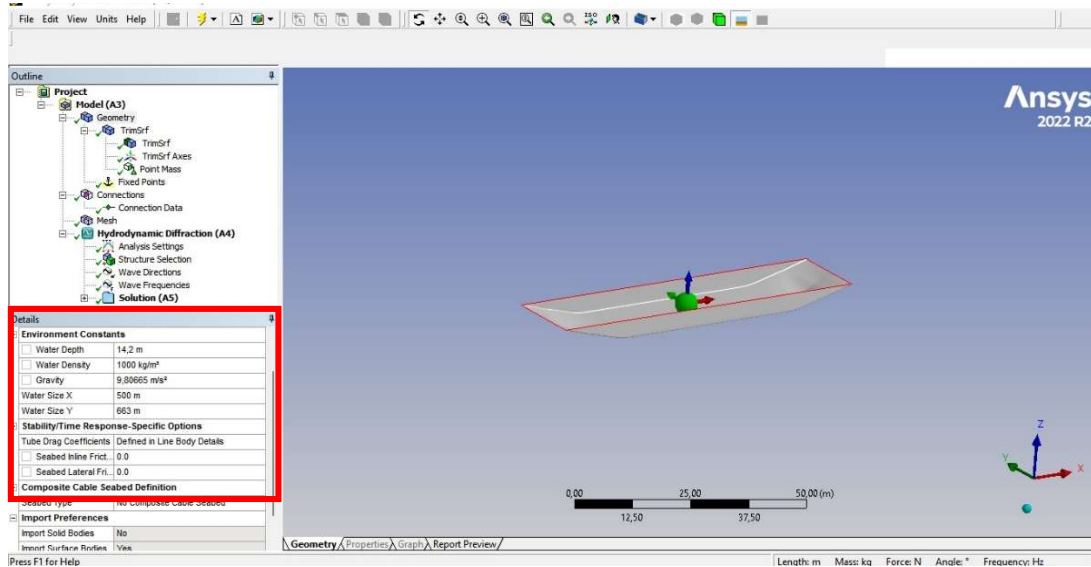
Fonte: Elaboração Própria

No AQWA, é necessário configurar as informações do fluido como a profundidade do rio, comprimento, largura e densidade, conforme a Figura 3.9. Após essas informações será necessário inserir as características da massa



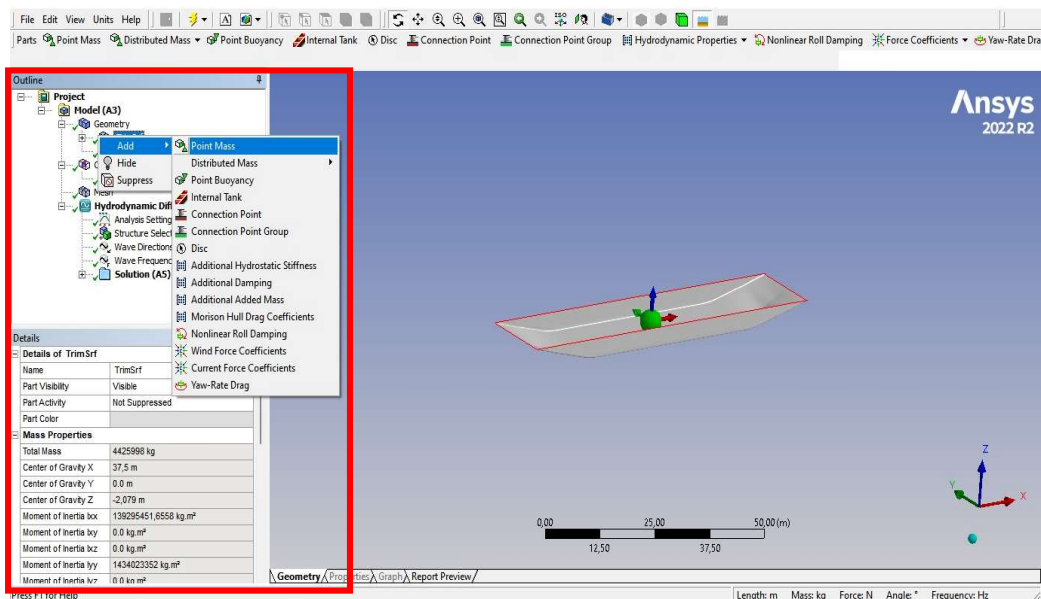
como a localização, os deslocamentos, momentos de inércia e a posição do centro de gravidade, como mostra a Figura 3.10.

Figura 3.9 – Inserção das características do fluido



Fonte: Elaboração Própria

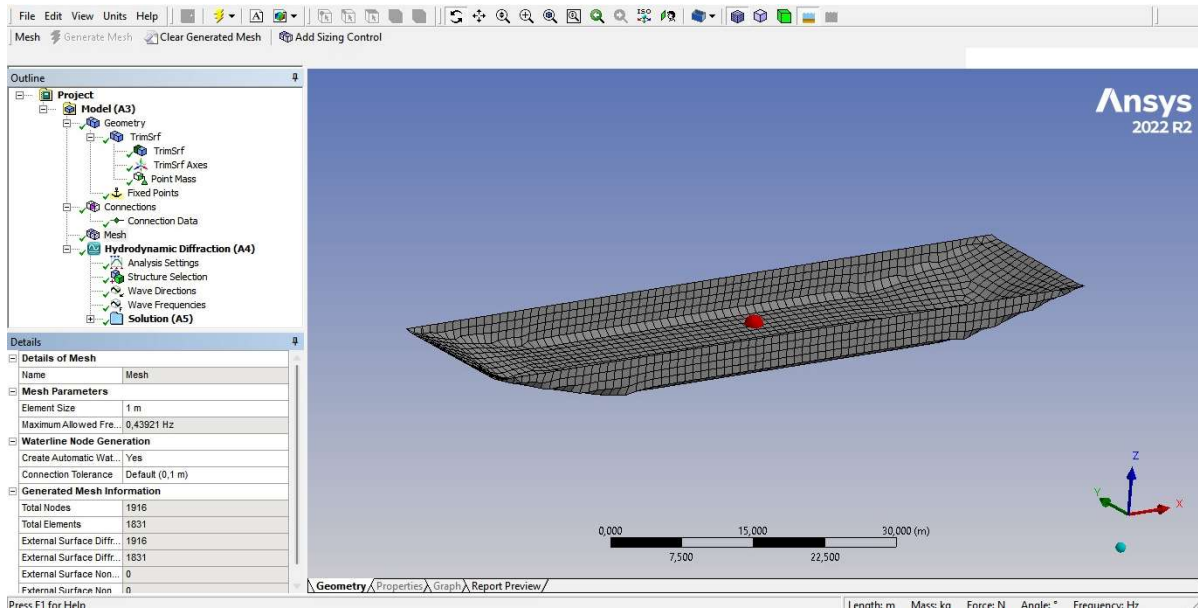
Figura 3.10 – Inserção das características da massa



Fonte: Elaboração Própria

Feito isso, fez-se a definição da malha, sendo os espaçamentos de 1 metro. A malha gerada, mostrada na Figura 3.11, possui 1831 elementos e a massa adicional será calculada para frequências de até 0,439 Hz.

Figura 3.11 – Malha



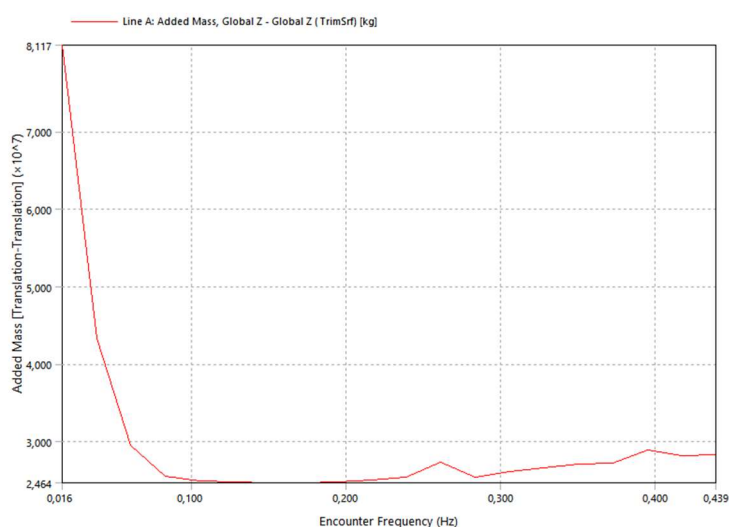
Fonte: Elaboração Própria

Ao fim de todas as etapas, faz-se a análise de cada caso, rodando cada modelo com suas diferentes características e obtendo ao final cada variação da massa adicional para diferentes frequências.

## 4 RESULTADOS

Ao realizar o cálculo da massa adicional hidrodinâmica por meio do AQWA, para 6 valores de largura, 4 valores de profundidade e 3 valores de calados, foi possível chegar em 72 valores de coeficientes de massa adicional. O software disponibiliza vários valores de massa adicional, para cada caso de estudo, seguindo a variação da frequência, como é possível visualizar no gráfico da Figura 4.1, mas para fins de estudo desde trabalho foi selecionado os coeficientes onde se encontrava a maior frequência.

Figura 4.1 – Gráfico da Massa Adicional x Frequência do caso 7



Fonte: ANSYS-AQWA

Sendo esses coeficientes mostrados na Tabela 4.1 para o calado da embarcação 100% carregada, na Tabela 4.2 para o calado da balsa 50% carregada, e na Tabela 4.3 para o calado da embarcação sem carregamento, onde o valor da massa adicional é dada em toneladas.

Tabela 4.1 – Coeficientes de Massa Adicional para Balsa 100% Carregada

Calado 100% Carregada				
Largura x Profundidade	5,22	5,87	12,99	14,2
663	28326,918	21574,584	10238,892	9914,036
1180	28326,924	21574,590	10238,886	9914,040
1260	28326,908	21574,586	10238,896	9914,039
1320	28326,934	21574,590	10238,892	9914,039
1480	28326,908	21574,584	10238,883	9914,043
1550	28326,904	21574,582	10238,887	9914,041

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 4.2 – Coeficientes de Massa Adicional para Balsa 50% Carregada

<b>Calado 50% Carregada</b>				
<b>Largura x Profundidade</b>	<b>5,22</b>	<b>5,87</b>	<b>12,99</b>	<b>14,2</b>
<b>663</b>	13548,643	12051,088	7951,007	7782,008
<b>1180</b>	13548,665	12051,089	7951,008	7782,007
<b>1260</b>	13548,658	12051,088	7951,005	7782,000
<b>1320</b>	13548,658	12051,080	7951,004	7782,011
<b>1480</b>	13548,643	12051,089	7951,002	7782,017
<b>1550</b>	13548,648	12051,086	7951,008	7782,008

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 4.3 – Coeficientes de Massa Adicional para Balsa Sem Carga

<b>Calado 0% Carregada</b>				
<b>Largura x Profundidade</b>	<b>5,22</b>	<b>5,87</b>	<b>12,99</b>	<b>14,2</b>
<b>663</b>	4779,140	4578,915	4012,349	4030,394
<b>1180</b>	4779,137	4578,915	4012,352	4030,397
<b>1260</b>	4779,140	4578,915	4012,352	4030,395
<b>1320</b>	4779,136	4578,913	4012,349	4030,395
<b>1480</b>	4779,136	4578,915	4012,349	4030,396
<b>1550</b>	4779,138	4578,914	4012,349	4030,397

Fonte: Elaboração Própria

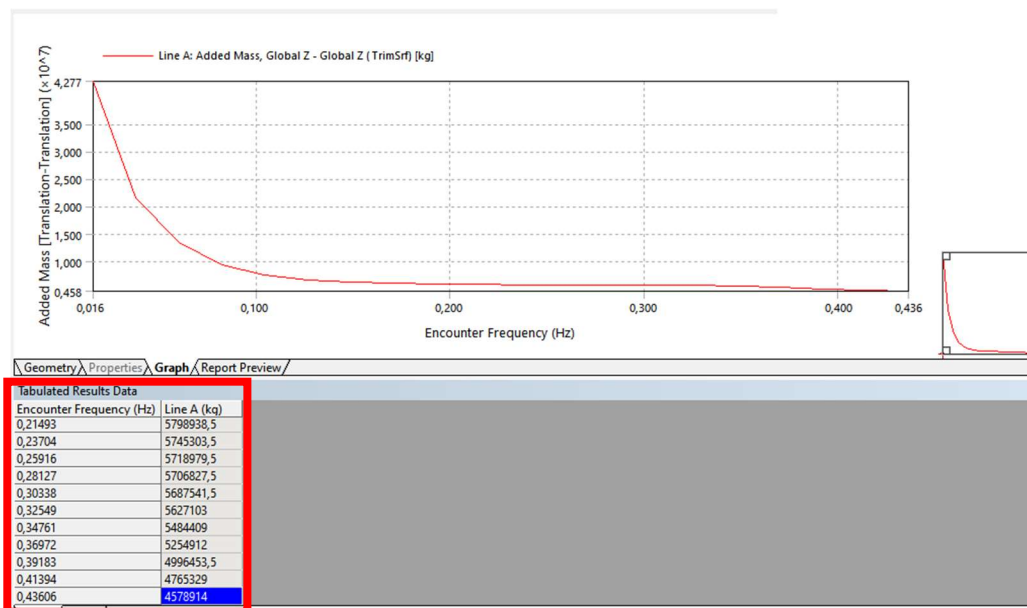
Analisando as tabelas e os coeficientes é possível encontrar algumas afirmações sobre a massa adicional:

- Quanto mais distante o fundo da embarcação se encontra do fundo do rio, menor é sua massa adicional;
- Comparando a Tabela 4.1 com a Tabela 4.3, é possível comprovar a afirmação acima. Pegando a profundidade de 5,22m, pode-se observar que para o calado da embarcação carregada (4,158m) a massa adicional chega a 28326,918 ton, na largura de 663m, enquanto para o calado da embarcação sem carregamento (0,793 m) a massa adicional chega a 4779,140 ton, ou seja, a massa adicional da Tabela 4.1 chega quase a ser 6 vezes maior do que o caso da Tabela 4.3;
- Na navegação com a embarcação sem carga, a massa adicional gerada não sofre muita variação, ou seja, independente da largura ou profundidade, a massa adicional não terá variações grandes. Já para os casos com a embarcação carregada, isso não se aplica, uma vez que

quando mais distante estiver o fundo da embarcação do fundo do rio, menor será sua massa adicional;

- Mesmo variando a largura da embarcação em quase 1km por trecho, a variação da massa adicional se torna mínima, como pode ser visto na Tabela 4.2, onde para uma profundidade de 5,87 m o valor da massa adicional na largura de 1180 m é de 12051,089 ton enquanto para uma largura de 1260 m é de 12051,088 ton;
- Os casos da Tabela 4.3 foram os que mais coincidiram os valores da maior frequência com a menor massa adicional, ou seja, pode-se concluir que quanto menor o calado e maior a frequência, menor será a massa adicional gerada. A figura 4.2 traz essa indicação a cima, sendo marcada de azul a menor massa adicional.

Figura 4.2 – Caso 72 - Alta frequência com menor massa adicional



Fonte: Elaboração Própria

Pode-se analisar também, a níveis da malha da modelagem, que quanto mais refinada é a malha, mais será demorado o tempo de processamento. No presente trabalho, optou-se por uma malha de 1 metro, onde uma análise em média variava de 4 a 6 minutos.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta as análises das variações da massa adicional hidrodinâmica ao longo da sua rota de navegação, e mostra a grande importância de se estudar a massa adicional, uma vez que foi possível perceber e comprovar que a proximidade do fundo da embarcação com o fundo do rio, causa uma interferência no escoamento ao redor do casco provocando com isso o aumento da massa adicional hidrodinâmica.

Na navegação com a embarcação sem carga, a massa adicional gerada não sofre muita variação, ou seja, independente da largura ou profundidade, a massa adicional não tem variações grandes. Já para os casos com a embarcação carregada, isso não se aplica, uma vez que quanto mais distante estiver o fundo da embarcação do fundo do rio, menor será sua massa adicional.

A análise no ANSYS-AQWA permite visualizar a variação da massa adicional e como nem sempre a maior frequência corresponde ao maior valor de massa adicional, há casos em que a maior frequência corresponde ao menor valor de massa adicional.

O desenvolvimento de um modelo tridimensional permite realizar análises aprofundadas não apenas se tratando da massa adicional, como também pode permitir análises de vibrações, dentre inúmeras mais.

Pode-se concluir, portanto, que o estudo realizado com um modelo tridimensional objetivando a determinação dos coeficientes da massa adicional hidrodinâmica se apresenta de maneira satisfatória.

## 6 PERSPECTIVAS

- Expandir a avaliação para comboios de balsas tanques, com empurrador propulsado e duas ou mais balsas;
- Complementar as análises da massa adicional juntamente da análise de vibração da embarcação e como as duas se encontram e o que podem causar;
- Validar e comparar os resultados obtidos no software com os resultados obtidos de forma empírica através das formulações, para que com isso possa-se atestar a eficiência d software utilizado.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HARO, B. G. **Influência da Massa Adicional Hidrodinâmica na Análise Vibracional Global Vertical de um Navio Graneleiro**. Dissertação mestrado – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

KOROTKIN, Alexandr I. **Added Mass Of Ship Structures**. 2 ed. Springer, 2007.

BIRKOFF, G. **Hydrodynamics**. Princeton Univ. Press, Princeton, 1960.

LANDWEBER, L., MACAGNO, M.C., **Added Mass of Two-Dimensional Forms Oscillating in a Free Surface**, *Journal of Ship Research*, pp 20-30, June 1967

TOWNSIN, R.L., **Virtual Mass Reduction Factors J' Values for Ship Vibration Calculations Derived from Tests with Beams Including Ellipsoids and Ship Models**, RINA, 1968

CUNHA, E. S. **Influência da Massa Adicional para Frequência Natural em modelos em Elementos Finitos Tridimensionais**. Projeto de Graduação - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

BARREIROS, J. P. E. P. **Influência do cálculo da massa adicional hidrodinâmica nas frequências naturais verticais de vibração de um navio graneleiro que opera em águas rasas**. Projeto de Graduação - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

PINHEIRO, M. L. **Cálculo das Frequências Naturais da Superestrutura de um Navio Graneleiro**. Projeto de Graduação - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.



# ANEXOS

## ANEXO I – Arranjo Geral

**NOTAS GERAIS**

1. O PROJETO É PARA UM EDIFÍCIO DE 10 ANDARES, COM 100m de comprimento e 20m de largura.

2. O PROJETO É PARA UM EDIFÍCIO DE 10 ANDARES, COM 100m de comprimento e 20m de largura.

3. O PROJETO É PARA UM EDIFÍCIO DE 10 ANDARES, COM 100m de comprimento e 20m de largura.

4. O PROJETO É PARA UM EDIFÍCIO DE 10 ANDARES, COM 100m de comprimento e 20m de largura.

5. O PROJETO É PARA UM EDIFÍCIO DE 10 ANDARES, COM 100m de comprimento e 20m de largura.

6. O PROJETO É PARA UM EDIFÍCIO DE 10 ANDARES, COM 100m de comprimento e 20m de largura.

7. O PROJETO É PARA UM EDIFÍCIO DE 10 ANDARES, COM 100m de comprimento e 20m de largura.

8. O PROJETO É PARA UM EDIFÍCIO DE 10 ANDARES, COM 100m de comprimento e 20m de largura.

9. O PROJETO É PARA UM EDIFÍCIO DE 10 ANDARES, COM 100m de comprimento e 20m de largura.

10. O PROJETO É PARA UM EDIFÍCIO DE 10 ANDARES, COM 100m de comprimento e 20m de largura.

**TABELA DE CAPACIDADES**

ANDAR	TIPO DE USO	ÁREA ÚTIL (m²)	CAPACIDADE (PESSOAS)
1	COMERCIAL	1000	100
2	COMERCIAL	1000	100
3	COMERCIAL	1000	100
4	COMERCIAL	1000	100
5	COMERCIAL	1000	100
6	COMERCIAL	1000	100
7	COMERCIAL	1000	100
8	COMERCIAL	1000	100
9	COMERCIAL	1000	100
10	COMERCIAL	1000	100

**LEGENDA**

1. ALVENARIA DE CIMENTO

2. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO

3. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA

4. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO

5. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO

6. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

7. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

8. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

9. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

10. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

**ESPECIFICAÇÕES**

1. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

2. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

3. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

4. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

5. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

6. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

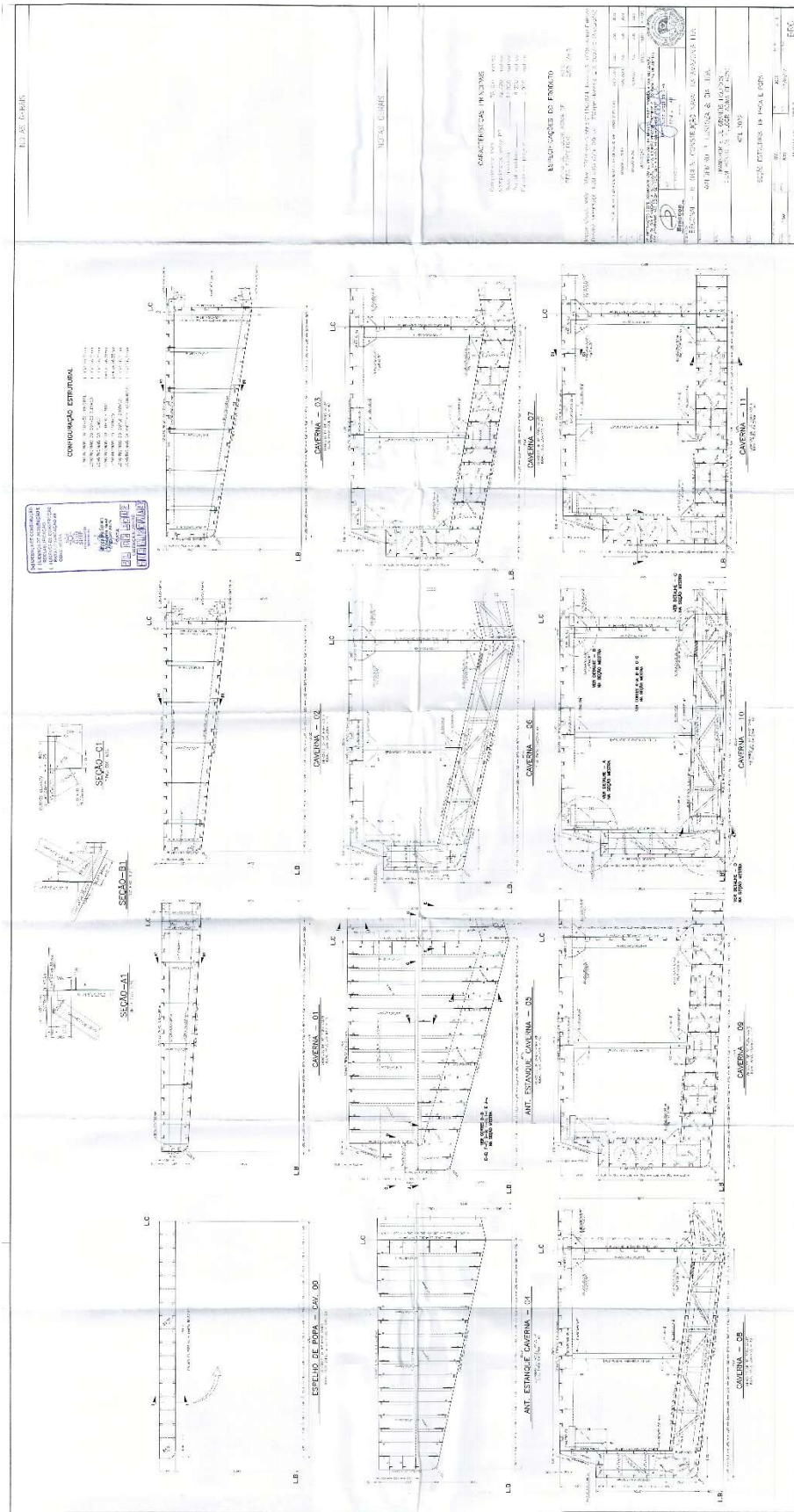
7. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

8. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

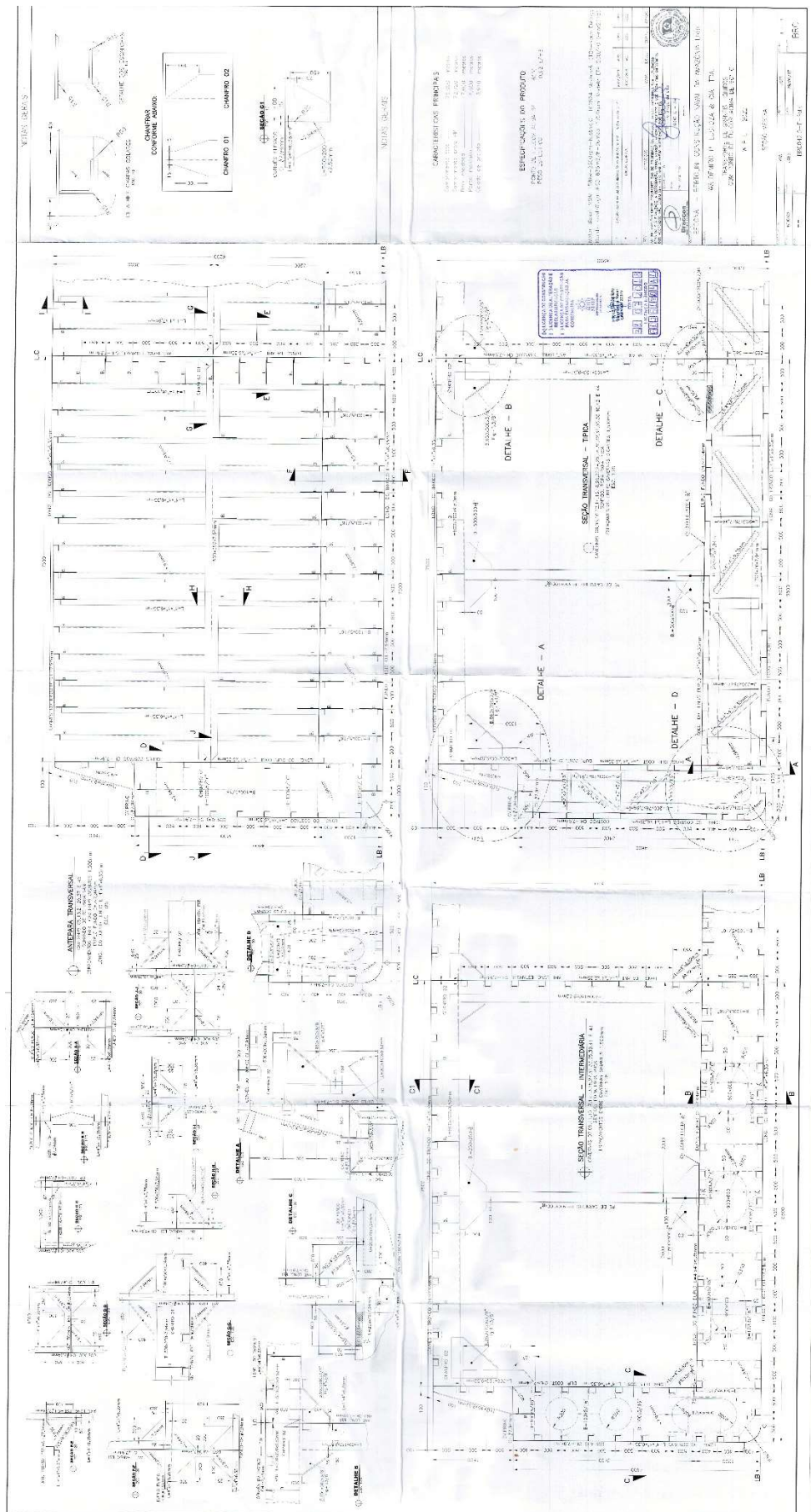
9. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

10. ALVENARIA DE CIMENTO COM REDE DE AÇO E ARMADURA E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO E REFORÇO

# ANEXO II – SEÇÃO ESTRUTURAL DE PROA E POPA



# ANEXO III – SEÇÃO MESTRA



## ANEXO IV – COMBINAÇÕES DOS CASOS DE ESTUDO

<b>Caso</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Largura (m)	663	663	663	663	1180	1180	1180	1180
Profundidade (m)	14,2	12,99	5,22	5,87	14,2	12,99	5,22	5,87
Calado (m)	4,158	4,158	4,158	4,158	4,158	4,158	4,158	4,158
Deslocamento (kg)	4425998	4425998	4425998	4425998	4425998	4425998	4425998	4425998
<b>Caso</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
Largura (m)	1260	1260	1260	1260	1320	1320	1320	1320
Profundidade (m)	14,2	12,99	5,22	5,87	14,2	12,99	5,22	5,87
Calado (m)	4,158	4,158	4,158	4,158	4,158	4,158	4,158	4,158
Deslocamento (kg)	4425998	4425998	4425998	4425998	4425998	4425998	4425998	4425998
<b>Caso</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
Largura (m)	1480	1480	1480	1480	1550	1550	1550	1550
Profundidade (m)	14,2	12,99	5,22	5,87	14,2	12,99	5,22	5,87
Calado (m)	4,158	4,158	4,158	4,158	4,158	4,158	4,158	4,158
Deslocamento (kg)	4425998	4425998	4425998	4425998	4425998	4425998	4425998	4425998
<b>Caso</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>32</b>
Largura (m)	663	663	663	663	1180	1180	1180	1180
Profundidade (m)	14,2	12,99	5,22	5,87	14,2	12,99	5,22	5,87
Calado (m)	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516
Deslocamento (kg)	2487847	2487847	2487847	2487847	2487847	2487847	2487847	2487847
<b>Caso</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>
Largura (m)	1260	1260	1260	1260	1320	1320	1320	1320
Profundidade (m)	14,2	12,99	5,22	5,87	14,2	12,99	5,22	5,87
Calado (m)	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516
Deslocamento (kg)	2487847	2487847	2487847	2487847	2487847	2487847	2487847	2487847
<b>Caso</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>
Largura (m)	1480	1480	1480	1480	1550	1550	1550	1550
Profundidade (m)	14,2	12,99	5,22	5,87	14,2	12,99	5,22	5,87
Calado (m)	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516
Deslocamento (kg)	2487847	2487847	2487847	2487847	2487847	2487847	2487847	2487847
<b>Caso</b>	<b>49</b>	<b>50</b>	<b>51</b>	<b>52</b>	<b>53</b>	<b>54</b>	<b>55</b>	<b>56</b>
Largura (m)	663	663	663	663	1180	1180	1180	1180
Profundidade (m)	14,2	12,99	5,22	5,87	14,2	12,99	5,22	5,87
Calado (m)	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793
Deslocamento (kg)	687847	687847	687847	687847	687847	687847	687847	687847
<b>Caso</b>	<b>57</b>	<b>58</b>	<b>59</b>	<b>60</b>	<b>61</b>	<b>62</b>	<b>63</b>	<b>64</b>
Largura (m)	1260	1260	1260	1260	1320	1320	1320	1320
Profundidade (m)	14,2	12,99	5,22	5,87	14,2	12,99	5,22	5,87
Calado (m)	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793
Deslocamento (kg)	687847	687847	687847	687847	687847	687847	687847	687847
<b>Caso</b>	<b>65</b>	<b>66</b>	<b>67</b>	<b>68</b>	<b>69</b>	<b>70</b>	<b>71</b>	<b>72</b>
Largura (m)	1480	1480	1480	1480	1550	1550	1550	1550
Profundidade (m)	14,2	12,99	5,22	5,87	14,2	12,99	5,22	5,87
Calado (m)	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793
Deslocamento (kg)	687847	687847	687847	687847	687847	687847	687847	687847