

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM MONTAGEM INDUSTRIAL**

**SERGIO MURILO DARUIS ROCHA FILHO**

**TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL PARA PREDIÇÃO DE  
MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO**

Niterói, RJ

2020

SERGIO MURILO DARUIS ROCHA FILHO

**TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL PARA PREDIÇÃO DE  
MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Montagem Industrial. Área de Concentração: Montagem Industrial.

Orientador:

Prof. Ph.D. Roger Matsumoto Moreira

Coorientador:

Prof. Dr. MÁRCIO ZAMBOTI FORTES

Niterói, RJ  
2020

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

F478t Filho, Sergio Murilo Daruis Rocha  
TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL PARA PREDIÇÃO DE  
MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO / Sergio Murilo Daruis Rocha  
Filho ; Roger Matsumoto Moreira, orientador ; Marcio Zamboti  
Fortes, coorientador. Niterói, 2020.  
71 f.

Dissertação (mestrado profissional)-Universidade Federal  
Fluminense, Niterói, 2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PMI.2020.mp.10275217701>

1. Fluidodinâmica computacional (CFD). 2. Movimento de  
navios. 3. Ondas da Bacia de Campos. 4. Produção  
intelectual. I. Moreira, Roger Matsumoto, orientador. II.  
Fortes, Marcio Zamboti, coorientador. III. Universidade  
Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

SERGIO MURILO DARUIS ROCHA FILHO

**TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL PARA PREDIÇÃO DE  
MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em  
Montagem Industrial da Universidade Federal  
Fluminense, como requisito parcial para obtenção do  
título de Mestre. Área de concentração: Montagem  
Industrial.

Aprovada em 20 de agosto de 2020.

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Ph.D. Roger Matsumoto Moreira - Orientador - Presidente  
Universidade Federal Fluminense (UFF)



---

Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes - Coorientador  
Universidade Federal Fluminense (UFF)



---

Prof. Dr. Antonio Lopes Gama  
Universidade Federal Fluminense (UFF)

---

Prof. Dr. Julio Tomás Aquije Chacaltana  
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Niterói, RJ

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por  
JULIO TOMAS AQUIJE CHACALTANA - SIAPE 1305073  
Departamento de Engenharia Ambiental - DEA/CT  
Em 09/09/2020 às 09:48

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:  
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/61414?tipoArquivo=O>

Dedico esta dissertação e a conclusão do curso do Mestrado Profissional em Montagem Industrial pela Universidade Federal Fluminenses à toda minha família, em especial aos meus avós maternos e paternos (*in memoriam*) Anair Peixoto Medeiros e Arbogasto Medeiros, Zayne Daruis Assad Rocha e Gézio Rocha de Souza, aos meus pais Marlete Peixoto Medeiros e Sergio Murilo Daruis Rocha, às minhas irmãs, Ana Rubya Medeiros, Amanda Medeiros Rocha, Yasmin Medeiros Rocha, aos meus sobrinhos Hugo, Bento, João e Théo, por fim, a minha tia Silaine Maria Daruis Rocha e tio Elias Daruis Assad Neto.

## AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo.

Agradeço a toda minha família pelo suporte, pela confiança, pelo esforço e preocupação diários em me proporcionar o crescimento pessoal, acadêmico e profissional.

À Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense – UFF por proporcionar a sociedade a oportunidade de acesso ao conhecimento.

Ao meu orientador Roger Matsumoto Moreira e ao coorientador Márcio Zamboti Fortes por toda sua paciência, seriedade, atenção e conselhos oferecidos na realização deste trabalho e em outras atividades acadêmicas.

Ao projeto realizado previamente entre a UFF e a Marinha do Brasil que proporcionou a aquisição da licença do *software* ANSYS Fluent©.

Aos colegas da DNV GL pela atenção e tempo dedicados em me atender e oferecer suas valiosas contribuições.

Aos colegas da Escola de Engenharia da UFF, em especial ao Rafael Eitor dos Santos e ao Guilherme Rojo Ferreira.

Aos funcionários da Escola de Engenharia da UFF, em especial aos funcionários da coordenação do curso de Mestrado Profissional em Montagem Industrial.

## RESUMO

Os estudos das forças oriundas das condições de mar em embarcações compõem uma das grandes áreas da indústria naval e *offshore*, sendo fundamentais para que estas estruturas sejam projetadas e construídas com capacidade de operar por décadas suportando grandes esforços. Esta dissertação consiste no estudo dos movimentos de afundamento (*heave*) e de arfagem (*pitch*) de um modelo reduzido do casco *Wigley III* através da aplicação de técnica de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics- CFD*). O Método dos Volumes Finitos (MVF) é empregado para a solução das equações da conservação da massa e de *momentum* (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*), sendo a turbulência representada pelo modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST (*Shear Stress Transport*). As simulações foram realizadas no *software* de fluidodinâmica computacional ANSYS Fluent© 19.0 para duas situações: a primeira considerando os experimentos realizados por Journée (1992); a segunda com os dados de entrada do histórico de períodos e comprimentos de onda da Bacia de Campos. Uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais foi encontrada para razões de comprimento de onda e da embarcação menores que um. Os resultados obtidos através deste estudo contribuem para trabalhos relacionados à otimização de cascos de embarcações e estudos de RAO (*Response Amplitude Operators*) de embarcações.

**Palavras chaves:** fluidodinâmica computacional (CFD); movimento de navios; ondas da Bacia de Campos

## ABSTRACT

The studies of forces induced by sea conditions on vessels comprise one of the major areas of the naval and offshore industry, being fundamental for these structures to be designed and built with the proper capacity to operate for decades supporting major physical efforts. This dissertation consists in the evaluation of the heave and pitch movements of a reduced model of the Wigley III hull through the application of Computational Fluid Dynamics-CFD. The Finite Volume Method (MVF) is used to solve the mass conservation and momentum equations (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations), with turbulence represented by the  $\kappa$ - $\omega$  SST (Shear Stress Transport) model. The simulations were performed using the computational fluid dynamics software ANSYS Fluent© 19.0 for two situations: the first considering the experiments carried out by Journée (1992); the second with the input data of the historical periods and wave wavelength of the Campos Basin. A good agreement between numerical and experimental results was found for the ration of wavelength and vessel length less than one. The results obtained through this study contribute to work related to vessel hull optimization and vessel RAO (Response Amplitude Operators) studies.

**Keywords:** CFD, Ship motions, Campos Basin Waves.

## **SUMÁRIO**

**FOLHA DE ROSTO, p. 1**

**FOLHA DE APROVAÇÃO, p.3**

**DEDICATÓRIA, p.4**

**AGRADECIMENTOS, p.5**

**RESUMO NA LÍNGUA VERNÁCULA, p.7**

**RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA, p.8**

**SUMÁRIO, p.10**

**LISTA DE ILUSTRAÇÕES, p.12**

**LISTA DE TABELAS, p.13**

## **1. INTRODUÇÃO, p.14**

1.1. MOTIVAÇÃO, p.14

1.2. OBJETIVO, p.16

1.3. APRESENTAÇÃO, p.16

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, p.17**

2.1. A DINÂMICA DAS EMBARCAÇÕES, p.17

2.2. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL, p.19

2.3. O NÚMERO DE FROUDE E O ESCOMANETO NÃO-CONFINADO, p.21

2.4. OS SEIS GRAUS DE LIBERDADE (*SIX DEGREES OF FREEDOM* - 6DOF) E OS OPERADORES DE AMPLITUDE DE RESPOSTA (*RESPONSE AMPLITUDE OPERATORS* - RAO), p.21

2.5. CONDIÇÕES DE MAR, p.23

## **3. MODELAGENS MATEMÁTICA E NUMÉRICA, p.25**

3.1. VISÃO GERAL DO PROBLEMA, p.25

3.2. EQUAÇÕES GOVERNANTES, p.26

3.3. MODELO DE TURBULÊNCIA, p.27

**3.3.1. Equações rans (*reynolds averaged navier-stokes*), p.27**

**3.3.2. Modelo de turbulência *shear-stress transport* (sst)  $\kappa$ - $\omega$ , p.28**

3.4. MODELO PARA INTERFACE AR-ÁGUA, p.30

**3.4.1. Interface ar-água, p.30**

**3.4.2. Método de volume dos fluidos, p.30**

3.5. MODELO NUMÉRICO, p.31

**3.5.1. Método dos volumes finitos, p.31**

3.6. MODELO COMPUTACIONAL, p.33

**3.6.1. *Software de cfd* (*computational fluid dynamics*), p.33**

**3.6.2. Geometria, p.34**

**3.6.3. Domínio do fluido e malha, p.36**

**3.6.4. Customizações implementadas, p.38**

3.7. CONDIÇÕES DE CONTORNO, p.38

3.8. VALIDAÇÃO DO MODELO E CÁLCULO DOS RAOS, p.40

## **4. RESULTADOS, p.42**

4.1. RESULTADOS SIMULAÇÕES, p.42

**4.1.1. Validação do modelo, p.42**

4.2. ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE MAR DA BACIA DE CAMPOS, p.51

**4.2.1. Simulações com dados da bacia de campos, p.53**

## **5. CONCLUSÕES, p.59**

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS, p.60

## **6. REFERÊNCIAS, p.61**

## **7. APÊNDICES, p.66**

7.1. PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES NO ANSYS FLUENT®, p.66

7.2. CONFIGURAÇÃO DA UDF, p.69

7.3. OUTRAS FIGURAS EXTRAÍDAS DO *SOFTWARE* ANSYS FLUENT®, p.70

**Figura 1** – Distribuição percentil de uma aproximação das publicações entre 2009 e 2012 com foco em estruturas de embarcações, p.15

**Figura 2** – Seis Graus de Liberdade, p.22

**Figura 3** – Esquemático do RAO, p.23

**Figura 4** – Estudo de Caso, p.25

**Figura 5** – Metodologia de simulação com *software* de CFD, p.33

**Figura 6** – Processo de Cálculo do *software* de CFD, p.34

**Figura 7** – Geometria do casco modelo *Wigley III*, p.35

**Figura 8** – Sistema de Coordenadas do casco, p.36

**Figura 9** – Domínio do Fluido, p.36

**Figura 10** – Malha em estudo, p.37

**Figura 11** – Volume de Controle, p.39

**Figura 12** – Evolução do afundamento para  $\lambda / L = 0,64$  (14 segundos), p.43

**Figura 13** – Evolução da arfagem para  $\lambda / L = 0,64$  (14 segundos), p.43

**Figura 14** – Evolução de afundamento para  $\lambda / L = 0,64$  e  $0,95$ , p.44

**Figura 15** – Evolução de arfagem para  $\lambda / L = 0,64$  e  $0,95$ , p.44

**Figura 16** – Evolução de afundamento  $\lambda / L = 1,27; 1,59; 1,91$ , p.45

**Figura 17** – Evolução de arfagem para  $\lambda / L = 1,27; 1,59; 1,91$ , p.45

**Figura 18** – Evolução de afundamento para  $\lambda / L = 2,22; 2,54$ , p.45

**Figura 19** – Evolução de arfagem para  $\lambda / L = 2,22; 2,54$ , p.46

**Figura 20** – Afundamento adimensional simulado versus Journée (1992) e Ferreira (2018), p.46

**Figura 21** – Arfagem adimensional simulada versus Journée (1992) e Ferreira (2018), p.47

**Figura 22** – Resultado afundamento  $\lambda / L = 0,588; 0,768; 0,806$ , p.53

**Figura 23** – Resultado afundamento  $\lambda / L = 0,463; 0,485; 0,489; 0,494$ , p.54

**Figura 24** – Afundamento (*Heave*) adimensional versus  $\lambda / L$ , p.55

**Figura 25** – Resultado arfagem  $\lambda / L = 0,588; 0,768; 0,806$ , p.56

**Figura 26** – Resultado arfagem  $\lambda / L = 0,463; 0,485; 0,489; 0,494$ , p.57

**Figura 27** – Arfagem (*Pitch*) adimensional versus  $\lambda / L$ , p.58

**Figura 28** – Definição do sistema multifásico, p.66

**Figura 29** – Inserção UDF, p.67

**Figura 30** – Fases da água e do ar, p.67

**Figura 31** – Fases da água e do ar, p.67

**Figura 32** – Amplitude e altura de onda, p.68

**Figura 33** – Malha dinâmica, p.68

**Figura 34** – Métodos para solução, p.69

**Figura 35** – Perfil de elevação da onda, exemplo de imagem extraída de uma das simulações da validação do modelo, p.70

**Figura 36** – Perfil de elevação da onda, exemplo de imagem extraída de uma das simulações da validação do modelo, p.70

**Figura 37** – Perfil de elevação da onda, exemplo de imagem extraída de uma das simulações da validação do modelo, p.71

**Figura 38** – Perfil do comportamento da linha água em relação ao casco, exemplo de imagem extraída de uma das simulações da validação do modelo, p.71

**Tabela 1** – Parâmetros de ondas e corretes da Bacia de Campos – Águas Intermediárias Norte, p.24

**Tabela 2** – Propriedades do modelo reduzido de casco *Wigley III*, p.35

**Tabela 3** – Propriedades da malha, p.37

**Tabela 4** – Condições de Contorno, p.39

**Tabela 5** - Características das ondas simuladas para validação do modelo, p.42

**Tabela 6** – Resultados numéricos adicionais aos dados do experimento de Journée (1992) e dados numéricos de Ferreira (2018) para afundamento, p.49

**Tabela 7** – Resultados numéricos adicionais aos dados do experimento de Journée (1992) e dados numéricos de Ferreira (2018) para arfagem, p.50

**Tabela 8** – Resultados  $aK$  críticos Bacia de Campos para cada direção, p.51

**Tabela 9** - Características das ondas simuladas da Bacia de Campos (em escala reduzida), p.52

**Tabela 10** – RAO das simulações de afundamento  $\lambda / L = 0,588; 0,768; 0,806$ , p.54

**Tabela 11** – RAO das simulações de afundamento  $\lambda / L = 0,463; 0,485; 0,489; 0,494$ , p.55

**Tabela 12** – RAO das simulações de arfagem  $\lambda / L = 0,588; 0,768; 0,806$ , p.56

**Tabela 13** – Cálculo do RAO para simulações de  $\lambda / L = 0,463; 0,485; 0,489; 0,494$ , p.57

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. MOTIVAÇÃO

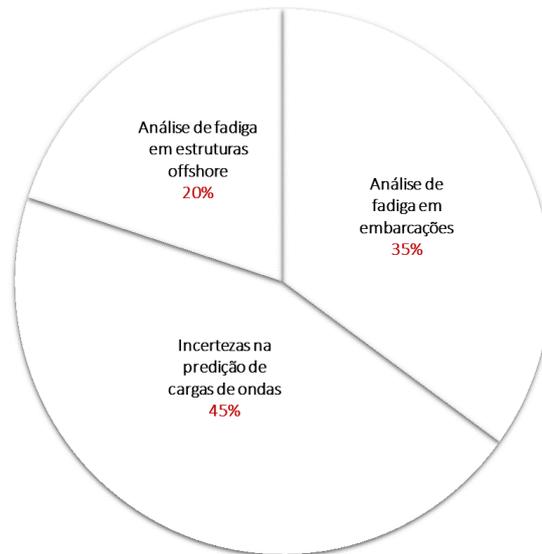
Os estudos das ações do mar sob o casco de uma embarcação compõem uma das grandes áreas da engenharia naval e da indústria *offshore*, especialmente para o Brasil que possui uma grande utilização de navios nas atividades militares, de apoio logístico, perfuração e produção de petróleo e gás.

No século passado observou-se estudos relevantes nesta área, quando Froude (1861), Krylov (1896) e outros desenvolveram modelos matemáticos e estudos experimentais tentando descrever problemas de resistência ao avanço, comportamento do navio em mar aberto por exemplo. A partir de 1950 foi empregada uma grande atenção ao estudo do comportamento de navios, tanto no mar aberto quanto em águas abrigadas, em busca do desenvolvimento de modelos matemáticos que permitissem descrever as forças hidrodinâmicas atuantes em embarcações e suas equações de movimento.

Os métodos tradicionais de projetos de navios utilizam estudos experimentais com modelos de embarcações e de tanques de teste em escala reduzida, o que demandam uma quantidade de tempo considerável tanto para a montagem quanto para a realização dos testes, além de custos elevados. Desde os anos 60 a dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) vem se tornando uma alternativa favorável do ponto de vista financeiro e de prazos, pois testes em modelo experimentais podem demandar uma grande infraestrutura para sua realização, como por exemplo: laboratório com amplo espaço, tanques de prova, maquetes das embarcações, sensores, *hardwares* e *softwares*.

O desenvolvimento de metodologias de simulação de parâmetros reais em um ambiente virtual é de grande interesse para os projetos de cascos de embarcações. A concepção de um casco é uma tarefa complexa que envolve a aplicação de distintas disciplinas da engenharia, sendo realizada, em sua grande maioria, com base nas regras de uma Sociedade Classificadora de Embarcações. Os navios são projetados e construídos para operar em média 20 anos e diante dos grandes esforços que as estruturas do casco são submetidas através das forças oriundas das condições de mar, há uma grande suscetibilidade dessas estruturas experimentarem efeitos indesejados.

Hirdaris *et al.* (2014) apresenta uma revisão dos avanços de estudos relacionados a navios e estruturas *offshore* com particular ênfase sobre as metodologias aplicáveis para a predição de cargas ambientais e operacionais a partir das ondas, correntes e ventos. A Figura 1 demonstra uma estimativa aproximada da produção científica entre 2009 e 2012 para temas especializados em estruturas de embarcações.



**Figura 1** – Distribuição percentil de uma aproximação das publicações entre 2009 e 2012 com foco em estruturas de embarcações.

**Fonte:** Adaptado de Hirdaris *et al.* (2014)

Os estudos relacionados a “*Incertezas na predição de cargas de ondas*” somam 45% em relação a avaliação de estruturas de embarcações e esta transferência de *momentum* das ondas do mar para o casco de uma embarcação é de difícil determinação, pois requer uma análise apurada dos possíveis movimentos em relação aos seis graus de liberdade: avanço, deriva, afundamento, guinada, arfagem e balanço.

Com as cargas marítimas originárias de dados reais da Bacia de Campos, que é um dos berços da navegação marítima e produção de petróleo e gás do Brasil, este trabalho consiste na avaliação da interação entre um corpo rígido (um modelo do casco *Wigley III* em escala reduzida) e o fluido (ar-água) através da aplicação de técnicas de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*).

## 1.2. OBJETIVO

O objetivo principal desta dissertação é avaliar através de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) os movimentos de afundamento (*heave*) e arfagem (*pitch*) provocados por ondas e correntes em uma embarcação, utilizando-se como dados de entradas condições de mar da Bacia de Campos, os quais foram previamente analisados e destes foram delimitados os níveis críticos de períodos e amplitudes de onda.

Os dados do modelo são simulados em escala reduzida através do *software* ANSYS Fluent© e é determinada a relação entre estes movimentos e as ondas, sendo mensuradas através dos Operadores de Amplitude de Resposta (*RAO - Response Amplitude Operators*).

Este trabalho se concentra na avaliação dos RAOs relativos aos movimentos verticais de afundamento e arfagem de um casco tipo *Wigley III* sobre diferentes condições de mar. Partindo-se de um modelo reduzido, foram simuladas numericamente as respostas da embarcação sujeita a diferentes carregamentos de ondas e correntes.

O modelo utilizado neste estudo foi simulado com dados adicionais e validados por comparação com os resultados numéricos de Ferreira (2018) e com os dados experimentais divulgados por Journée (1992).

## 1.3. APRESENTAÇÃO

A presente dissertação possui a seguinte estruturação: O capítulo 1 contendo a introdução que apresenta uma contextualização, a motivação, os objetivos e esta apresentação. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, abordando a dinâmica das embarcações, a fluidodinâmica computacional, o número de Froude e o escoamento não-confinado, os seus graus de liberdade relacionados aos RAOs e as condições de mar. O capítulo 3 expõe as modelagens matemáticas e numéricas sendo estas divididas nos tópicos de visão geral do problema, equações governantes, modelo de turbulência, modelo para interface ar-água, modelo numérico, modelo computacional, condições de contorno, e, por fim, a validação do modelo e cálculo dos RAOs. O capítulo 4 apresenta os resultados separados entre os tópicos de simulações e análise das condições de mar da Bacia de Campos. O Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A DINÂMICA DAS EMBARCAÇÕES

Ao longo dos últimos 250 anos, as sociedades classificadoras de embarcações têm elaborado normas, regras e práticas recomendadas para navios e instalações flutuantes com base na evolução da experiência prática, teórica e experimental das influências das ondas sob os cascos e estruturas *offshore*. Cada uma das sociedades classificadoras de embarcações que compõem a associação IACS - *International Association of Classification Societies* (DNV GL, ABS, LR, BV, RINA, IRS, CCS, NKK, KR), por exemplo, possuem normas próprias relacionadas à análise estrutural dos cascos. Além destas sociedades classificadoras, outros órgãos ligados a indústria também desenvolvem normas e regras relacionadas ao tema, como o *American Petroleum Institute* (API), o *American Society of Mechanical Engineers* (ASME).

As metodologias de cálculos dos efeitos das ondas e correntes em cascos se baseiam nestas normas internacionais, tais como a DNVGL-RP-C205 (2017) e a API RP 2Sk (2015), que podem induzir a uma superestimativa dos deslocamentos sofridos pelas estruturas, uma vez que não foram desenvolvidas com as condições das cargas ambientais específicas do Brasil. As empresas de engenharia desenvolvem uma variedade de filosofias de projeto para atender aos requisitos de integridade estrutural, segurança, econômicos e funcionais dos sistemas associados às embarcações. O desenvolvimento de estudos relacionados aos esforços sofridos pelas estruturas *offshore* submetidas às forças oriundas das condições de mar reais, é crucial para a concepção de projetos que visem manter a integridade estrutural dos sistemas ao longo de todos os anos de operação.

Conhecidos pesquisadores, ainda no século passado, realizaram estudos relevantes nesta área. Foram desenvolvidos modelos matemáticos e estudos experimentais tentando-se descrever o comportamento do navio no mar e seus problemas. Dentre estes pesquisadores cita-se Froude (1861) que perseguia a solução dos problemas de amortecimento de balanço (*roll*) que os navios a vapor experimentavam e Krylov (1896) que investigou os movimentos de afundamento e arfagem (*heave e pitch*).

A contínua busca de modelos matemáticos e equações de movimento que permitissem descrever as forças hidrodinâmicas atuantes em navios resultaram nas publicações dos trabalhos de Tasai (1959) e também Ogilvie e Tuck (1969).

Borodai e Netsvetayeva (1969) se aprofundaram especificamente no estudo dos movimentos de afundamento e arfagem (*heave* e *pitch*), já Salvesen, Tuck e Faltinsen (1970) abrangeram também equações dos movimentos no plano horizontal.

A literatura demonstra que diversos pesquisadores já investigavam os movimentos de embarcações induzidas por ondas utilizando diferentes cascos e condições de onda. Vossers *et al.* (1960) testou os modelos da série 60 utilizando uma altura de onda e cinco comprimentos de onda diferentes. Nakamura e Naito (1977) testaram a propulsão e resistência de um navio porta *containers* em ondas regulares e irregulares.

Journée (1992) realizou experimentos para a determinação dos movimentos verticais para 4 diferentes formas do casco *Wigley*, sob a influência de vários comprimentos e amplitudes de onda.

Shigemi e Zhu (2004) comentam que a maioria dos projetos de embarcação utilizam cargas ambientais conhecidas por uma questão de conveniência, porém, percebe-se que as condições de mar reais encontradas por estas embarcações quando inseridas em seus locais de operação são distintas daquelas consideradas na fase de projeto. Nos últimos anos, muitas pesquisas têm sido realizadas para se desenvolver métodos de estimação dos estados de mar, tornando-se possível estimar condições de ondas e correntes em que um navio estaria exposto de forma mais acurada, proporcionando aos projetistas os dados necessários para o desenvolvimento destas estruturas.

O estudo publicado por Lotsberg e Landet (2005) é uma evidência de como a indústria desenvolve estudos e testes em laboratórios relacionados às análises dinâmicas *versus* fadiga para um determinado tipo de casco de embarcação. Neste estudo foram realizados experimentos com corpos de prova longitudinais retirados da parte lateral do casco de um navio convertido em uma plataforma e foram feitas análises numéricas destas amostras e modelagens por elementos finitos.

A DNVGL-RP-C205 (2017), que é uma prática recomendada definida pela Sociedade Classificadora de embarcações DNV GL, determina métodos para predição de cargas de impacto de ondas marítimas, onde observa-se a abordagem de um método numérico para prever as pressões de impacto características para um nível de probabilidade de ondas.

Dalane (2011) menciona que, ao projetar estruturas *offshore*, como exemplo uma plataforma, a segurança é uma parte importante do processo, sendo primordial que a estrutura possa suportar todas as cargas que atuam sobre ela. Para garantir que o projeto estrutural está

dentro do nível de segurança estabelecida pelas autoridades, o projetista tem de garantir que o projeto está de acordo com as regras e regulamentos para o local onde a estrutura será instalada.

As regras e regulamentos usualmente variam de país para país, portanto, deve-se reconhecer que em alguns casos existem semelhanças, como nos casos dos países que possuem características similares nas condições de mar, entretanto, há casos onde existem divergências. Um exemplo desta divergência é quando se torna necessário adotar regras de uma sociedade classificadora que usualmente utiliza o Mar do Norte como fonte de dados para parâmetros de ondas e correntes em seus regulamentos, enquanto a estrutura a ser fabricada irá operar no Brasil sob condições de mar distintas das características do Mar do Norte.

A prática recomendada DNVGL-RP-C205 (2017) fornece orientações para modelagem, análise e previsão das condições ambientais, além de fornecer orientações para o cálculo das cargas ambientais que atuam sobre estruturas. As cargas avaliadas são oriundas das ondas, das correntes e dos ventos. A concepção desta prática recomendada foi baseada na modelagem e análise de cargas ambientais conhecidas, amparada pela experiência adquirida em projetos anteriores e também pelo desenvolvimento de novos projetos de investigação. O principal objetivo desta recomendação é fornecer critérios racionais para avaliação de cargas que atuam em estruturas marítimas advindas das ondas, correntes e ventos.

Para se obter uma otimização do projeto de uma estrutura flutuante deve-se avaliar as cargas a que esta estrutura está sujeita e é capaz de resistir, o que novamente suscita a necessidade de realizar estudos matemáticos complexos com base nos dados de carga das ondas, correntes e ventos do local onde esta estrutura flutuante irá operar.

## 2.2. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Ciência que se dedica a estudar o escoamento dos fluidos, a fluidodinâmica, é uma disciplina ligada à, hoje conhecida, Mecânica dos Fluidos, que avalia o comportamento dos fluidos em movimento e em repouso. Diversas são as aplicações da fluidodinâmica, como exemplo, esta pode ser utilizada em estudos relativos ao desempenho dos cascos de embarcações em águas calmas e também em águas revoltas. Outro exemplo da aplicação da fluidodinâmica é a utilização das equações médias de Reynolds e as equações médias de Navier-Stokes (RANS - Reynolds *Averaged* Navier Stokes) para otimização da forma e do rendimento de um casco de uma embarcação. (Grigoropoulos, 2010)

O método de modelagem de turbulência RANS, pode ser definido como um sistema de equações no qual são definidas as médias da equação de Reynolds, que é empregada para a conservação da massa (ou continuidade) e as médias da equação de Navier-Stokes, que é empregada para conservação da quantidade de movimento no domínio do tempo. Através desta modelagem torna-se possível a avaliação dos efeitos das flutuações turbulentas de pressão e velocidade. (Ruggen, 2012)

O século XIX se tornou marcante na construção do conhecimento relativo à fluidodinâmica, observou-se um significativo progresso científico a partir dos trabalhos teóricos e experimentais de diversos estudiosos como Osborne Reynolds, Claude-Louis Navier e Lord Rayleigh. Além destes, outra descoberta que se destacou foi a formulação das equações de Navier-Stokes, em 1843 pelo matemático e físico irlandês George Gabriel Stokes que consegue dar um caráter mais abrangente às equações de Euler definidas por Leonhard Euler. (Plauska, 2013)

Até o surgimento dos recursos computacionais de *hardwares* e *softwares* capazes de solucionar as equações de Navier-Stokes, as soluções propostas pelos matemáticos, físicos e engenheiros se restringiam a aproximações. Com o avanço tecnológico e o surgimento de computadores com capacidade de processamento maiores, a utilização das técnicas de CFD se tornou uma ferramenta importante para previsão dos movimentos de um navio sob influência de cargas marítimas e, desde então, diversos estudos vêm sendo realizados com aplicação desta técnica.

Weymouth *et al.* (2005) realizaram simulações com a utilização de um código computacional para resolução das equações RANS e a previsão dos movimentos de afundamento (*heave*) e arfagem (*pitch*) de uma forma do casco *Wigley* para um específico número de Froude, distintos comprimentos e distintas amplitudes de onda. O número de Froude é amplamente utilizado na determinação de movimentações de um navio, sendo este um número adimensional que representa a razão entre a inércia do escoamento e a força gravitacional.

Os autores Yan *et al.* (2015) aplicaram ferramentas de CFD para prever as movimentações de afundamento (*heave*) e arfagem (*pitch*) também para um casco do tipo *Wigley* enquanto os autores ZHU *et al.* (2015) a movimentação de balanço (*roll*).

Ghassemi *et al.* (2015) investigaram os movimentos de afundamento (*heave*) e arfagem (*pitch*) de um casco *Wigley* e duas outras formas de casco (S60 e DDG) através da modificação da teoria de faixas (*strip theory*) usando o software Maxsurf©.

Chen *et al.* (2015) simularam as ondas geradas ao redor de uma embarcação *Wigley* em movimento através da solução das equações RANS com modelo de turbulência  $\kappa\text{-}\varepsilon$  e o método de volume dos fluidos (*Volume of Fluid*) para a superfície livre.

Os trabalhos três últimos trabalhos citados, Yan *et al.* (2015), Ghassemi *et al.* (2015) e Chen *et al.* (2015), comparam os resultados numéricos de suas simulações utilizando CFD com os dados experimentais apresentados por Journée (1992).

### 2.3. O NÚMERO DE FROUDE E O ESCOMANETO NÃO-CONFINADO

Escoamentos que ocorrem ao redor de corpos imersos em fluidos sem fronteiras são definidos como escoamentos externos, pois não existem em limitações de paredes físicas.

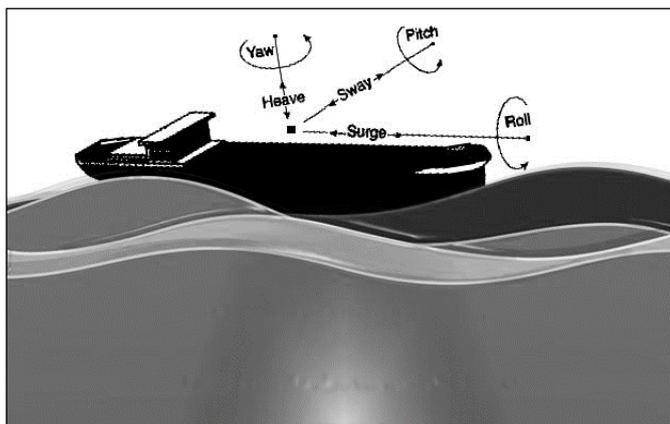
Escoamentos externos sofrem influência do número de Froude ( $Fr$ ) que é um parâmetro adimensional, o qual representa a razão entre as forças de inércia e as forças gravitacionais. Este parâmetro é utilizado neste estudo para estimar a performance hidrodinâmica da embarcação, calculado através da equação (1):

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

Na equação apresentada a variável  $U$  (m/s) é a velocidade do escoamento;  $g$  (m/s<sup>2</sup>) é a aceleração da gravidade;  $L$  (m) é o comprimento da embarcação em estudo e o  $Fr$  é um parâmetro considerado nos cálculos de estabilidade e performance hidrodinâmica da embarcação.

### 2.4. OS SEIS GRAUS DE LIBERDADE (SIX DEGREES OF FREEDOM - 6DOF) E OS OPERADORES DE AMPLITUDE DE RESPOSTA (RESPONSE AMPLITUDE OPERATORS - RAO)

Diversos estudiosos vêm aplicando distintas metodologias na predição dos movimentos de embarcações nos seis graus de liberdade (6DOF – *six degrees of freedom*): avanço, deriva, afundamento, guinada, arfagem e balanço (*surge, sway, heave, yaw, pitch and roll*). Conforme ilustrado na Figura 2.



**Figura 2** – Seis Graus de Liberdade.

Fonte: Autor

O comportamento desta estrutura deve ser analisado a partir do seu centro de gravidade, do qual são mensurados os deslocamentos para cada um dos 6 (seis) graus de liberdade definidos como:

a) *SURGE* (avanço): movimento de translação que não provoca mudança no plano de flutuação do navio e a alteração está no deslocamento longitudinal do casco

b) *SWAY* (deriva): como no avanço o navio mantém seu plano de flutuação. Movimento de translação na direção transversal.

c) *HEAVE* (afundamento): movimento de translação vertical que, positiva ou negativamente, provoca uma mudança do volume de deslocamento. O navio perde seu plano de flutuação que, a seguir, é reconquistado por ação da gravidade

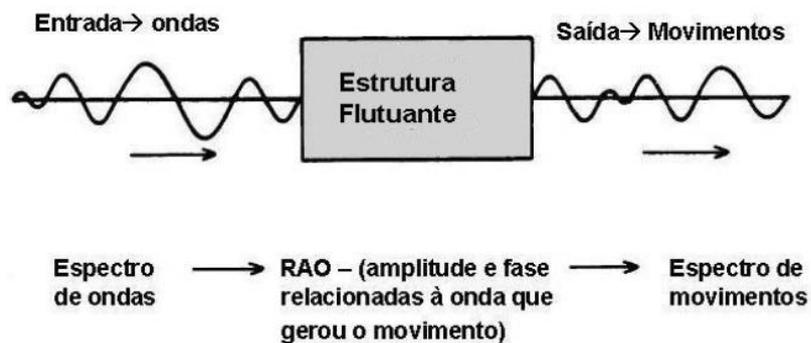
d) *YAW* (guinada): movimento de rotação em torno do eixo vertical, que também não provoca mudança no plano de flutuação da embarcação.

e) *PITCH* (arfagem): o movimento de rotação que provoca variações instantâneas de *trim* (inclinação do navio) e com isto, variações na distribuição do volume submerso.

f) *ROLL* (balanço): movimento de rotação, que de forma análoga ao movimento de *pitch* (ou arfagem), provoca variações na distribuição do volume submerso.

Se uma resposta dinâmica for construída a partir de um intervalo de frequências de interesse para uma dada estrutura flutuante, então esta é chamada de Função de Transferência ou RAO (*Response Amplitude Operators*). A função é assim chamada porque permite que uma função do comportamento da excitação se transforme em uma função que descreve a resposta dinâmica da estrutura para uma onda de amplitude unitária (Chakrabarti, 1980).

Em relação ao movimento de embarcações sob influência de ondas regulares, o RAO representa uma função transferência, adimensionalizada pela onda, para uma determinada frequência de onda. Neste estudo o RAO é mensurado a partir das respostas de uma estrutura flutuante para ondas com distintas características, conforme ilustrado na Figura 3 (Carvalho, 2011).



**Figura 3** – Esquemático do RAO

Fonte: Carvalho, 2011.

Considerando as condições simuladas neste estudo, as equações (2) e (3) expõem as expressões analíticas para cada um dos RAOs avaliados em função do tempo:

$$\zeta = \zeta_{\max} \cos(\Omega_z t + \phi_z) \quad (2)$$

$$\Theta = \Theta_{\max} \cos(\Omega_y t + \phi_y) \quad (3)$$

As variáveis  $\zeta$  e  $\Theta$  representam o afundamento e a arfagem nas condições citadas; os parâmetros  $\zeta_{\max}$  e  $\Theta_{\max}$  são as amplitudes de cada movimento;  $\Omega_z$  e  $\Omega_y$  são as frequências angulares, em rad/s;  $\phi_z$  e  $\phi_y$  são as defasagens, respectivamente, para a translação vertical e para a rotação ao redor do eixo transversal, em radianos.

## 2.5. CONDIÇÕES DE MAR

As condições de mar, sendo a água e o ar representando os fluidos na interação fluido estrutura, são determinadas basicamente por três influências: as condições de ondas, correntes e ventos, sendo que estas influências interagem entre si em diferentes aspectos.

A especificação técnica intitulada “*Technical Specification - Metocean Data*” CENPES (2005) que tem o objetivo de apresentar os dados oceanográficos (parâmetros meteorológicos e oceanográficos) a serem utilizados na concepção de unidades *offshore* e os sistemas de produção na Bacia de Campos, estado do Rio de Janeiro, delimita os parâmetros de ondas extremas que se aproximam de todas as direções conforme exposto na Tabela 1 – Parâmetros de onda na Bacia de Campos, onde Hs (m) é a altura significativa, TPHs (s) é o período da altura significativa, HMAX (m) é a altura máxima, o TPHMAX (s) é o período da altura máxima e U (m/s) é a corrente de superfície para cada direção.

O perfil das correntezas da Bacia de campos possui uma divisão oceanográfica composta por 6 regiões, sendo 3 relativas a profundidade (águas rasas, águas intermediárias e águas profundas) e duas relativas a localização (Norte ou central). Foram selecionados os parâmetros da região de águas intermediárias norte, próximos aos campos de petróleo e gás de Albacora como área de interesse para este estudo.

**Tabela 1** – Parâmetros de ondas e corretes da Bacia de Campos – Águas Intermediárias Norte

DIREÇÃO	PARÂMETROS	PERÍODO DE RETORNO EM ANOS				
		1	10	30	50	100
Norte (N)	Hs - Altura significativa (m)	4,44	4,74	4,87	4,93	5,01
	TPHs - Período da Hs (s)	8,81	9,20	9,38	9,46	9,56
	HMAX -Altura máxima (m)	8,54	9,10	9,34	9,44	9,58
	TPHMAX - Período da HMAX) (s)	10,42	10,56	10,61	10,63	10,66
	U – Corrente de superfície (m/s)	1,12	1,34	-	1,48	1,54
Nordeste (NE)	Hs - Altura significativa (m)	4,55	4,88	5,02	5,09	5,17
	TPHs - Período da Hs (s)	9,13	9,47	9,62	9,68	9,77
	HMAX -Altura máxima (m)	8,73	9,35	9,62	9,73	9,89
	TPHMAX - Período da HMAX) (s)	10,47	10,61	10,67	10,69	10,73
	U – Corrente de superfície (m/s)	0,81	0,93	-	1,00	1,03
Leste (E)	Hs - Altura significativa (m)	3,72	4,34	4,60	4,72	4,87
	TPHs - Período da Hs (s)	9,35	9,90	10,14	10,25	10,40
	HMAX -Altura máxima (m)	7,13	8,29	8,78	9,00	9,28
	TPHMAX - Período da HMAX) (s)	10,05	10,36	10,48	10,53	10,60
	U – Corrente de superfície (m/s)	0,80	0,97	-	1,08	1,13
Sudeste (SE)	Hs - Altura significativa (m)	4,81	5,72	6,11	6,30	6,53
	TPHs - Período da Hs (s)	10,90	10,28	11,45	11,53	11,63
	HMAX -Altura máxima (m)	9,13	10,83	11,57	11,90	12,34
	TPHMAX - Período da HMAX) (s)	12,40	13,21	13,57	13,73	13,94
	U – Corrente de superfície (m/s)	1,41	1,62	-	1,74	1,79
Sul (S)	Hs - Altura significativa (m)	5,14	6,19	6,64	6,84	7,10
	TPHs - Período da Hs (s)	12,65	13,54	13,93	14,11	14,35
	HMAX -Altura máxima (m)	9,65	11,58	12,39	12,75	13,22
	TPHMAX - Período da HMAX) (s)	12,65	13,58	13,97	14,14	14,37
	U – Corrente de superfície (m/s)	1,47	1,76	-	1,97	2,06

DIREÇÃO	PARÂMETROS	PERÍODO DE RETORNO EM ANOS				
		1	10	30	50	100
Sudoeste (SW)	Hs - Altura significativa (m)	6,37	7,16	7,49	7,64	7,84
	TPHs - Período da Hs (s)	13,93	14,78	15,15	15,32	15,55
	HMAX - Altura máxima (m)	11,89	13,30	13,90	14,17	14,53
	TPHMAX - Período da HMAX (s)	13,72	14,40	14,69	14,82	14,99
	U – Corrente de superfície (m/s)	1,47	1,79	-	1,84	1,89
Oeste - Noroeste (W-NW)	Hs - Altura significativa (m)	3,21	3,57	3,72	3,79	3,88
	TPHs - Período da Hs (s)	7,91	8,22	8,37	8,43	8,51
	HMAX - Altura máxima (m)	6,21	6,90	7,19	7,32	7,49
	TPHMAX - Período da HMAX (s)	9,77	9,98	10,07	10,11	10,16
	U – Corrente de superfície (m/s)	0,97	1,13	-	1,22	1,26

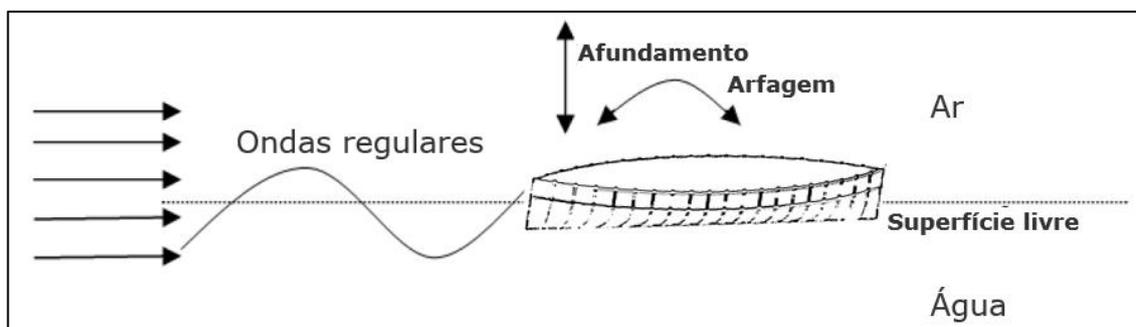
**Fonte:** Adaptado “*Technical Specification - Metocean Data*” CENPES (2005)

Observa-se na Tabela 1 que as ondas de direção Sudoeste, Sul e Sudeste, respectivamente, apresentam maiores alturas significativas em relação as ondas nas demais direções. Como critério de seleção adotado neste estudo, serão selecionadas as ondas mais críticas para cada uma das direções.

### 3. MODELAGENS MATEMÁTICA E NUMÉRICA

#### 3.1. VISÃO GERAL DO PROBLEMA

O comportamento de uma estrutura flutuante é um estudo da dinâmica de um corpo flutuante sob a ação das forças hidrodinâmicas, hidrostáticas e do corpo, sendo este trabalho com enfoque em um casco modelo *Wigley III* e nas análises em relação aos movimentos no eixo vertical: afundamento e arfagem (*heave e pitch*), conforme ilustrado na Figura 4.



**Figura 4** – Estudo de Caso.

Os demais 4 (quatro) graus de liberdade: avanço, deriva, balanço e guinada (*surge, sway, roll e yaw*) foram mantidos fixos através da compilação de funções externas definidas pelo usuário (UDF - *User Defined Functions*) inseridas no *software* ANSYS Fluent©.

A corrente de superfície utilizada foi obtida através da especificação técnica “*Technical Specification - Metocean Data*” CENPES (2005). Alguns artigos discutem sobre a utilização dos parâmetros de vento e também da extrapolação da corrente de superfície ao longo da profundidade, entretanto, para simplificação do modelo utilizado, tais análises não foram realizadas neste estudo. Desta forma as simulações não consideraram os parâmetros de vento e consideraram uma corrente uniforme com ondas progressivas de superfície, desprezando a interação entre corrente e onda.

### 3.2. EQUAÇÕES GOVERNANTES

Os princípios de conservação de massa e da quantidade de movimento no domínio do tempo, aplicados a um volume de controle infinitesimal compõem a modelagem matemática inicial do problema em resolução.

Em sistemas fluidos a aplicação do princípio da conservação de massa dá origem à equação da continuidade, sua notação indicial é apresentada em (4):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

A direção do sistema tridimensional de eixos ortogonais é representada pelo subscrito  $i$ ; o tempo representado pelo  $t$ ; a posição é representada pelo  $x_i$  e  $u_i$  representa a componente da velocidade na direção  $i$ .

A equação da continuidade pode ser simplificada, exposto em (5), quando se considera escoamento incompressível e com massa específica constante em todos os pontos do domínio:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

Aplicando-se as hipóteses simplificadoras do escoamento incompressível, fluido newtoniano e o princípio da conservação da quantidade de movimento origina-se as equações de Navier-Stokes, apresentada em (6):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (6)$$

A aplicação da Equação 5 é válida apenas para escoamentos laminares, sendo, a variável  $\nu$  representando a viscosidade cinemática molecular;  $f_i = (0,0,-g)$  é o termo fonte, que representa o vetor aceleração gravitacional.

O número de Reynolds, um número adimensional que relaciona as forças de inércia e as forças viscosas, pode ser utilizado para a determinação do regime de escoamento laminar ou turbulento conforme a equação (7):

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (7)$$

$L$  representa o comprimento da embarcação na direção do escoamento;  $U$  é a velocidade no sentido do escoamento.

### 3.3. MODELO DE TURBULÊNCIA

#### 3.3.1. Equações RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)

Na modelagem matemática em regime turbulento, onde há mistura de camadas de fluidos, perfil de velocidades e pressão tipicamente transiente e tridimensional, é comumente utilizada a hipótese de Reynolds em que os campos de velocidade e pressão podem ser representados por um valor médio (estacionário) acrescido de flutuações (transiente), conforme as apresentado em (8) e (9):

$$u_i(x_i, t) = \bar{u}_i(x_i) + u'_i(x_i, t) \quad (8)$$

$$P(x_i, t) = \bar{P}(x_i) + P'(x_i, t) \quad (9)$$

Os termos médios são representados pelas variáveis com barras e as variáveis com o apóstrofo representam as flutuações. Considerando a hipótese de Reynolds pode-se reescrever a equação (6) e se obter a equação (10):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j} \quad (10)$$

O tensor de Reynolds  $\bar{u}'_i \bar{u}'_j$  introduz a parcela flutuante no conjunto conhecido como equações de Reynolds, portanto, a equação (5) pode ser rescrita pela equação (11):

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_{it}}} = 0 \quad (11)$$

O presente modelo matemático possui um sistema de EDPs (equações diferenciais parciais) não-lineares, contendo quatro equações (equação (10) aplicada para as três direções do sistema cartesiano mais a equação (11)) e sete variáveis dependentes (pressão dinâmica, três componentes médias e três componentes flutuantes do campo de velocidades). Não há uma única solução possível, uma vez que são considerados os 3 (três) graus de liberdade do sistema, sendo necessário o acoplamento de outras equações para tornar possível a solução do modelo.

### 3.3.2. Modelo de turbulência Shear-Stress Transport (SST) $\kappa$ - $\omega$

O modelo de turbulência adotado foi o SST (*Shear Stress Transport*)  $k - \omega$ , proposto por Menter (1994), este modelo consiste na solução de duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta  $k$ , outra para a taxa de dissipação de energia turbulenta  $\omega$  e utiliza a hipótese de Boussinesq para resolução do problema de fechamento das equações RANS. A relação entre as médias das velocidades com o tensor de Reynolds pode ser expressa por (12).

$$\overline{u'_i u'_j} = - \frac{\mu_T}{\rho} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

O modelo  $k - \omega$  incorpora duas variáveis ao problema, conforme (13) e (14).

$$k = \frac{\overline{u'_i u'_j}}{2} \quad (13)$$

$$\omega = \frac{100k^{1/2}}{9l_m} \quad (14)$$

O termo  $l_m$  o comprimento de mistura de Prandtl e a viscosidade dinâmica turbulenta  $\mu_T$  descrito em (15) pode ser escrita em função das grandezas introduzidas, de acordo com (13) e (14).

$$\mu_T = 0,09 \rho \frac{k^2}{\omega} \quad (15)$$

O modelo SST reescreve o modelo  $\kappa$ - $\omega$  e as equações de transporte resultantes são apresentadas em (16) e (17):

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\kappa\bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_\kappa\mu_t) \frac{\partial\kappa}{\partial x_i} \right] + \tilde{P}_\kappa - \beta^*\rho\omega\kappa \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega u_i)}{\partial x_i} = \rho\alpha S^2 - \rho\beta\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_\omega\mu_t) \frac{\partial\omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1)\rho\sigma_d \frac{\rho}{\omega} \frac{\partial\kappa}{\partial x_i} \frac{\partial\omega}{\partial x_i} \quad (17)$$

$\mu$  é a viscosidade molecular;

$\mu_t$  é a viscosidade turbulenta;

O termo  $S$  indica o módulo da taxa de deformação média  $S_{ij}$ , conforme exposto em (18) e (19):

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (18)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (19)$$

O termo  $\tilde{P}_\kappa$  representa um limitador para a produção de energia cinética turbulenta, evitando que haja produção em regiões de estagnação do fluido, a equação que define o termo  $\tilde{P}_\kappa$  é (20):

$$\tilde{P}_\kappa = \min \left( \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right); 10\beta^*\omega\kappa \right) \quad (20)$$

A expressão matemática da função  $F_1$  é dada de acordo com (21):

$$F_1 = \tanh \left\{ \left( \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}; \frac{500\nu}{y^2\omega} \right); \frac{4\rho\sigma_\omega 2k}{CD_{k\omega}y^2} \right] \right)^4 \right\} \quad (21)$$

A variável  $y$  é a distância até a superfície livre mais próxima e  $CD_{k\omega}$  é a parcela positiva do termo difusivo cruzado definido pela equação (22):

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho\sigma_\omega 2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial\kappa}{\partial x_i} \frac{\partial\omega}{\partial x_i}; 10^{-10} \right) \quad (22)$$

Para solução das equações acima foram assumidas as demais constantes:

$$\alpha = \frac{5}{9}$$

$$\beta' = 0,09$$

$$\beta = 0,075$$

$$\sigma_k = \sigma_\omega = 0,5$$

$$\sigma_d = 0,856$$

### 3.4. MODELO PARA INTERFACE AR-ÁGUA

#### 3.4.1. Interface ar-água

Devido ao avanço tecnológico e o surgimento de computadores com capacidade de prover uma solução numérica para sistemas de equações complexos, foram propostas algumas alternativas para tratamento de escoamentos multifásicos e ao rastreamento da superfície livre, como exemplo o Método de Volume do Fluidos (VOF - *Volume of Fluid*) proposto por Hirt and Nichols (1981).

Neste trabalho foi empregado este método (*Volume of Fluid*) para avaliação da interface entre os fluidos (água e ar). Este método se baseia na implementação de código computacional para localização e monitoramento da posição dinâmica da superfície livre para problemas com fronteira móvel.

#### 3.4.2. Método de volume dos fluidos

O método de volume dos fluidos é uma técnica utilizada para dois ou mais fluidos imiscíveis, considerando que a localização da interface entre os fluidos é impossível de ser encontrada. A interface ar-água modelada pelo método de VOF proposta por Hirt and Nichols (1981), é definida pela equação (23):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + u_i \cdot \nabla \Phi = 0 \quad (23)$$

$\Phi$  representa a fração de volume da fase líquida,  $0 \leq \Phi \leq 1$ .

Através da resolução de um conjunto de equações de movimento, a superfície livre pode ser simulada com precisão. Assumindo que fração do volume de fluido é  $\alpha_q$ , a equação (24) é apresentada como:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q u_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (24)$$

Restrição:  $\sum_{p=1}^n \alpha_q = 1$

$\rho_q$  é a densidade do fluido;

$u_q$  é a velocidade do fluido;

$\dot{m}_{pq}$  é a transferência de massa da fase  $p$  a fase  $q$ ;

$\dot{m}_{qp}$  é a transferência de massa da fase  $q$  a fase  $p$ ;

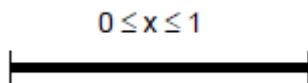
$S_{\alpha_q}$  é o termo em busca, cujo valor padrão é zero no *software*.

### 3.5. MODELO NUMÉRICO

#### 3.5.1. Método dos volumes finitos

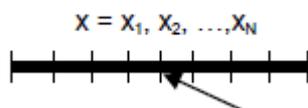
Em uma abordagem superficial, os *softwares* de CFD, como no caso do ANSYS Fluent©, são concebidos para substituir o domínio do problema contínuo por um domínio discreto usando uma grade. No domínio contínuo, cada variável de fluxo é definida em cada ponto no domínio, já no domínio discreto cada variável de fluxo é definida apenas aos pontos de grade. Por exemplo, a pressão  $p$  no domínio contínuo em uma dimensão (1D) seria definida pela equação (25):

$$p = p(x); 0 < x < 1 \quad (25)$$



A pressão  $p$  no domínio discreto 1D (uma dimensão) seria definida pela equação (26):

$$p = p(x_i); i = 1; 2; 3 \dots; N \quad (26)$$



Através do CFD é possível resolver diretamente as variáveis de fluxo relevantes apenas nos pontos de grade e os valores em outros pontos são determinados por interpolação dos valores nos pontos de grade.

Com o incremento do número de nós, aumenta-se também a demanda por recursos computacionais para a solução do problema, sendo revertido em tempo de processamento. É denominada como malha, ou grade, a distribuição destas células no domínio. Uma malha considerada otimizada, geralmente não é uniforme, sendo caracterizada, portanto, por maiores refinamentos nas regiões onde há maior relevância dos fenômenos procurados. Quanto à organização dos elementos a malha pode ser classificada como estruturada e não estruturada. Quanto à forma dos volumes de controle, é comum a divisão em elementos tetraédricos e hexaédricos.

O código de fluidodinâmica computacional ANSYS Fluent© utiliza o Método dos Volumes Finitos (MVF). São realizadas quatro etapas: discretização do domínio de fluido em volumes de controle, aplicação das equações de conservação em cada volume, aproximação das derivadas existentes nas equações aplicáveis em termos lineares e solução das equações lineares por método iterativo.

As incógnitas do problema são resolvidas no centroide de cada volume de controle e no seu interior o balanço das variáveis é conservado. A seleção dos modelos de aproximação linear deve ser feita levando-se em consideração as características do fenômeno de transporte envolvido, podendo ser:

- Aproximação por diferenças centrais, aplicável a problemas com caráter difusivo, sendo o valor da propriedade  $\psi$  influenciado pela contribuição das células adjacentes sem considerar o fluxo do escoamento.
- Esquema *upwind*, onde o valor da propriedade  $\phi$  é influenciado pelo nó vizinho de maior influência, o que reflete a consideração da direção do fluxo. Aplicável a problemas com características advectivas.
- Esquema *upstream*, aproximando-se do esquema de diferenças centrais ou *upwind*, este é uma formulação intermediária entre os dois esquemas acima descritos. Cabe ressaltar que usualmente este é o esquema mais adequado para problemas com caráter difusivo ou advectivo.

Para a solução dos algoritmos, costuma-se utilizar um recurso de discretização conhecido como arranjo co-localizado para os componentes de velocidade e de pressão. A ideia consiste em avaliar as variáveis escalares, como pressão, massa específica e temperatura, nos pontos nodais, e calcular os componentes da velocidade nas faces de cada célula.

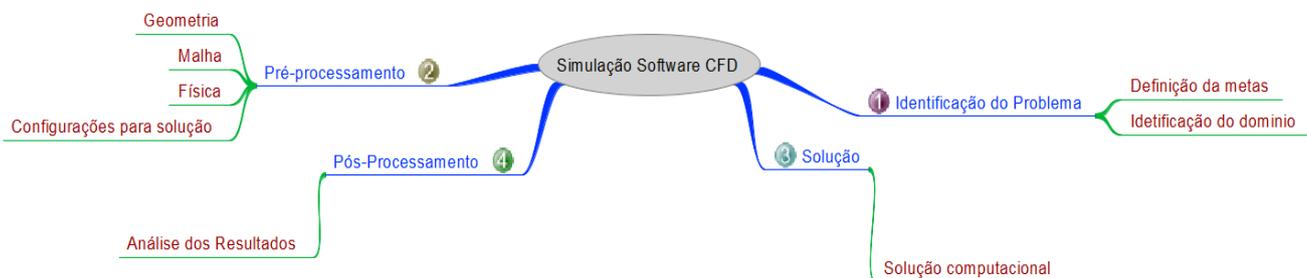
### 3.6. MODELO COMPUTACIONAL

#### 3.6.1. *Software* de CFD (Computational Fluid Dynamics)

As técnicas de fluidodinâmica experimentaram grandes avanços através do desenvolvimento de computadores com maior capacidade de processamento de simulação numérica de qualquer processo físico ou químico. Neste trabalho é abordado o problema real e contínuo da movimentação das embarcações discretizado no domínio em volumes finitos. A simulação baseia-se nos princípios de conservação da energia, massa e quantidade de movimento. O CFD consiste na previsão acurada de fluxo de fluidos através do:

- Modelamento matemático (equações diferenciais parciais);
- Métodos numéricos (discretização e técnicas de solução);
- Ferramentas e *softwares* (*solvers*, pré e pós processamento).

Em geral os *softwares* comerciais de CFD, incluindo o ANSYS Fluent©, utilizado neste trabalho, possuem a mesma abordagem. São quatro etapas típicas e suas respectivas sub etapas conforme abordado na Figura 5:



**Figura 5** – Metodologia de simulação com *software* de CFD.

1. **Identificação do problema:** identificar qual o problema a ser resolvido, qual o resultado da simulação a ser obtido, qual o tempo disponível para realização das simulações, as variáveis a serem calculadas, o grau de acurácia. Também momento, deve-se identificar o domínio de interesse.

2. **Pré-processamento:** preparar todos os dados a serem simulados, de forma subdivida em tarefas, sendo:

2.1. **Construção da geometria** e definição da região fluida;

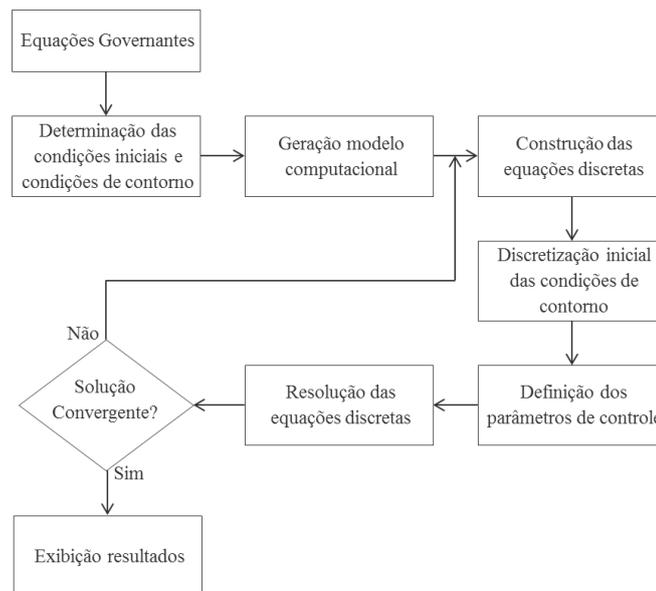
2.2. **Geração da malha** computacional determinando os tipos de elementos e o grau de refinamento necessário em cada região do domínio de forma apropriada para solução do

problema estudado. Quanto ao tipo de elemento, os mais utilizados são uma mescla entre: tetraédricos, hexaédricos, prismas

3. **Modelos físicos e solução:** especificação do modelo físico e os métodos de solução. Definir as propriedades dos fluidos estudados, definir se o problema é transiente ou permanente, selecionar o modelo de turbulência, prescrever as condições iniciais, do escoamento e de contorno, determinar os métodos de discretização das equações e os critérios de convergência.

4. **Pós-Processamento:** avaliar os resultados obtidos na simulação para garantir que o estudo realizado está fisicamente correto e se são necessários realizar ajustes nas etapas anteriores. Exportar os resultados obtidos através de imagens, gráficos e dados numéricos para a realização de análises mais apuradas.

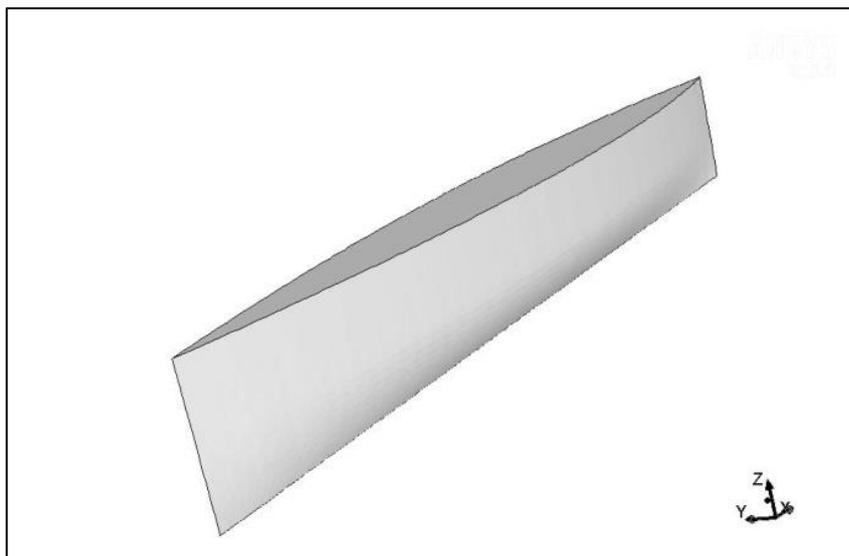
O processo utilizado para realização das simulações hidrodinâmicas desejadas, é expresso pelo fluxograma na Figura 6:



**Figura 6** – Processo de Cálculo do *software* de CFD.

### 3.6.2. Geometria

A geometria analisada neste estudo é o modelo reduzido de casco *Wigley III*, o qual também foi analisado nos trabalhos de Journée (1992), Yan *et al.* (2015), Ghassemi *et al.* (2015), Chen *et al.* (2015) e Ferreira (2018). A Figura 7 apresenta o modelo do caso com suas dimensões e massa. O modelo do casco foi posicionado no instante  $t = 0$  com seu centro de gravidade na origem dos eixos cartesianos (localizada na altura da linha d'água a 3,50m das paredes laterais e 3,50m da parede mais próxima da proa) e comprimento  $L$  alinhado com o eixo  $x$ .



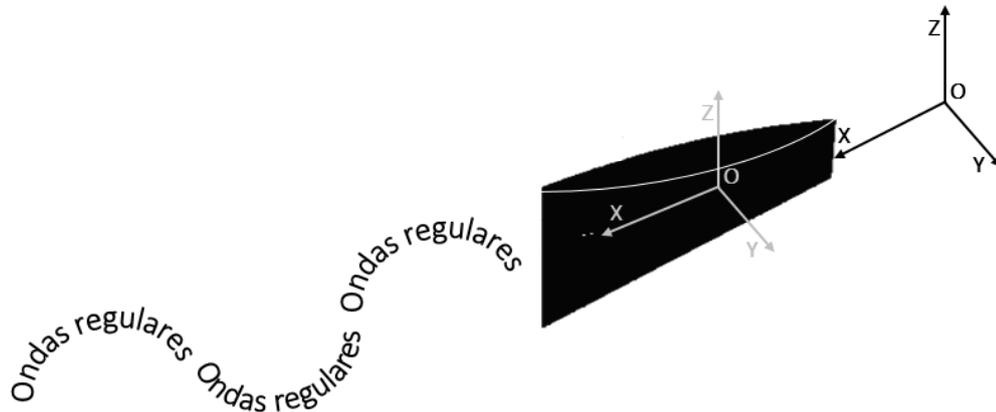
**Figura 7** – Geometria do casco modelo *Wigley III*.

A Tabela 2 apresenta as propriedades do modelo adaptado do casco utilizado neste estudo, com base em Journée (1992), Yan *et al.* (2015), Ghassemi *et al.* (2015), Chen *et al.* (2015) e Ferreira (2018).

**Tabela 2** – Propriedades do modelo reduzido de casco *Wigley III*.

Propriedades do Casco	
Comprimento longitudinal (m)	2,360
Largura (m)	0,236
Calado (m)	0,1475
Massa (kg)	36,5323

São adotados dois sistemas de coordenadas para descrever movimentos desta embarcação em relação as ondas. O primeiro é o sistema de coordenadas O-XYZ em relação ao espaço físico, com o eixo z positivo apontando para cima e o segundo é o mesmo sistema de coordenadas O-XYZ, porém, em relação ao corpo rígido do casco que está movendo na mesma velocidade e direção. O centro de gravidade do casco é a origem do sistema de coordenadas fixo de corpo, conforme Figura 8.

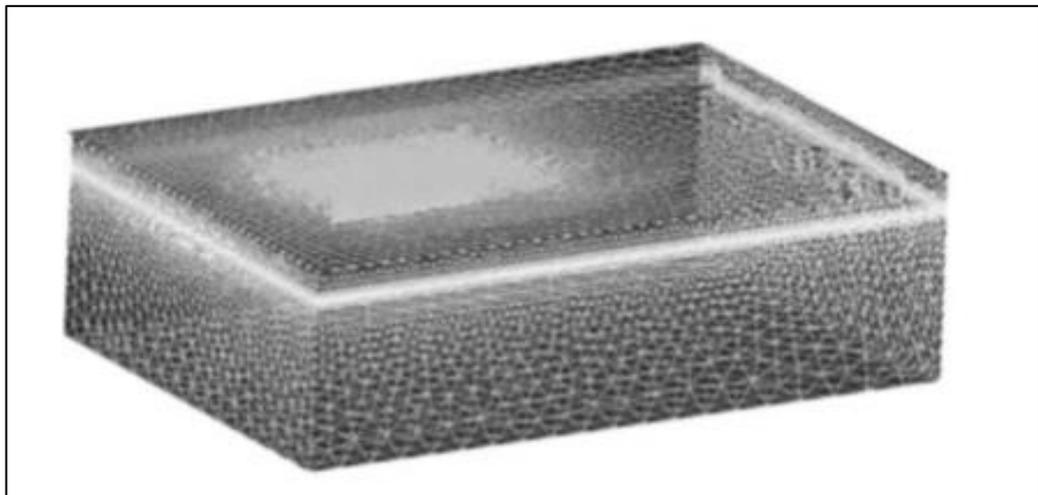


**Figura 8** – Sistema de Coordenadas do casco.

Na modelagem adotada neste estudo, o casco permanece fixo nestas coordenadas definidas e as ondas e correntes que escoam pelo domínio de forma a interagir com o casco. O tópico 3.6.3 apresenta maiores detalhes do domínio do fluido e malha.

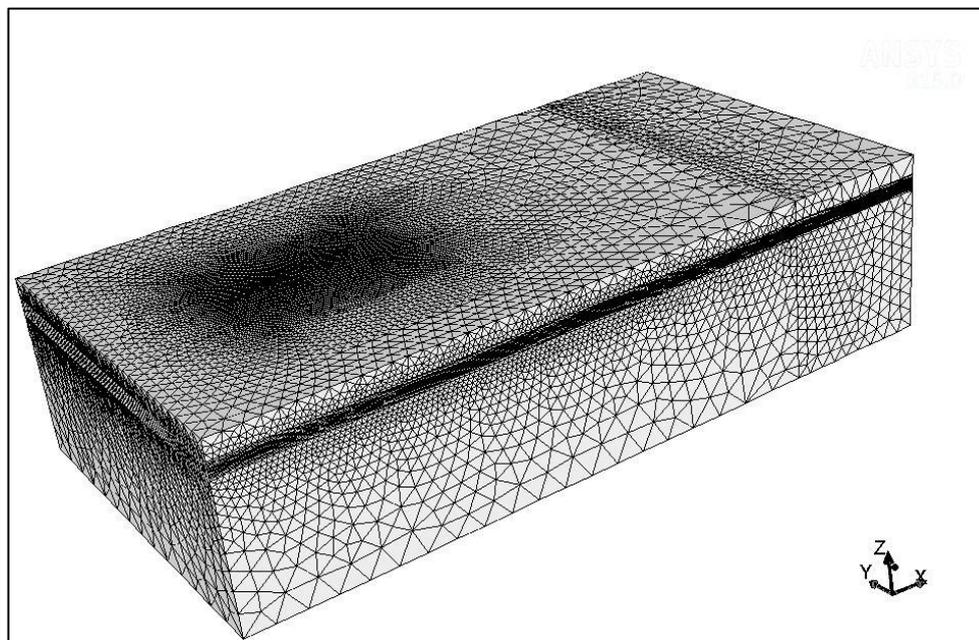
### 3.6.3. Domínio do fluido e malha

A modelagem computacional para realização das simulações assumiu uma forma geométrica de um cubo (Figura 9) que se assemelha a um tanque virtual com as seguintes dimensões: comprimento 15m, largura 6m e altura 4,5m. Apesar da semelhança aparente a um tanque, o modelo é de fato um canal aberto, pois as paredes “Laterais” e de “Saída” foram definidas com condição de amortecimento, evitando a reflexão das ondas.



**Figura 9** – Domínio do Fluido.

De acordo com Yan *et al.* (2015), malhas prismáticas geram melhores resultados do que as tetraédricas em regiões de superfície livre. Sendo assim, utilizaram-se malhas não estruturadas prismáticas nas proximidades da interface ar-água e malhas não estruturadas tetraédricas nas demais regiões, conforme observado na Figura 10.



**Figura 10** – Malha em estudo.

O domínio possui 13,20m de comprimento, 7,00m de largura e 3,25m de altura, com profundidade da água de 2,75m abaixo do nível da superfície livre. A malha das proximidades do modelo reduzido da embarcação foi refinada para garantir uma melhor predição dos movimentos complexos que o fluido realiza na região. Para se determinar os movimentos da superfície livre com maior precisão, também, houve um refinamento local nas proximidades da interface ar-água. A Tabela 3 apresenta as propriedades da malha empregada, em valores aproximados.

**Tabela 3** – Propriedades da malha.

Propriedades	Valores
Número de células	2,55 milhões
Número de nós	621 mil
Ortogonalidade	> 0,22
Volume máximo (m <sup>3</sup> )	3,0 x 10 <sup>-2</sup>
Volume mínimo (m <sup>3</sup> )	1,7 x 10 <sup>-7</sup>
Maior comprimento (m)	0,826
Menor comprimento (m)	0,013

Para determinação do intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) adequado a ser adotado para cada iteração é necessário considerar o tamanho das células utilizadas ( $\delta_{cell}$ ) e a velocidade das partículas do fluido que escoam pela célula ( $u_f$ ). O número de Courant-Friedrich-Levy ( $C_r$ ) é um adimensional que relaciona as três propriedades mencionadas, conforme a equação (27)

$$C_r = \frac{u_f \Delta t}{\delta_{cell}} \quad (27)$$

Considerando o menor comprimento das células informado na Tabela 3, adotou-se um  $\Delta t$  de 0,005s. Assim, para que  $C_r$  tenha valor inferior à unidade, de acordo com a equação 27, o valor máximo para  $u_f$  adequado para a malha utilizada é de aproximadamente 2,6 m/s.

#### 3.6.4. Customizações implementadas

Neste estudo foi desenvolvida uma função customizada pelo usuário (UDF - *User-Defined Function*), que consiste em um algoritmo estruturado para aplicações computacionais (neste caso desenvolvido em linguagem C#) capaz de incluir ou alterar etapas da rotina de cálculo do *software* para simular os movimentos relativos entre o casco e a região fluida conforme a incidência das ondas. A UDF foi programada com base nas instruções de ANSYS (2013), e está apresentada no APÊNDICE I.

Os graus de liberdade avanço, deriva, balanço e guinada foram mantidos fixos, de modo que o casco desempenhasse apenas os movimentos verticais de afundamento e arfagem;

Criou-se um arquivo para registrar em tempo real a posição, velocidade linear, orientação e velocidade angular do modelo reduzido do casco *Wigley III*, para cada um dos intervalos de tempo.

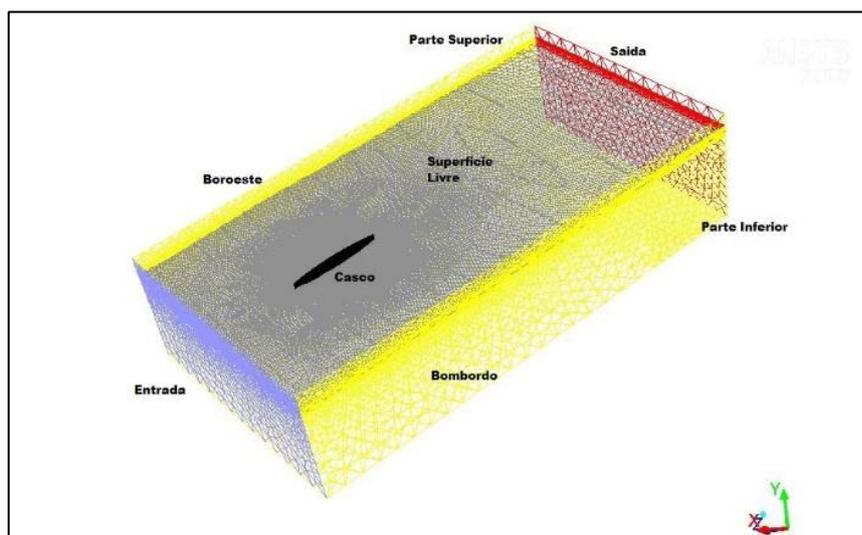
### 3.7. CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno conferem o caráter único à solução encontrada pelo método de CFD, ditando como o solver aborda o problema e interpreta as diversas geometrias envolvidas. A geometria que não for transformada em condição de contorno não é levada em consideração na análise. Nesta etapa são inseridos os dados de entrada, tais como os parâmetros do movimento oscilatório, as propriedades dos fluidos utilizados, modelos de turbulência, modelos numéricos de resolução, etc.. A Tabela 4 apresenta detalhes das condições de contorno.

**Tabela 4** – Condições de Contorno

Contorno	Posição
Entrada	$x=4.5\text{m}$
Saída	$x=6.5\text{m}$
Bombordo	$y=3.0\text{m}$
Boreste	$y=-3.0\text{m}$
Parte Inferior	$up\ z=1.5\text{m}$
Parte Superior	$z=-3.0\text{m}$

Define-se como “*Entrada*” do escoamento (*inlet*) e “*Saída*” do escoamento (*outlet*), respectivamente, as faces transversais à direção  $x$  mais próxima e mais distante à embarcação (na Figura 11 a “*Entrada*” está representado à esquerda enquanto a “*Saída*” está representada à direita).

**Figura 11** – Volume de Controle.

Para validação do modelo foi especificado na “*Entrada*” um escoamento em fase líquida no sentido positivo da direção longitudinal, sendo as ondas regulares geradas no nível da interface ar-água, adotou-se o valor médio de 0,02 metros para a obtido a partir das amplitudes decorrentes do experimento de Journée (1992), portanto a altura foi fixada em 0,04 metros e comprimento de onda alterado de acordo com cada simulação realizada.

A “*Saída*” foi considerada canal aberto, com pressão especificada no nível da interface ar-água. Toda a fase ar foi tratada com pressão constante igual a 1 atm. As paredes laterais foram definidas com condição de amortecimento, de modo a não haver reflexão das ondas. O fundo do domínio fluido e o modelo reduzido do casco foram tratados com condições de impenetrabilidade e não-deslizamento.

### 3.8. VALIDAÇÃO DO MODELO E CÁLCULO DOS RAOs

A validação do modelo utilizado neste trabalho ocorreu através da simulação de dados de entrada similares aos utilizados em experimento publicado por Journée (1992) para uma análise comparativa.

Conforme variável adimensional  $aK$  (também conhecido como esbeltez da onda) dada por Journée (1992), onde  $a$  a amplitude da onda incidente e o número de onda  $K$ , as movimentações de afundamento e arfagem foram simuladas durante um período de 14 segundos para o número de Froude -  $Fr = 0,2$ .

De forma a variar apenas o  $K$ , as simulações foram feitas com amplitude constante de 0,02m para  $a$  obtido de Journée (1992).

A variável  $T$  é o período da onda incidente, e seu valor é obtido a partir da equação 28.

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{gk}} \quad (28)$$

O cálculo do número de Froude -  $Fr$  e foi realizado através de (29):

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (29)$$

Onde  $U$  é a velocidade no sentido do escoamento,  $g$  é a força gravitacional e  $L$  é o comprimento do casco e o  $\lambda$  é o comprimento da onda;

O número da onda  $K$ , foi obtido através de (30):

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (30)$$

O afundamento (*heave*) representado por  $z_a$  (em metros) e a Arfagem (*pitch*)  $\theta_a$  (em graus) são adimensionalizadas através das equações 31 e 32:

$$z_a'' = \frac{z_a}{a} \quad (31)$$

sendo,  $z_a$  e  $z_a''$  representando a afundamento (*heave*) em metros e  $a$  afundamento adimensional.

$$\theta_a'' = \frac{\theta_a}{360} \frac{L}{a} \quad (32)$$

sendo,  $\theta_a$  e  $\theta_a''$  representando a arfagem (*pitch*) em graus e  $a$  arfagem adimensional.

Obteve-se as variáveis  $z_a$  e  $\theta_a$  através do cálculo do centro de oscilação vertical a partir das seguintes equações (33) e (34):

$$z_a = Z_{max} - Z_{min} \quad (33)$$

$$\theta_a = \theta_{max} - \theta_{min} \quad (34)$$

Sendo  $Z_{max}$  e  $\theta_{max}$  o valor máximo de  $Z$  e  $\theta$  no período simulado e  $Z_{min}$  e  $\theta_{min}$  o valor mínimo.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. SIMULAÇÕES

Neste capítulo são abordados dois tópicos, sendo o primeiro relativo à validação do modelo utilizado neste estudo e o segundo relativo à simulação com os dados da Bacia de Campos.

A validação do modelo foi realizada através da comparação deste com os dados experimentais de Journée (1992) e dados numéricos de Ferreira (2018).

Para a simulação com os dados da Bacia de Campos, foram alterados os parâmetros de onda e de corrente, sendo mantidas as demais configurações e parâmetros do modelo.

#### 4.1.1. Validação do Modelo

A Tabela 5 apresenta as características das ondas simuladas para validação do modelo utilizado neste trabalho.

**Tabela 5** - Características das ondas simuladas para validação do modelo

$U$ (m/s)	$\lambda$ (m)	$\lambda / L$	$aK$
1,085	1,50	0,64	0,08
1,085	2,25	0,95	0,06
1,085	3,00	1,27	0,04
1,085	3,75	1,59	0,03
1,085	4,50	1,91	0,03
1,085	5,25	2,22	0,02
1,085	6,00	2,54	0,02

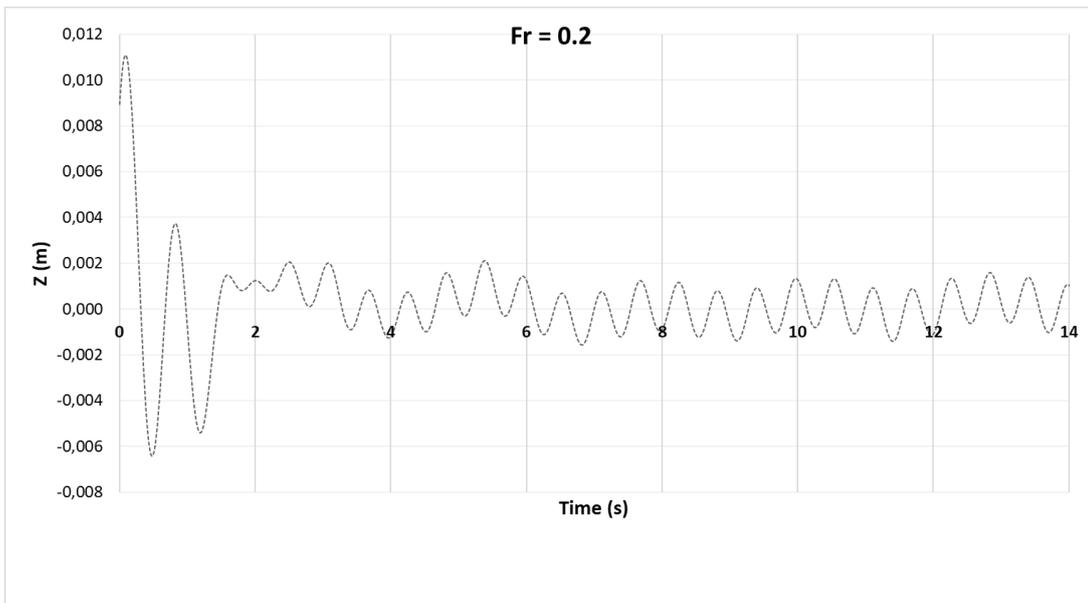
Estes dados representam os principais parâmetros alterados em cada simulação para verificação se o modelo poderia ser utilizado como base para as avaliações das condições de mar da Bacia de Campos.

Para uma mesma condição de corrente,  $U$  (m/s) foram simulados distintos comprimentos de onda  $\lambda$  (m). O comprimento da embarcação, neste estudo o casco *Wigley III*, foi mantido fixo em  $L = 2,36$  m.

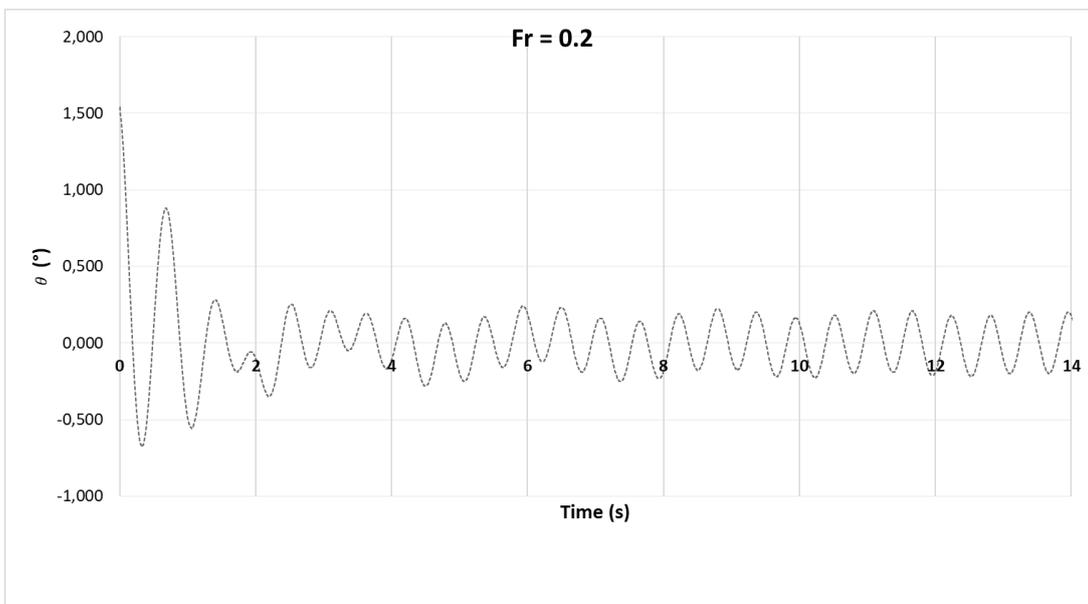
Com o objetivo de não variar dois parâmetros simultaneamente, todas as simulações foram feitas com amplitude constante de modo que apenas a variação do comprimento da onda altere o  $aK$ . Adotou-se o valor médio de 0,02m para  $a$  obtido a partir dos dados utilizadas por Journée (1992).

Não se tinha certeza sobre a existência de cenários na Bacia de Campos onde o  $\lambda / L$  pudesse ser maior que 2,0, portanto, foram simulados dois cenários com  $\lambda / L = 2,22$  e  $\lambda / L = 2,54$  para verificação da convergência do modelo adotado.

As Figuras 12 e 13 exibem o resultado completo do período simulado de ambas movimentações de afundamento e de arfagem respectivamente.



**Figura 12** – Evolução do afundamento para  $\lambda / L = 0,64$  (14 segundos).

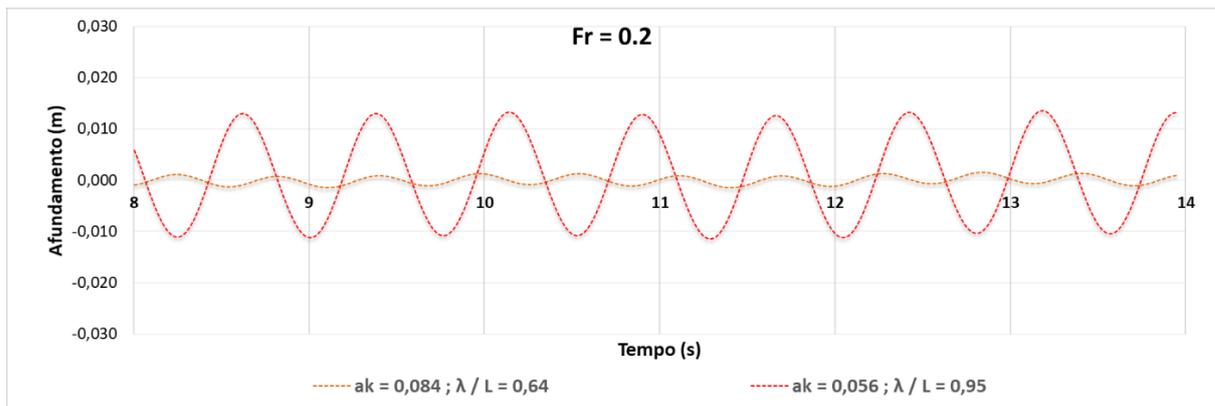


**Figura 13** – Evolução da arfagem para  $\lambda / L = 0,64$  (14 segundos).

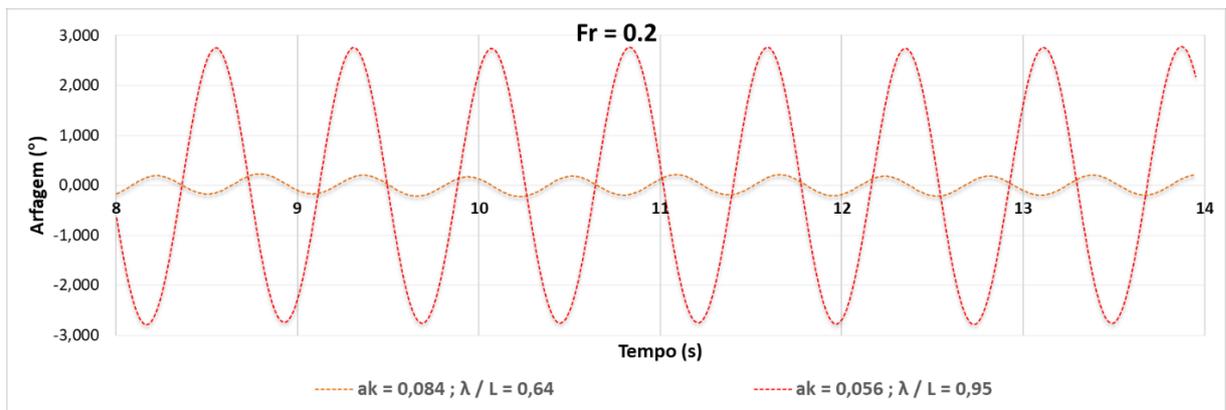
O comportamento periódico das ondas pode ser observado após três segundos iniciais devido a formação de um “transiente” no domínio fluido. Esta tendência aconteceu para ambas simulações de afundamento e de arfagem, conforme Figura 12 e 13 respectivamente. O critério

de seleção utilizado para determinação do período de interesse, teve como premissa a utilização de  $\Delta T \geq 4$  (s);  $Z_{max} \leq 0,00159$  (m) e  $Z_{min} \geq -0,00141$  (m) para o afundamento;  $\theta_{max} \leq 0,22$  (°) e  $\theta_{min} \geq -0,23$  (°) para a arfagem.

Os gráficos representados nas Figuras 14 e 15 demonstram os resultados para o afundamento e arfagem nas condições simuladas para o  $\lambda / L \leq 1,0$ .



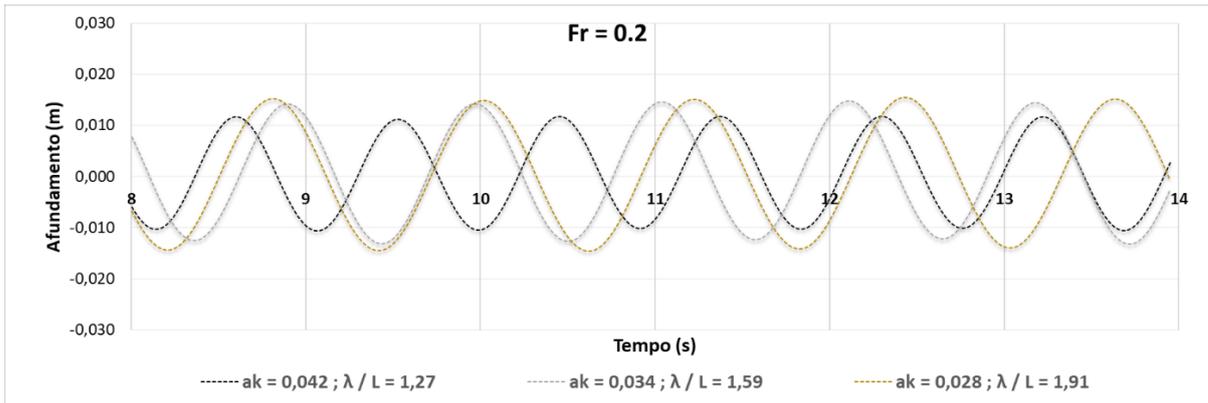
**Figura 14** – Evolução de afundamento para  $\lambda / L = 0,64$  e  $0,95$



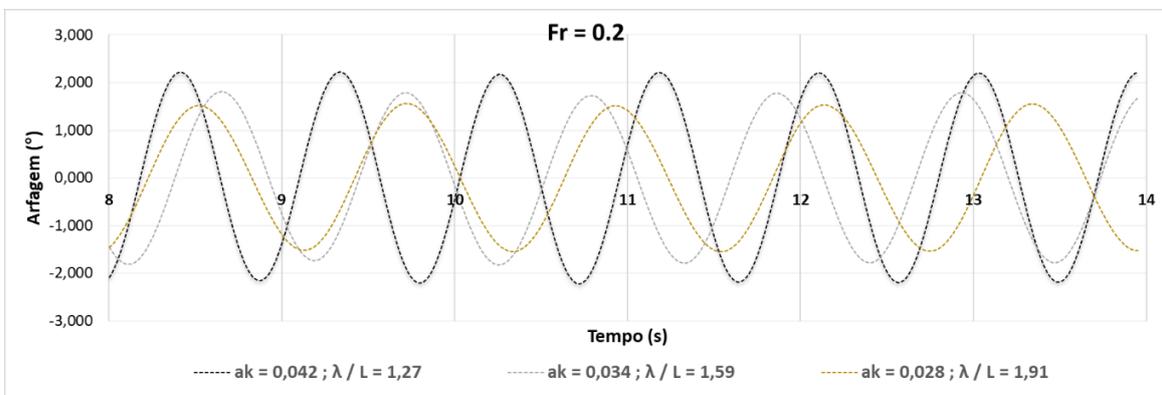
**Figura 15** – Evolução de arfagem para  $\lambda / L = 0,64$  e  $0,95$  respectivamente

Os resultados para o afundamento e arfagem nas simulações onde o casco sofre maior influência das ondas no plano vertical foram separados em duas categorias, sendo a primeira para os casos em que a razão entre o comprimento da onda e o da embarcação está entre 1,0 e 2,0 (Figuras 16 e 17) e a segunda categoria para aqueles casos em que esta razão supera o valor de 2,0.

As condições simuladas onde  $1,0 < \lambda / L < 2,0$  estão representados nas Figuras 16 e 17.

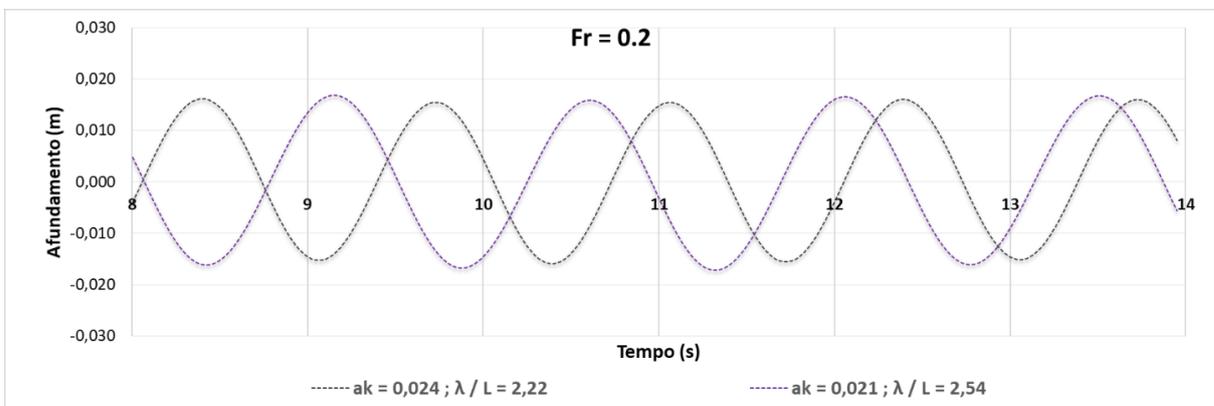


**Figura 16** – Evolução de afundamento  $\lambda / L = 1,27; 1,59; 1,91$

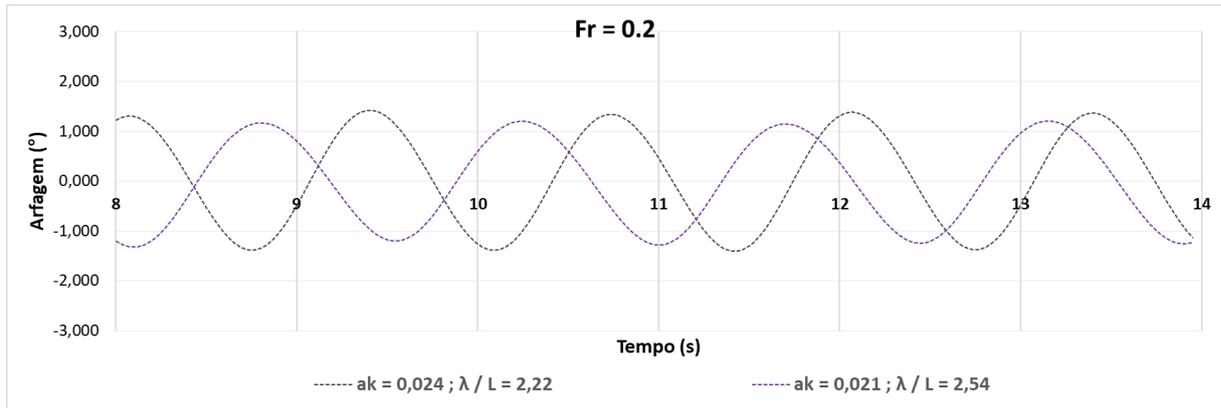


**Figura 17** – Evolução de arfagem para  $\lambda / L = 1,27; 1,59; 1,91$

Nos casos em que os valores de  $\lambda / L$  são maiores que 2,0 ou seja, quando o comprimento da onda é maior que o dobro do comprimento da embarcação, tende-se a ocorrer um aumento da amplitude do movimento no plano vertical, pois a embarcação se move para cima e para baixo com a onda. As condições simuladas onde  $\lambda / L \geq 2,0$  estão representados nas Figuras 18 e 19.



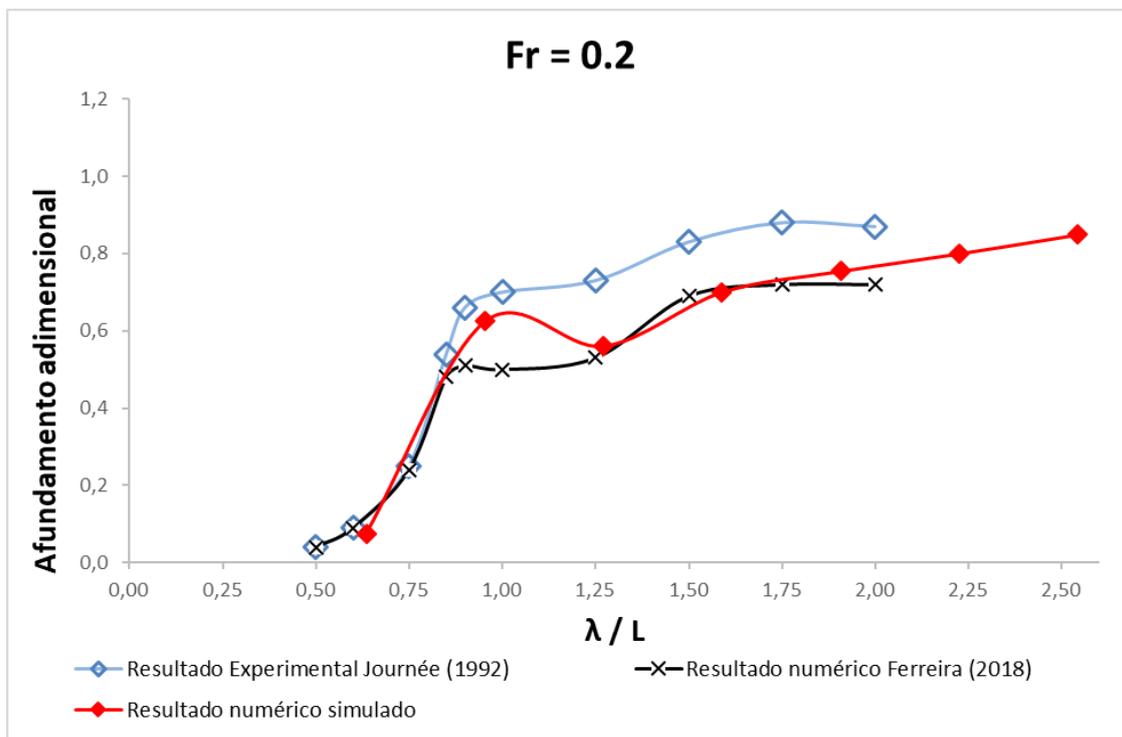
**Figura 18** – Evolução de afundamento para  $\lambda / L = 2,22; 2,54$  respectivamente



**Figura 19** – Evolução de arfagem para  $\lambda / L = 2,22; 2,54$

Ondas mais esbeltas são aquelas com maiores alturas e menores comprimentos, sendo assim, nota-se que as ondas mais esbeltas refletem perturbações mais frequentes à embarcação e as ondas menos esbeltas influenciam no aumento da magnitude do afundamento. Pode-se observar que quanto maior o comprimento da onda em relação ao comprimento do casco, menor será a alteração da movimentação no plano vertical do casco.

A Figura 20, representa os dados experimentais de Journée (1992) comparados aos dados de afundamentos gerados por Ferreira (2018) e dados adicionais  $\lambda / L$  simulados neste estudo conforme expostos anteriormente na Tabela 5.



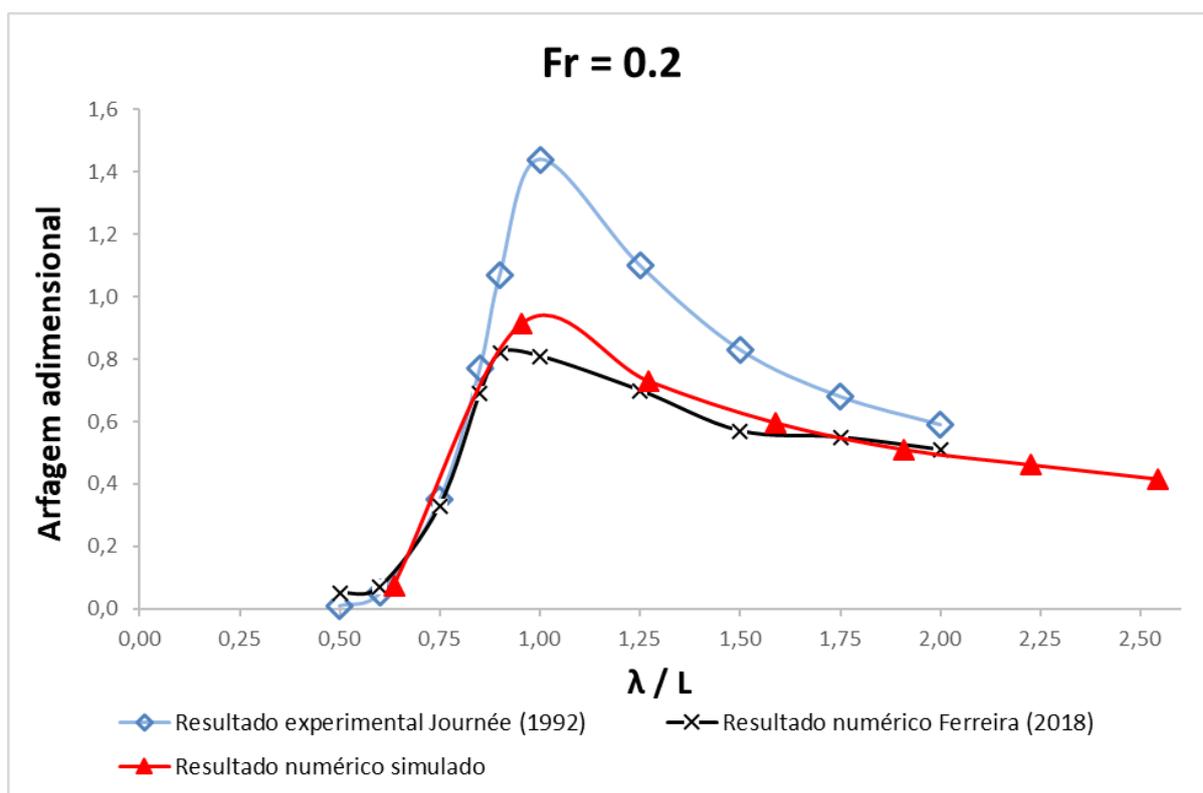
**Figura 20** – Afundamento adimensional simulado *versus* Journée (1992) e Ferreira (2018).

A Figura 20 demonstra que os novos valores de  $\lambda / L$  simulados mantiveram a aderência esperada ao modelo simulado por Ferreira (2018). Observa-se que para alguns casos, o modelo atual obteve resultados mais próximos aos experimentais, como no caso do  $\lambda / L = 0,95$ .

Conforme o aumento do comprimento das ondas, o comprimento da embarcação se torna menor que a distância entre dois picos ou dois vales, sendo assim o navio se move para cima e para baixo com as ondas. Esse comportamento justifica o aumento da amplitude do movimento e percebe-se a aproximação do deslocamento vertical do casco com a amplitude da onda incidente a partir de  $\lambda / L > 1,25$ .

A tendência observada é que as amplitudes de afundamento do casco pequenas para  $\lambda / L < 0,64$  (dados novos simulados) ou  $\lambda / L < 0,50$  (dados experimentais de Journée ou Ferreira).

A arfagem exposta na Figura 21, representa os dados experimentais de Journée (1992) comparados aos dados gerados por Ferreira (2018) e dados adicionais de comprimento de onda e de corrente simulados neste estudo para validação do modelo.



**Figura 21** – Arfagem adimensional simulada *versus* Journée (1992) e Ferreira (2018).

Observa-se que houve uma boa aderência dos dados comparados e corroborando o resultado numérico encontrado por Ferreira (2018), os valores encontrados para  $1,0 \leq \lambda / L \leq 1,25$ , foram inferiores aos dados experimentais de Journée (1992).

A Figura 21 expõe que o resultado simulado da arfagem, neste estudo onde o  $\lambda / L = 0,95$ , também demonstrou uma proximidade maior aos dados experimentais de Journée (1992) se comparado aos dados numéricos de Ferreira (2018).

Ferreira (2018) comenta em seus resultados que quando o comprimento da onda é próximo ao comprimento do navio, essa entra em ressonância com a onda, causando um pico na amplitude da arfagem, conforme também constatado neste estudo.

De acordo com o observado nas Figuras 20 e 21, o modelo computacional desenvolvido conseguiu reproduzir o RAO do afundamento e de arfagem com diferenças aceitáveis em relação aos dados experimentais de Journée (1992) e os dados de numéricos de Ferreira (2018).

A Tabela 6 expõe os resultados numéricos para o RAO do afundamento em adição aos dados de Journée (1992) e Ferreira (2018).

**Tabela 6** – Resultados numéricos adicionais aos dados do experimento de Journée (1992) e dados numéricos de Ferreira (2018) para afundamento.

$Fr = 0,2$	Dados experimentais (JOURNÉE, 1992)	Ferreira (2018)	Resultados numéricos
$\lambda / L$	$Z''$	$Z''$	$Z''$
0,50	0,04	0,04	-
0,60	0,09	0,09	-
0,64	-	-	0,08
0,75	0,25	0,24	-
0,85	0,54	0,48	-
0,90	0,66	0,51	-
0,95	-	-	0,62
1,00	0,70	0,50	-
1,25	0,71	0,53	-
1,27	-	-	0,56
1,50	0,83	0,69	-
1,59	-	-	0,70
1,75	0,88	0,72	-
1,91	-	-	0,75
2,00	0,87	0,72	-
2,22	-	-	0,80
2,54	-	-	0,85

Os dados numéricos de Ferreira (2018) foram idênticos aos dados experimentais de Journée (1992) para  $\lambda / L = 0,50$ ;  $\lambda / L = 0,60$ , para os demais casos houve variação aceitável conforme exposto por Ferreira (2018).

Ao realizar uma comparação dos dados adicionais de  $\lambda / L$  simulados, para esta validação do modelo, com os dados de Journée (1992) mais próximos, constata-se que estes apresentaram melhor concordância que os resultados de Ferreira (2018) para os casos de  $\lambda / L = 0,95$ ;  $\lambda / L = 1,27$ ;  $\lambda / L = 1,59$  e  $\lambda / L = 1,91$ .

Como não há dados disponíveis em Journée (1992) ou Ferreira (2018) para casos onde  $\lambda / L$  é maior que 2,0, optou-se por realizar uma comparação com o valor  $\lambda / L = 2,0$  disponível em Journée (1992) e também se constatou uma boa concordância nos resultados.

As simulações realizadas dos movimentos arfagem são expostos na Tabela 7, a qual demonstra os resultados numéricos para o RAO da arfagem em adição aos dados de Journée (1992) e Ferreira (2018).

**Tabela 7** – Resultados numéricos adicionais aos dados do experimento de Journée (1992) e dados numéricos de Ferreira (2018) para arfagem.

$Fr = 0,2$	Dados experimentais (JOURNÉE, 1992)	Ferreira (2018)	Resultados numéricos
$\lambda / L$	$\theta''$	$\theta''$	$\theta''$
0,50	0,01	0,05	-
0,60	0,05	0,07	-
0,64	-	-	0,07
0,75	0,35	0,33	-
0,85	0,77	0,69	-
0,90	1,07	0,82	-
0,95	-	-	0,91
1,00	1,44	0,81	-
1,25	1,10	0,70	-
1,27	-	-	0,73
1,50	0,83	0,57	-
1,59	-	-	0,59
1,75	0,68	0,55	-
1,91	-	-	0,51
2,00	0,59	0,51	-
2,22	-	-	0,46
2,54	-	-	0,41

Similar ao verificado no afundamento, quando se compara os dados adicionais de  $\lambda / L$  simulados da arfagem, em relação aos dados de Journée (1992) mais próximos, verifica-se que estes apresentaram melhor aderência que os dados obtidos por Ferreira (2018) para os casos de  $\lambda / L = 0,95$ ;  $\lambda / L = 1,27$ ;  $\lambda / L = 1,59$  e  $\lambda / L = 1,91$ .

Por não haver dados de arfagem disponíveis em Journée (1992) ou Ferreira (2018) com o valor  $\lambda / L \geq 2,0$ , novamente, foram comparados os dados disponíveis mais próximos, sendo neste caso o valor  $\lambda / L = 2,0$  de Journée (1992), com o qual também se nota uma boa aderência.

Diante das diferenças entre os comprimentos de onda e de embarcação entre os dados de Journée (1992) e os valores simulados, os dados resultantes apresentaram diferenças aceitáveis para os RAOs calculados.

Entende-se que o propósito de validar o modelo simulado através da verificação de sua convergência e análise comparativa por similaridade dos resultados foi realizado e os parâmetros de comprimento de onda adicionalmente simulados apresentaram diferenças esperadas e aceitáveis. A partir da validação do modelo, foram simulados os parâmetros da Bacia de Campos como objetivo principal deste estudo.

## 4.2. ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE MAR DA BACIA DE CAMPOS

O principal objetivo deste trabalho é apresentar a avaliação das condições de mar da Bacia de Campos e realizar as simulações através de CFD do comportamento do casco *Wigley III* em relação movimentos de afundamento e arfagem.

Com base nos dados da Bacia de Campos expostos na Tabela 1 no Capítulo 2, foram determinados os níveis críticos de cada direção das ondas, tendo sido utilizado a altura significativa (m) - HS, o período da Hs (s) – TPHs e a corrente de superfície (m/s) - U.

O valor do comprimento da onda representado pelo  $\lambda$  (m) exposto na Tabela 8, foi calculado para cada direção de onda tendo como base o período (s) associado à altura significativa de cada onda. A Tabela 8 detalha as condições mais críticas de mar da Bacia de Campos considerando o  $ak$ , ou declividade da onda, de maior valor para cada direção.

**Tabela 8** – Resultados  $aK$  críticos Bacia de Campos para cada direção

Direção da onda	Período de Ocorrência (anos)	$T(s)$	$\lambda (m)$	$H(m)$	$k (m^{-1})$	$a$	$ak$
Sudoeste	1	13,93	302,96	6,37	0,021	3,185	<b>0,066</b>
Sul	100	14,35	321,51	7,10	0,020	3,550	<b>0,069</b>
Leste	100	10,40	168,87	4,87	0,037	2,435	<b>0,091</b>
Oeste-Noroeste	100	8,51	113,07	3,88	0,056	1,940	<b>0,108</b>
Sudeste	10	10,28	165,00	5,72	0,038	2,860	<b>0,109</b>
Nordeste	1	9,13	130,15	4,55	0,048	2,275	<b>0,110</b>
Norte	1	8,81	121,18	4,44	0,052	2,220	<b>0,115</b>

O cenário mais crítico como base no valor resultante do  $ak$  foi o da onda de direção Norte com período de ocorrência de 1 ano, a qual apresenta o período associado (TPHs) igual a 8,81s e altura significativa (Hs) igual 4,44m, sendo o valor de  $ak$  igual a 0,115.

A onda de 1 ano da direção Sudoeste apresenta a menor declividade de onda ( $ak$ ) calculada, tendo sido encontrado o valor de 0,066. Esta onda possui a segunda maior altura significativa e segundo maior período associado, sendo respectivamente,  $H=6,37m$  e  $TPHs=13,93s$ .

A onda de 100 ano da direção Sul possui a maior altura significativa e maior período associado, sendo respectivamente,  $H=7,10m$  e  $TPHs=14,35s$ . A declividade de onda ( $ak$ ) calculada resultou no segundo valor de  $ak$  exposto na Tabela 8 que é igual a 0,069

A Tabela 9 apresenta as características das ondas simuladas e seus respectivos valores de  $aK$ , sendo este o produto entre a amplitude da onda incidente  $a$  e o número de onda  $K$ .

**Tabela 9** - Características das ondas simuladas da Bacia de Campos (em escala reduzida).

$U (m/s)$	$\lambda (m)$	$\lambda / L$	$aK$
1,47	1,90	0,806	0,066
2,06	1,81	0,768	0,069
1,13	1,39	0,588	0,091
1,26	1,17	0,494	0,108
1,62	1,15	0,489	0,109
0,81	1,14	0,485	0,110
1,12	1,09	0,463	0,115

O comprimento de onda  $\lambda$  (m) e a amplitude de onda  $a$  foram redimensionadas para escala reduzida, viabilizando simulação computacional. Similar a premissa assumida por Jorunée (1992) foi definido um valor constante de amplitude de onda, neste caso  $a = 0,04$  e foram alternados os valores de corrente  $U$  (m/s) e comprimento da onda  $\lambda$  (m) para cada direção de onda. As dimensões do casco *Wigley III* foram mantidas as mesmas conforme modelo validado para este estudo, cabendo ressaltar o comprimento  $L = 2,36\text{m}$ .

No tópico 4.1.1. Validação do Modelo pode-se observar que o modelo utilizado neste trabalho apresentou resultados idênticos para os cenários onde o  $\lambda/L$  foram iguais ou inferiores a 0,6 e apresentaram boa concordância nos demais casos  $\lambda/L$  menor que 1. Entende-se, portanto, que este modelo é capaz de realizar as simulações com os parâmetros da Bacia de Campos, pois o maior  $\lambda/L$  calculado para esta foi de 0,81.

#### 4.2.1. Simulações com dados da Bacia de Campos

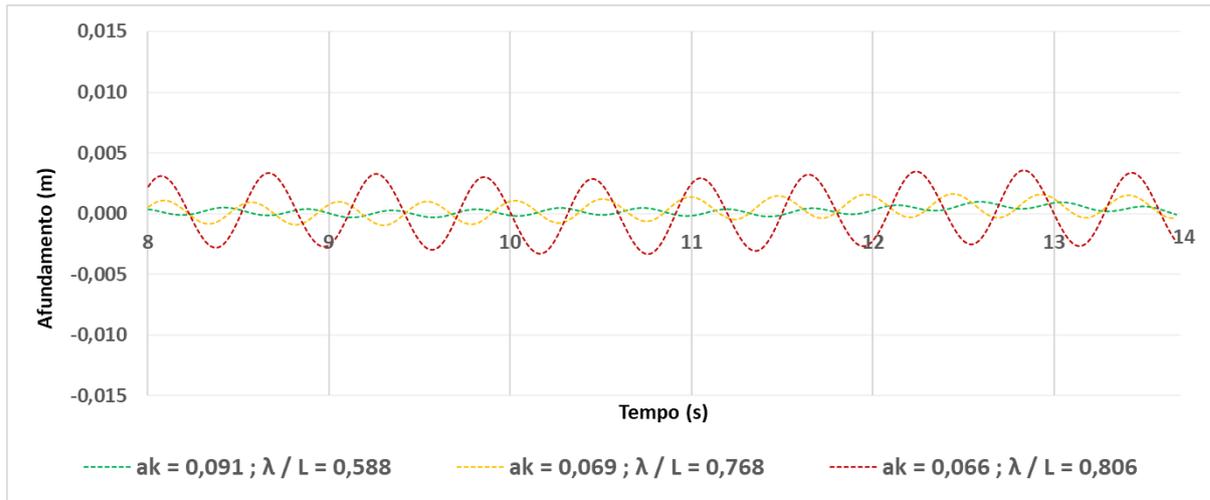
Utilizando a mesma metodologia de avaliação dos gráficos apresentados no tópico 4.1.1. Validação do Modelo, este tópico apresenta os resultados divididos entre os valores de afundamento e arfagem, porém estes também foram separados considerando os resultados do  $aK$  e  $\lambda/L$ .

A razão entre o comprimento de onda e o comprimento do casco em escala reduzida para Bacia de Campos resultaram em valores próximos entre si, portanto, nesta seção o  $\lambda/L$  será abordado com três casas decimais.

O critério de seleção utilizado na determinação do período de interesse foi similar ao utilizado no tópico 4.1.1. Validação do Modelo, portanto, foi selecionado o período entre 8 e 14 segundos como período de interesse pois neste período os resultados não seriam influenciados pelo “transiente” observado nos segundos iniciais da simulação.

##### 4.2.1.1. Afundamento (*Heave*)

A Figura 22 apresenta os cenários com os valores de  $aK \leq 1,0$  e  $\lambda/L \geq 0,5$  agrupados em um mesmo gráfico para comparação.



**Figura 22** – Resultado afundamento  $\lambda / L = 0,588; 0,768; 0,806$

Percebe-se que para o  $\lambda / L = 0,588$  onde o comprimento da onda está acima, contudo, ainda próximo da metade do comprimento da embarcação, a movimentação relativa ao afundamento tende a ser menor, apresentando o valor de pico abaixo de 0,001 metros. Para a simulação do  $\lambda / L = 0,768$  o valor em metros do afundamento ultrapassou 0,001 a partir de 10 segundos. Em ambos os casos 0,588 e 0,768 nota-se um comportamento similar quanto a frequência, pois há a formação de pelo menos 3 picos e 3 vales a cada segundo, sendo os espaçamentos de pico a pico semelhantes.

Para  $\lambda / L = 0,806$ , nota-se uma frequência menor, porém a amplitude do afundamento é consideravelmente maior do que os outros dois  $\lambda / L$  analisados neste grupo. O valor de pico para este  $\lambda / L$  superou 0,003 metros.

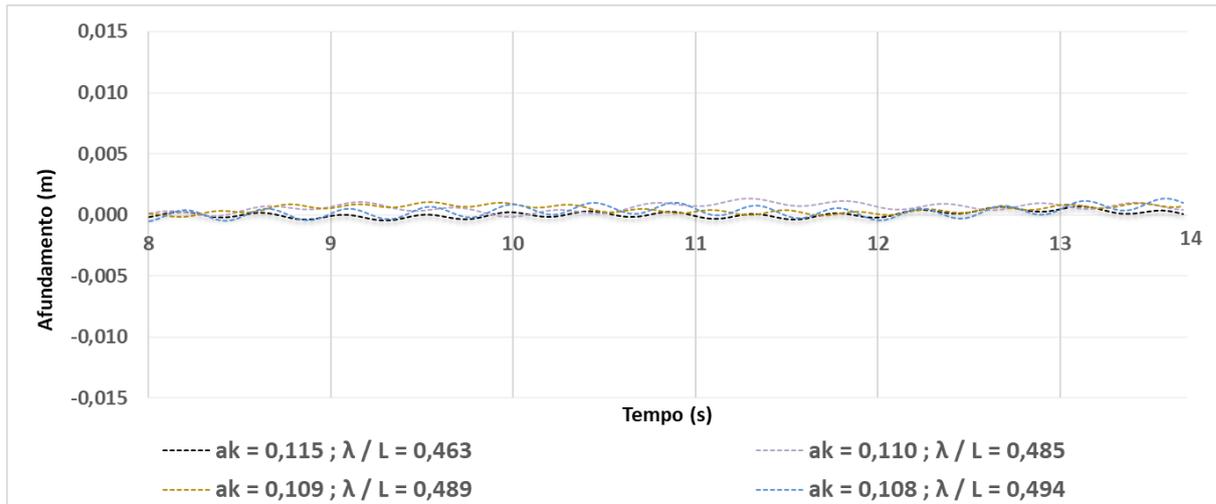
Na Tabela 10 podem ser conferidos os valores calculados do RAO para cada um dos casos simulados de afundamento deste grupo.

**Tabela 10** – RAO das simulações de afundamento  $\lambda / L = 0,588; 0,768; 0,806$

$U$ (m/s)	$\lambda$ (m)	$\lambda / L$	$aK$	Afundamento / $\zeta_a$
1,13	1,39	0,588	0,091	0,032
2,06	1,81	0,768	0,069	0,066
1,47	1,90	0,806	0,066	0,172

Na comparação entre estes três primeiros resultados, percebe-se que a onda da Bacia de Campos que possui a direção Sudoeste e período de ocorrência de 1 ano é a onda com maior valor adimensional resultante de afundamento 0,172.

A Figura 23 apresenta o agrupamento dos cenários onde os valores de  $aK$  foram superiores 0,1 e  $\lambda / L$  menores 0,5.



**Figura 23** – Resultado afundamento  $\lambda / L = 0,463; 0,485; 0,489; 0,494$

Todos os  $\lambda / L$  agrupados no gráfico acima obtiveram valores inferiores a 0,5, ou seja, o comprimento da onda é inferior a metade do comprimento da embarcação, portanto, os valores de afundamento tendem a ser relativamente baixos. Os valores de pico encontrados para estes casos foram em torno 0,001 metros. Há uma significativa diferença entre as frequências apresentadas para cada  $\lambda / L$ , sendo a variação da corrente uma das possíveis influências neste comportamento das ondas.

Como o valor do comprimento destas ondas obteve uma variação pequena, o comportamento exposto na Figura 23 corrobora o resultado esperado para esta simulação. Entre os segundos 12 e 13 percebe-se que três dos quatro casos tiveram os valores de pico a pico semelhantes, exceto para o  $\lambda / L = 0,485$ . Neste último caso o valor de pico foi o maior deste grupo, sendo o único a superar o valor de 0,001 metros.

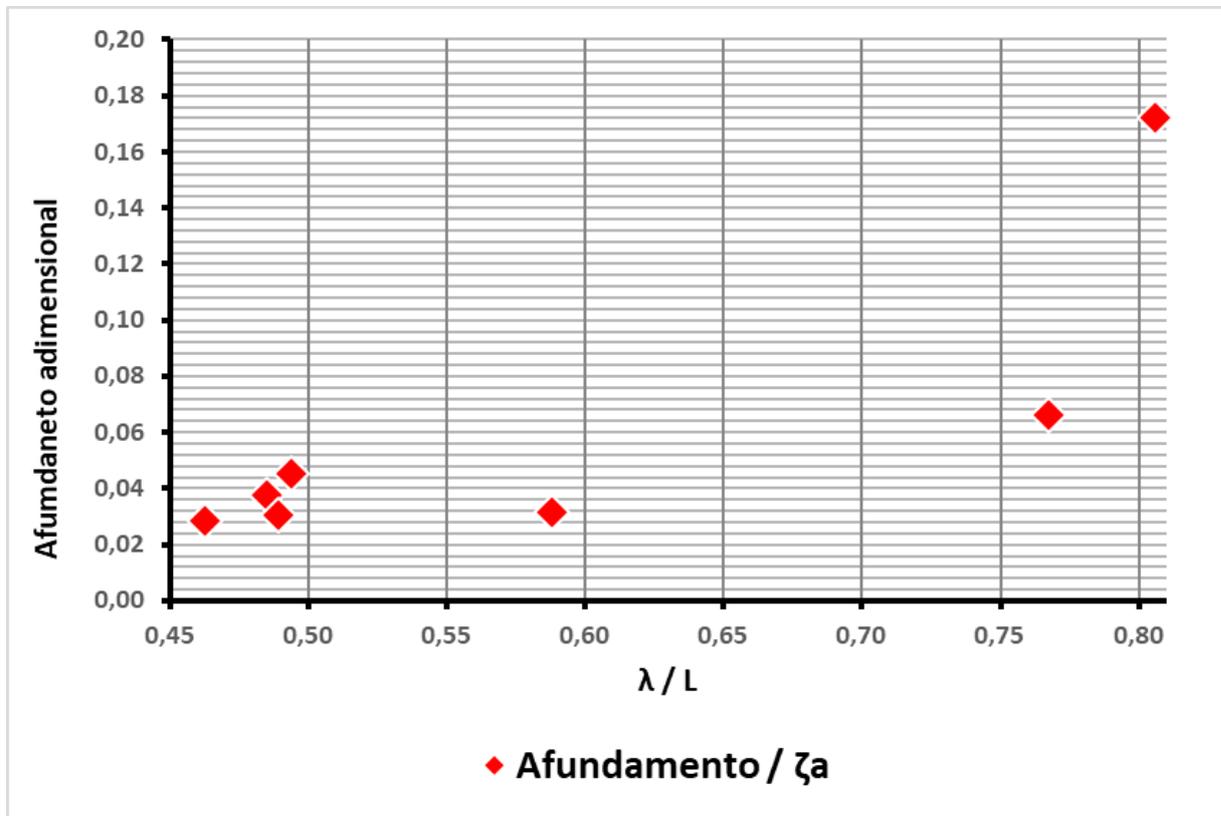
Na Tabela 11 observa-se os respectivos valores de afundamento adimensional para este grupo de simulações.

**Tabela 11** – RAO das simulações de afundamento  $\lambda / L = 0,463; 0,485; 0,489; 0,494$

$U$ (m/s)	$\lambda$ (m)	$\lambda / L$	$aK$	Afundamento / $\zeta_a$
1,12	1,09	0,463	0,115	0,028
0,81	1,14	0,485	0,110	0,037
1,62	1,15	0,489	0,109	0,031
1,26	1,17	0,494	0,108	0,045

Na comparação entre estes quatro resultados, percebe-se que a onda da Bacia de Campos que possui a direção Oeste-Noroeste e período de ocorrência de 100 anos é a onda com maior valor adimensional resultante de afundamento 0,045.

A Figura 24 exibe os dados de RAO de afundamento em relação a  $\lambda / L$  de forma crescente.



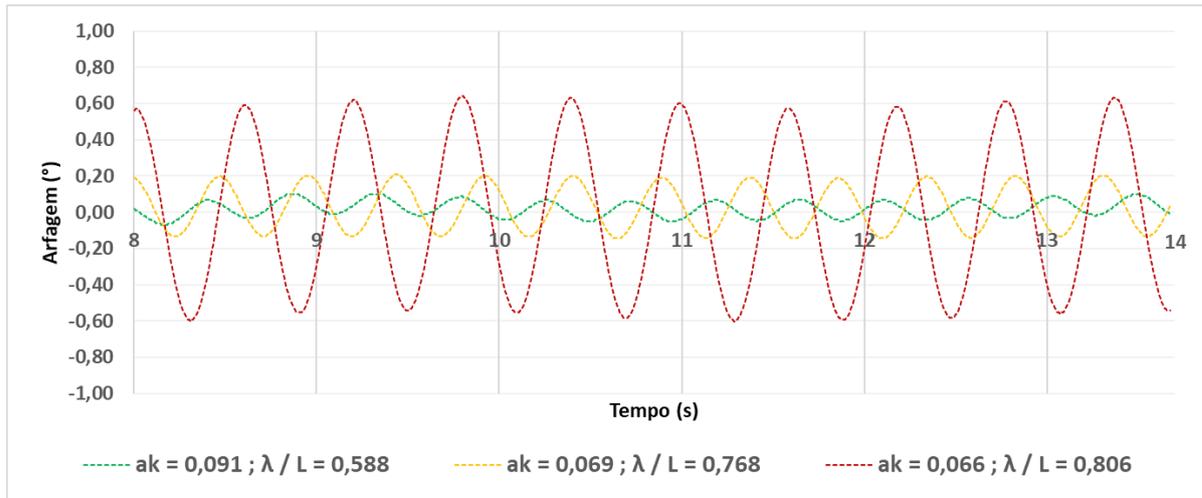
**Figura 24** – Afundamento (*Heave*) adimensional versus  $\lambda / L$

Como observado na Figura 24, o resultado numérico apresentou o mesmo padrão de resposta como o do modelo validado, nos casos onde o  $\lambda / L$  é próximo ou inferior 0,5, o afundamento  $z''$  resultante apresenta um valor próximo de zero. Os quatro primeiros pontos no gráfico são os  $\lambda / L = 0,463; 0,485; 0,489; 0,494$ .

Os valores de  $z''$  para os  $\lambda / L = 0,485; 0,489$  variaram a partir da 3ª casa decimal, o que pode justificar uma não tendência crescente nestes pontos. O maior valor de  $z''$  foi para o  $\lambda / L = 0,806$ , último ponto da curva no gráfico.

#### 4.2.1.2. Arfagem (Pitch)

Os cenários de arfagem com os valores de  $aK \leq 1,0$  e  $\lambda / L \geq 0,5$  são apresentados de forma agrupada em um mesmo gráfico na Figura 25 para efeito de comparação.



**Figura 25** – Resultado arfagem  $\lambda/L = 0,588; 0,768; 0,806$

Os resultados da arfagem para os casos de  $\lambda/L \geq 0,5$  seguiram as mesmas características encontradas no afundamento. O caso mais crítico foi o do  $\lambda/L = 0,806$ , o qual apresentou os maiores resultados de pico de  $\theta$ , em torno  $0,6^\circ$ .

No caso onde o comprimento da onda está próximo da metade do comprimento da embarcação  $\lambda/L = 0,588$ , a movimentação relativa a arfagem também apresentou o menor valor, tendo resultado em  $\theta \approx 0,1^\circ$ . Para o  $\lambda/L = 0,768$  nota-se que o valor do pico das ondas está em torno de  $0,2^\circ$ . Para o  $\lambda/L = 0,806$ , observou-se os valores de arfagem próximos de  $0,6^\circ$ .

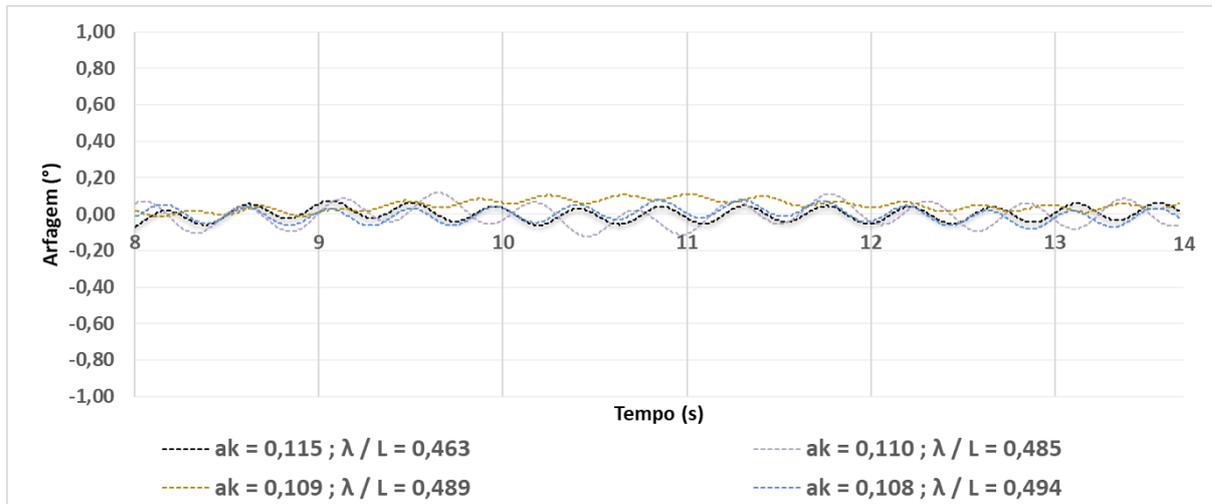
Na Tabela 12 podem ser conferidos os valores resultantes dos cálculos do RAO para cada um dos casos simulados de arfagem.

**Tabela 12** – RAO das simulações de arfagem  $\lambda/L = 0,588; 0,768; 0,806$

$U$ (m/s)	$\lambda$ (m)	$\lambda/L$	$aK$	Arfagem / $\zeta_a$
1,13	1,39	0,588	0,091	0,087
2,06	1,81	0,768	0,069	0,100
1,47	1,90	0,806	0,066	0,402

Na comparação entre estes três primeiros resultados, percebe-se que a onda da Bacia de Campos que possui a direção Sudoeste e período de ocorrência de 1 ano é a onda com maior valor adimensional resultante de arfagem 0,402.

A Figura 23 apresenta o agrupamento dos cenários onde os valores de  $aK$  foram iguais ou superiores a 0,1 e o  $\lambda / L$  menor que 0,5.



**Figura 26** – Resultado arfagem  $\lambda / L = 0,463; 0,485; 0,489; 0,494$

Os demais  $\lambda / L$  expostos no gráfico acima expõem que a embarcação tem baixa reposta relativa a arfagem nas condições de comprimento de onda e de casco simulados. Os valores de pico de  $\theta$  foram abaixo de  $0,2^\circ$  e de vale  $-0,2^\circ$  para todos estes quatro casos simulados. Percebe-se que destes 4 casos simulados, três destes tiveram os valores de pico a pico semelhantes, exceto para  $\lambda / L = 0,489$ , sendo este o único a se aproximar do valor de  $0,2^\circ$ .

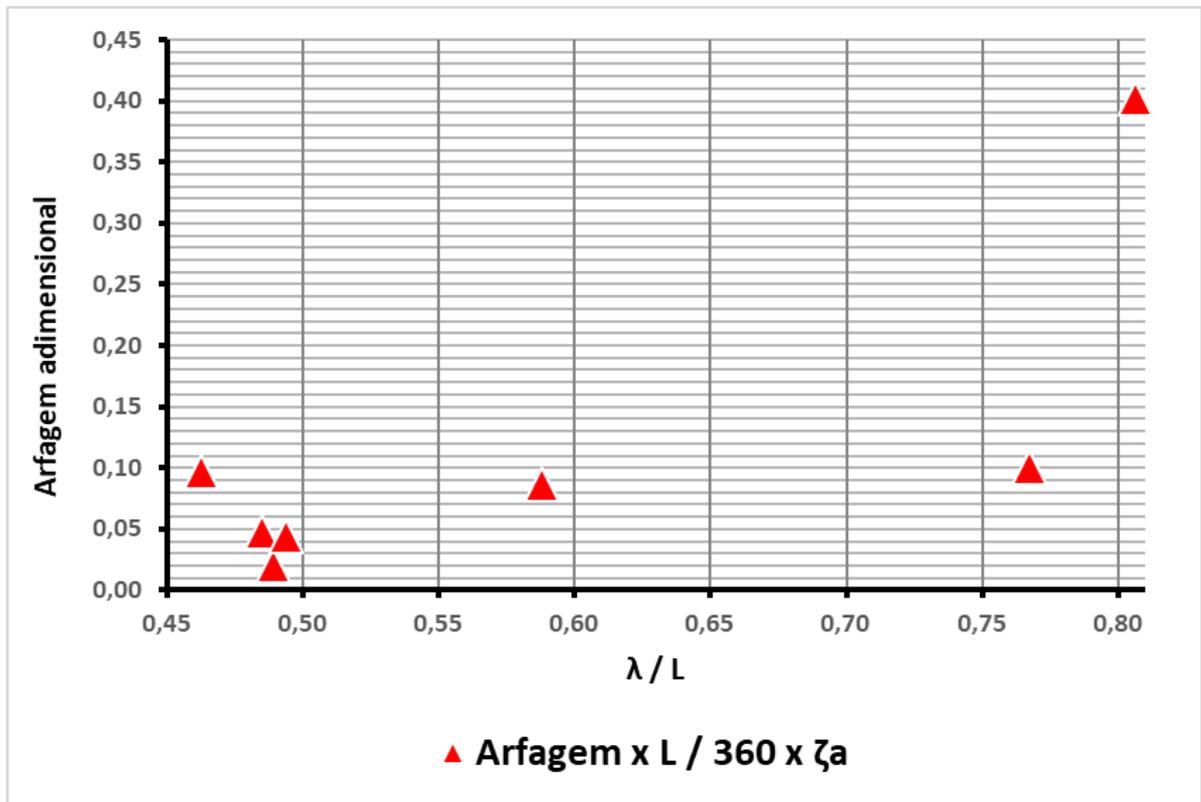
Realizados os cálculos dos RAOs para cada um dos casos simulados, os respectivos valores de arfagem são apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13** – Cálculo do RAO para simulações de  $\lambda / L = 0,463; 0,485; 0,489; 0,494$

$U$ (m/s)	$\lambda$ (m)	$\lambda / L$	$aK$	Arfagem / $\zeta_a$
1,12	1,09	0,463	0,115	0,097
0,81	1,14	0,485	0,110	0,048
1,62	1,15	0,489	0,109	0,020
1,26	1,17	0,494	0,108	0,044

Na comparação entre estes quatro resultados, percebe-se que a onda da Bacia de Campos que possui a direção Norte e período de ocorrência de 1 ano é a onda com maior valor adimensional resultante de afundamento 0,097.

A Figura 27 exibe os dados de RAO de arfagem em relação a  $\lambda / L$  de forma crescente, mantendo as mesmas escalas apresentadas na validação do modelo utilizado para simulação.



**Figura 27** – Arfagem (*Pitch*) adimensional versus  $\lambda / L$

Como observado na Figura 27, o resultado numérico deste trabalho apresentou o mesmo padrão de resposta como do modelo validado, nos casos onde o  $\lambda / L$  é próximo ou inferior 0,5.

A arfagem adimensional para os quatro primeiros pontos no gráfico são os  $\lambda / L = 0,463$ ; 0,485; 0,489; 0,494 foi menor 0,1, e para os três casos de  $\lambda / L \geq 0,5$  houve uma tendência de crescente da curva nestes pontos.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se através de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) os movimentos de afundamento (*heave*) e arfagem (*pitch*) provocados por ondas e correntes da Bacia de Campos para um modelo de casco tipo *Wigley III*.

Os resultados preliminares desta dissertação foram publicados em Moreira *et al.* (2017). O modelo utilizado neste estudo foi simulado com dados adicionais e validados por comparação com os resultados numéricos de Ferreira (2018) e com os dados experimentais divulgados por Journée (1992).

Foram determinados os níveis críticos de períodos e amplitudes de onda para cada direção das ondas da Bacia de Campos, sendo estes simulados em escala reduzida através do *software* de fluidodinâmica computacional ANSYS Fluent 2019. As respostas da embarcação frente às condições de mar foram mensuradas através dos Operadores de Amplitude de Resposta (RAO - *Response Amplitude Operators*). O Método dos Volumes Finitos (MVF) foi empregado para a solução das equações da conservação da massa e de momentum (Reynolds *Averaged* Navier-Stokes), sendo a turbulência representada pelo modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST (*Shear Stress Transport*) e o método de Volume dos Fluidos (VOF) para análise da interface ar-água. Os cálculos e processamentos foram realizados através do código de fluidodinâmica computacional ANSYS Fluent© 19.0, com customizações realizadas via UDF.

Os resultados numéricos deste estudo demonstram que as simulações via CFD podem oferecer uma boa predição dos RAOs distantes de  $\lambda / L < 1,0$ . Casos em que as ondas incidentes têm comprimento menor que o do tamanho do casco  $\lambda / L \leq 0,5$  apresentaram resultados numéricos precisos, tanto para o afundamento quanto da arfagem.

Os estudos experimentais podem se beneficiar dos resultados numéricos, ajudando no dimensionamento do aparato experimental e antevendo possíveis problemas. O desenvolvimento de metodologias de simulação de parâmetros reais em um ambiente virtual é de grande interesse para os projetos de cascos de embarcações, sendo possível avaliar distintos cenários com menor demanda de tempo e de custos. Este trabalho é um exemplo da utilização de dados reais da Bacia de Campos e a aplicação desta metodologia pode ser expandida para realização de estudos sobre as demais regiões do Brasil que também possuem estruturas *offshore* ou relevante tráfego marítimo, como exemplo a Bacia do Espírito Santo, a Bacia de Santos, Bacia de Sergipe, Bacia de Pernambuco-Alagoas, entre outras.

## 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os dados resultantes deste trabalho podem ser utilizados para o desenvolvimento de diversos estudos adicionais, ou, até mesmo, de posse de computadores mais potentes ser aprimorado.

Este estudo oferece dados de entrada relacionados a transferência de energia das forças do mar para o casco de uma embarcação, portanto, os seguintes trabalhos adicionais podem ser realizados:

- Realizar simulações introduzindo todos os demais 4 graus de liberdade neste modelo para avaliar o comportamento do casco;
- Realizar simulações com modelos de cascos de navios convertidos em FPSO;
- Utilizar condições de mar de outras regiões do país;
- Utilizar os dados de saída deste trabalho para o dimensionamento de sistemas de posicionamento dinâmico ou análises relacionadas a navegabilidade das embarcações
- Utilizar os dados de saída deste trabalho para realizar avaliações da transferência dos campos de pressão do casco para o *Topside*, o qual resulta em dados para cálculos estimativos de fadiga nas estruturas.

## 6. REFERÊNCIAS

ANSYS “Tutorial: Heave and pitch simulation of ship hull moving through head sea waves”. pp.1-27. 2011.

ANSYS “Tutorial Guide”, Release 15.0: SAS IP, 2013.

API RP 2Sk “Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures, Third Edition”, 2015.

Bhattacharyya, R. “Dynamics of Marine Vehicles”. 1 ed. New York, John Wiley & Sons Inc. (1978).

Bispo, I. B. S. “Aprimoramento de método para inferência de espectro de ondas a partir de movimentos de sistemas oceânicos” Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

Borodai, I. K.; Netsevvetyayev, Y. A. “Ship motion in Ocean Waves” Sudostroenie, Leningrad, 1969.

Bortoli, A. L. “Introdução à dinâmica de fluidos computacional”. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2000.

Carvalho, J. T. “Simulação da Distribuição De Energia Das Ondas Oceânicas Ao Largo Do Litoral Brasileiro”. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010.

Carvalho, R. C. A. “Influência do Estado de Mar no Coeficiente de Amortecimento do Movimento de Jogo em um FPSO”, Dissertação de Mestrado UFRJ/COPPE, 2011.

CENPES, “Technical Specification - Metocean Data”. PETROBRAS S.A, 2005.

Chakrabarti, S. K. “Laboratory Generated Waves and Wave Theories”, Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 106, 1980.

Chen, S.; Zhong, J.; Sun, P. “Numerical simulation of the Stokes wave for the flow around a ship hull coupled with the VOF model”. J. Marine Sci. Appl., Vol. 14, 2015.

Dalane, E. “Estimation of ALS wave-column impact loads for a semi-submersible and a simplified assessment of the associated structural response”. Dissertação de Mestrado da Universidade de Ciência e Tecnologia da Noruega, 2011.

Damitha, S.; Nihal, K.; Chamath, K.; Remy, R. “A Six Degrees of Freedom Ship Simulation System for Maritime Education”. The International Journal on Advances in ICT for Emerging Regions, 2010.

DNVGL-RP-C203 Prática recomendada “Análise de fadiga em estruturas metálicas offshore”. DNV GL, 2014.

DNVGL-RP-C205 Prática recomendada “Condições ambientais e cargas ambientais”. DNV GL, 2017.

DNV-RP-D101 Prática recomendada “Análise estrutural de sistemas de tubulação”. DNV GL, 2008.

Farrow, D. E.; Tuck, E. O. “Further studies of stern wavemaking”. Journal Austral. Math. Soc., B36, 1995.

Ferreira, G. R. “Análise do afundamento E arfagem de uma embarcação ancorada via fluidodinâmica computacional”. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal Fluminense, 2018.

Froude, W. “On the rolling of ships”. Transactions Institute of Naval Architects - INA, Vol.2, 1861.

Froude, W. “Remarks on Mr. Scott-Russel’s Paper on Rolling”, The Papers of William Froude, Transactions Institute of Naval Architects - INA, no. 4, 1863.

Ghassemi, H.; Majdfar, S.; Gill, V. “Calculations of the Heave and Pitch RAO’s for Three Different Ship’s Hull Forms”. Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace, Vol. 22, 2015.

Grigoropoulos, G. J.; Chalkias, D. S. “Hull-form optimization in calm and rough water”. Computer-Aided Design Vol. 42, 2010.

Hausling, H. J. “Two-dimensional linear and nonlinear stern waves.” Journal of Fluid Mechanics, v.97, 1980.

Hirdaris S. E.; Bai, W.; Dessi, D.; Ergin, A.; Gu, X.; Hermundstad, O.A.; Huijsmans, R.; Iijima, K.; Nielsen, U. D.; Parunov, J.; Fonseca, N.; Papanikolaou, A.; Argyriadis, K.; Incecik, A. "Loads for use in the design of ships and offshore structures". *Ocean Engineering* Vol.78, 2014.

Hirt, C. W.; Nichols, B. D. "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries". *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, 1981.

Journée, J. M. J. "Experiments and calculations on 4 Wigley hull forms in head waves". Delft University of Technology, Netherlands, Vol.0909, 1992

Juvinao, A. J. C. – "Otimização da disposição de linhas de ancoragem utilizando algoritmos genéticos". PUC-Rio, 2005.

Lotsberg I.; Landet E. "Fatigue capacity of side longitudinals in floating structures". *Marine Structures* Vol. 18, 2005.

Kang, Y.; Vanden-Broeck, J.-M. "Stern waves with vorticity". *ANZIAM Journal*, v.43, 2002.

Krylov, A. "A new theory of the pitching motion of ships on waves, and of the stresses produced by this motion", *Transactions Institute of Naval Architects*, Vol. 65, 1896.

Ma, Q. W. e Yan, S. "QALE-FEM Method and Its Application to the Simulation of Free-Responses of Floating Bodies and Overturning Waves." In *Advances in Coastal and Ocean Engineering – Advances in Numerical Simulation of Nonlinear Water Waves*, Ed. Q. Ma, World Scientific Publ., 2010.

Maliska, C. R. "Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional". 2nd ed., LTC, Brazil, 2004.

Menter, F. R, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications". *AIAA journal*, Vol. 32, 1994.

Menter, F. R.; Kuntz, M.; Langtry, R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. In: *4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*, pp. 625-632, 2003

Moreira, R. M., Peregrine, D. H. "Nonlinear Interactions Between a Free Surface Flow with Surface Tension and a Submerged Cylinder". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 648, 2010.

Moreira, R. M.; Mendes, A.; Bachhi, R. D. A. “The Generation and Propagation of Nonlinear Waves in a Reservoir”. ENCIT – XI Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences, 2006.

Moreira, R. M.; Santos, R. E.; Ferreira, G. R.; Bacchi, R. D. A., Filho, S. M. D. R. “Response Amplitude Operators of a Wigley Ship Model via Computational Fluid Dynamics” 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM-2017-1574, Curitiba/PR, 2017.

Nascimento, M. F. “Estudo numérico da propagação para águas rasas de ondas geradas por embarcações”. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Oceânica. COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.

Nakamura, S.; Naito, S. “Propulsive Performance of a Container Ship in Waves”. Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 15. 1977.

Nicolato, P.C.; Moreira R. M. “Numerical modeling of water wave impact on reservoirs”. Proc. 20th Internat. Cong. Mech. Engng., Gramado, pp.1-9, 2009.

Ogilvie, T. F.; Tuck, E. O. “A Rational Strip Theory for Ship Motions”. Department Naval Architects Marine Engineers, University of Michigan, Ann Arbor, Part 1, Report No. 013, 1969.

Petkovic, M. A. L. “Metodologia de Projeto Preliminar de Unidades Flutuantes de Produção de Petróleo”. Tese de Doutorado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.

Plauska, G. C. “Experimento e aprendizagem: Uma aula introdutória à mecânica dos fluidos”. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

Rampazzo, F. P. “Estudo de viabilidade do sistema de ancoragem de uma unidade flutuante de produção e armazenamento FPSO acoplada a um sistema de completação seca TLWP”. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

Rodrigues, S.; Nascimento, M. F.; Fonseca, N.; Santos, J.A.; Neves, C. F. “Numerical simulation study on the propagation of waves generated by vessels using a modified version FUNWAVE”. 6th International Conference on Applied Coastal Research, LNEC, 2013.

Ruggen, F. “A time domain rankine panel method for 2D seakeeping analysis”. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

Salvesen, N.; Tuck, E. O.; Faltisen, O. "Ship motions and sea loads". Transactions Society Naval Architects Marine Engineers, Vol. 78, 1970.

Shigemi, T.; Zhu, T. "Extensive study on the design loads used for strength assessment of tanker and bulk carrier structures". Journal Marine Science Technology Vol. 9, 2004.

Tasai, F. "On the Damping Force and Added Mass of Ships Heaving and Pitching", Journal of Zosen Kiokai, Vol. 105, 1959.

Trinh, P. H., Chapman, S. J.; Vanden-Broeck, J.-M. "Do waveless ships exist? Results for single-cornered hulls". Journal of Fluid Mechanics, v.685, 2011.

Vanden-Broeck, J.-M. "Nonlinear stern waves". J. Fluid Mech., v.96. 1980.

Vossers, G.; Swaan, W.A.; Rijken, H. "Experiments with Series 60 models in waves". Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1960.

Weymouth, G.D.; Wilson, R.V.; Stern, F. "RANS Computational Fluid Dynamics Predictions of Pitch and Heave Ship Motions in Head Seas". Journal of Ship Research, Vol. 49, No. 2, 2005.

Yan, J.; Pan D.; Zhou, X.; He, K. "The Prediction of Ship Motions and Added Resistance based on RANS". 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2015.

Zhang Z, "Verification and validation for RANS simulation of KCS container ship without/with propeller". Journal of Hydrodynamics, Vol. 22, 2010.

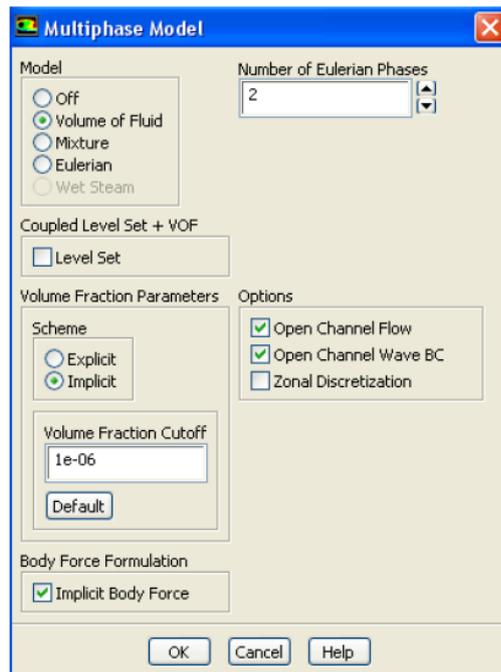
Zhu R.; Yang C.; Miao G.; Fan J. "Computational Fluid Dynamics Uncertainty Analysis for Simulations of Roll Motions for a 3D Ship". Journal Shanghai Jiaotong University, Vol. 20, 2015.

## 7. APÊNDICES

### 7.1. PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES NO ANSYS FLUENT©

O correto lançamento do problema no *software* é fundamental para que o resultado obtido reflita os dados utilizados no estudo. A título didático, as principais configurações realizadas no *software* seguem detalhadas.

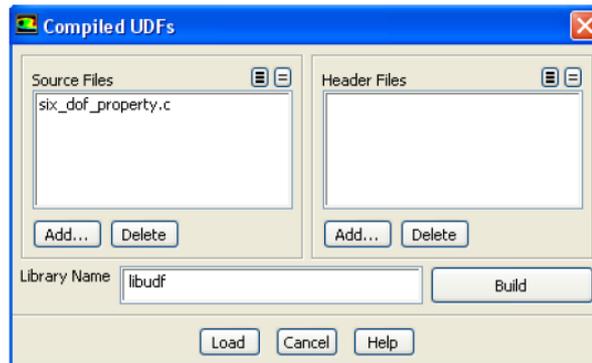
- ✓ Definição do sistema multifásico



**Figura 28** – Definição do sistema multifásico.

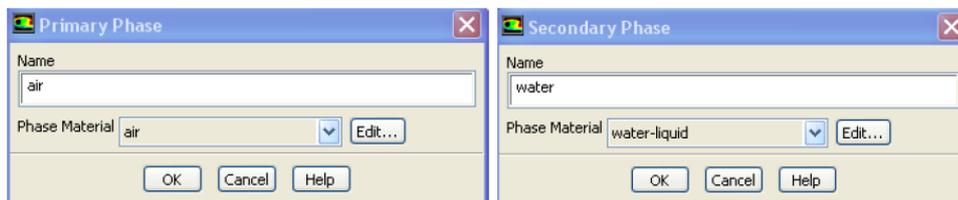
Fonte: Autor

- ✓ Inserção da UDF limitando a simulação para o Afundamento e Arfagem



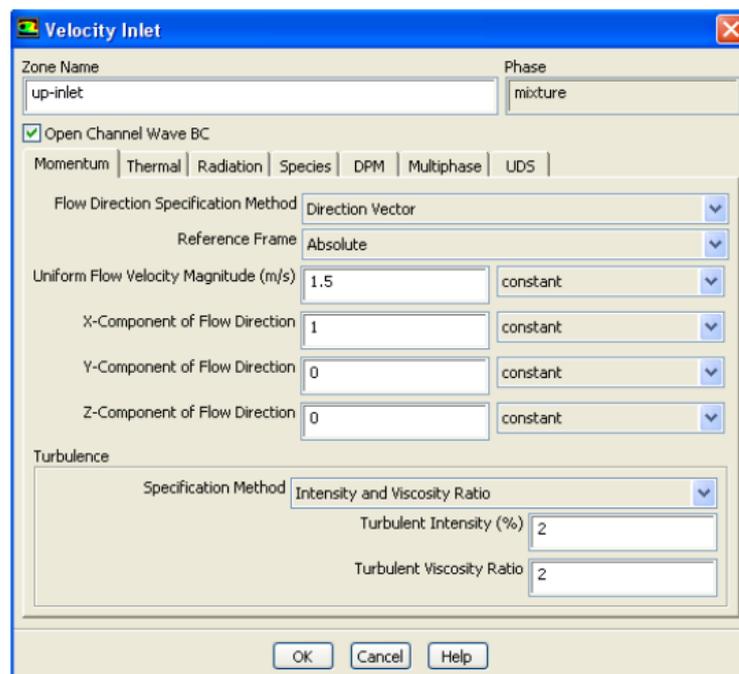
**Figura 29** – Inserção UDF

- ✓ Definição das fases da água e do ar



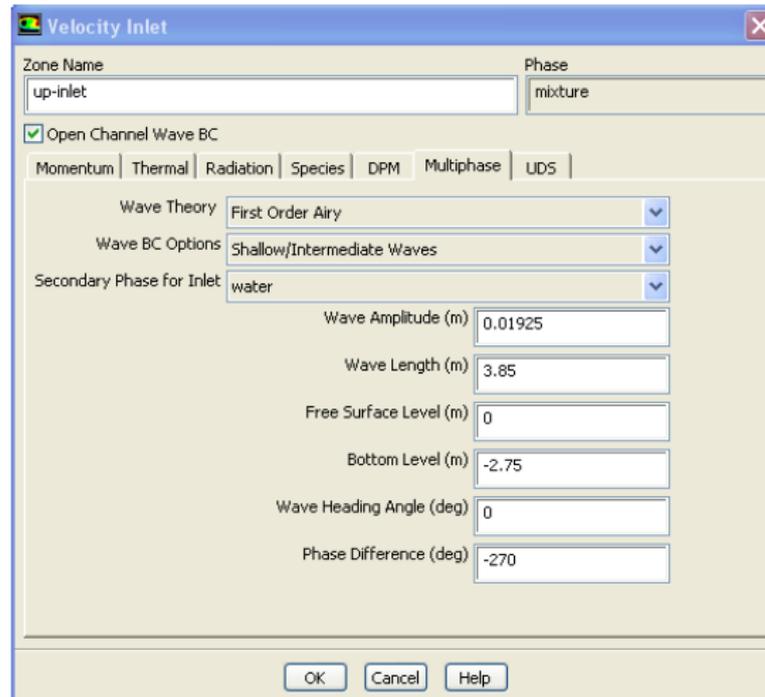
**Figura 30** – Fases da água e do ar

- ✓ Inserção da velocidade e da direção do fluxo



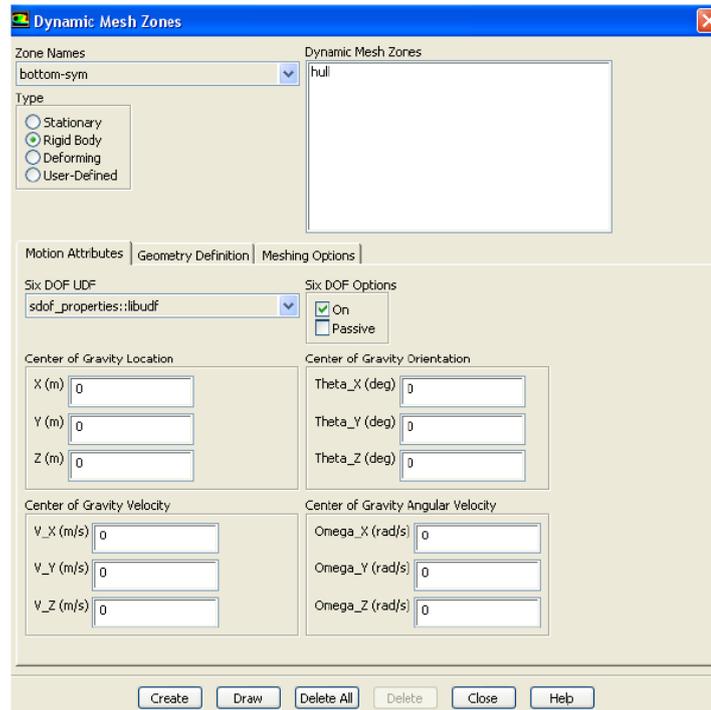
**Figura 31** – Fases da água e do ar.

- ✓ Inserção da amplitude de onda, altura de onda



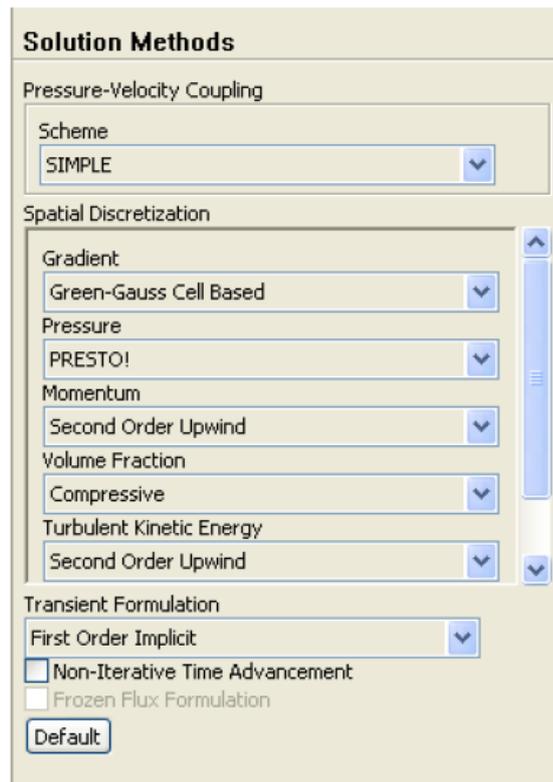
**Figura 32** – Amplitude e altura de onda

- ✓ Definição dos dados das zonas da malha dinâmica



**Figura 33** – Malha dinâmica

- ✓ Definição dos métodos para solução



**Figura 34** – Métodos para solução.

## 7.2. CONFIGURAÇÃO DA UDF

```

/*****
SDOF property compiled UDF with external forces/moments
*****/
#include "udf.h"

DEFINE_SDOF_PROPERTIES(s dof_properties, prop, dt, time, dtime)
{
    prop[SDOF_MASS]    = 36.5323;
    prop[SDOF_IXX]    = 0.306272;
    prop[SDOF_IYY]    = 10.4112;
    prop[SDOF_IZZ]    = 10.3074;

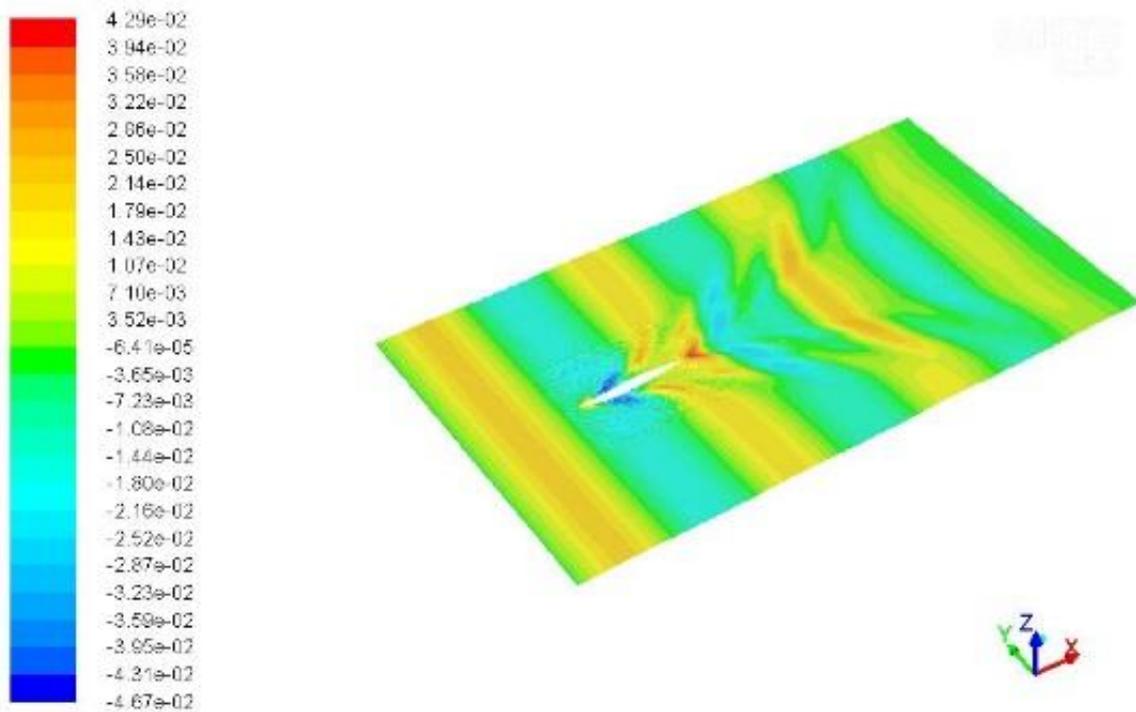
    prop[SDOF_ZERO_TRANS_X] = TRUE;
    prop[SDOF_ZERO_TRANS_Y] = TRUE;
    prop[SDOF_ZERO_ROT_X] = TRUE;
    prop[SDOF_ZERO_ROT_Z] = TRUE;
    printf ("\n updated 6DOF properties");
}

```

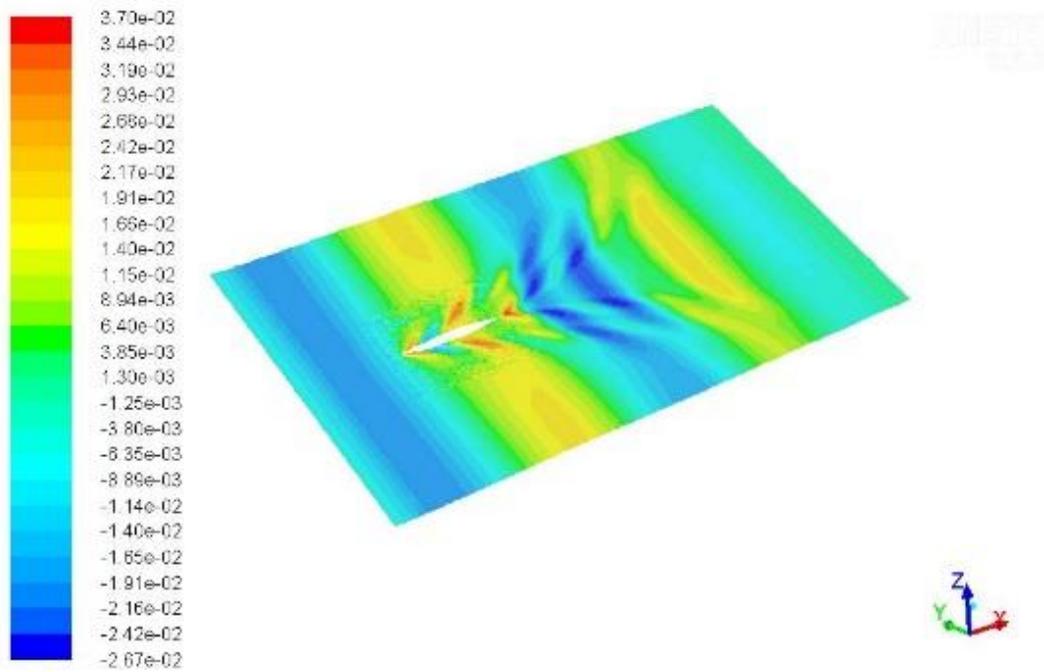
### 7.3. OUTRAS FIGURAS EXTRAÍDAS DO *SOFTWARE* ANSYS FLUENT©



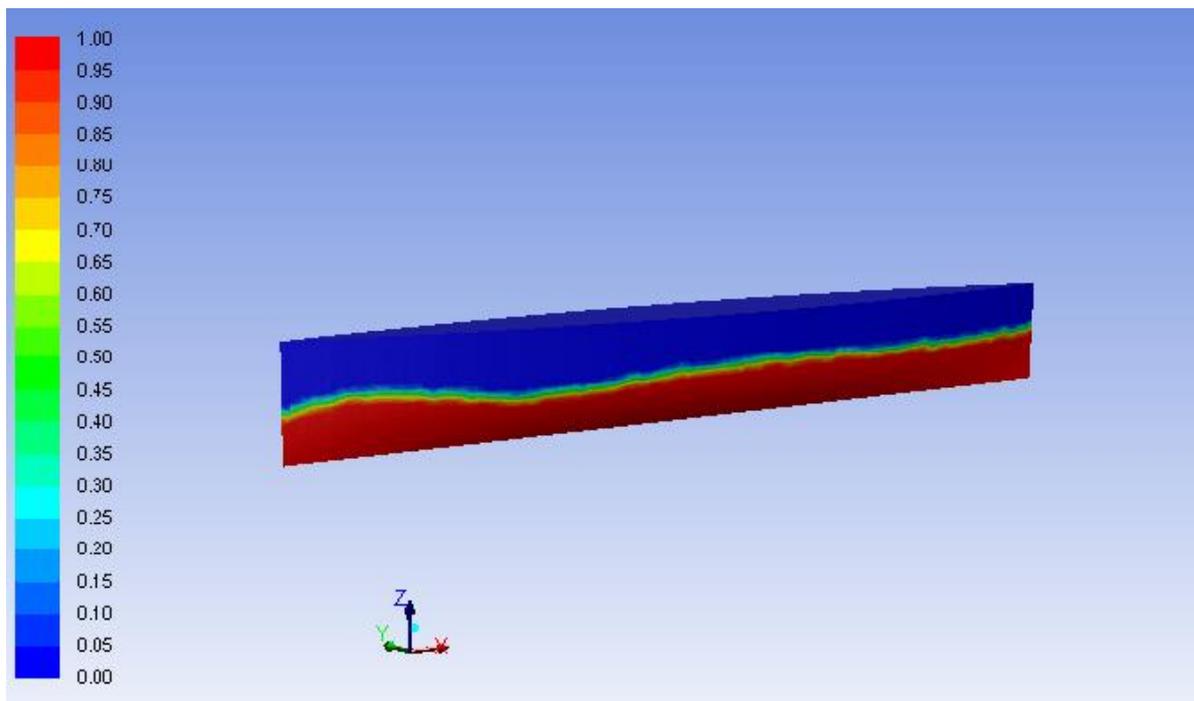
**Figura 35** – Perfil de elevação da onda, exemplo de imagem extraída de uma das simulações da validação do modelo.



**Figura 36** – Perfil de elevação da onda, exemplo de imagem extraída de uma das simulações da validação do modelo.



**Figura 37** – Perfil de elevação da onda, exemplo de imagem extraída de uma das simulações da validação do modelo.



**Figura 38** – Perfil do comportamento da linha água em relação ao casco, exemplo de imagem extraída de uma das simulações da validação do modelo