

EFEITOS DA NAVEGAÇÃO EM CALADO RESTRITO DE UMA EMBARCAÇÃO DE ALTO DESEMPENHO

Juliana Patricia Esquivel Pérez Barreiros

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Co-orientador: Mojtaba Maali Amiri

Rio de Janeiro

Outubro de 2025

EFEITOS DA NAVEGAÇÃO EM CALADO RESTRITO DE UMA EMBARCAÇÃO
DE ALTO DESEMPENHO

Juliana Patricia Esquivel Pérez Barreiros

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Orientador: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Co-orientador: Mojtaba Maali Amiri

Aprovada por: Prof. Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Prof. Mojtaba Maali Amiri

Prof. Carlos Antônio Levi da Conceição

Prof. Carl Horst Albrecht

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2025

Barreiros, Juliana Patricia Esquivel Pérez

Efeitos da Navegação em Calado Restrito de uma Embarcação de Alto Desempenho/Juliana Patricia Esquivel Pérez Barreiros. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2025.

IX, 63 p.: il; 29,7 cm

Orientador: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Co-orientador: Mojtaba Maali Amiri

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 45 – 46.

1. Squat. 2. Águas Rasas. 3. Resistência ao Avanço.
4. CFD Computational Fluid Dynamics 3.
Hidrodinâmica I. Esperança, Paulo de Tarso Themistocles. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Às minhas amadas filhas e às
mulheres inspiradoras que
abriram caminhos e tornaram
possível a minha trajetória até
aqui.

*“A educação é o poder das
mulheres”* – Malala Yousafzai

Agradecimentos

A Deus, por me fortalecer e sustentar nos momentos mais desafiadores.

Às minhas maravilhosas filhas, que, mesmo tão pequenas, compreenderam minhas ausências, me incentivaram e foram minha maior inspiração para concluir este trabalho.

Ao Bruno, meu amado marido, pelo apoio incondicional, pelos conselhos, torcida e encorajamento durante esta trajetória.

À minha querida família, minha rede de apoio que me trouxe a serenidade necessária, sempre com amor, paciência e disponibilidade.

Ao estimado orientador, Professor Paulo de Tarso, por me acolher com serenidade durante as idas e vindas desta pesquisa, por seu olhar técnico preciso e, ao mesmo tempo, empático diante das minhas múltiplas atribuições pessoais e profissionais.

Ao generoso Professor Mojtaba, por compartilhar comigo não apenas seu vasto conhecimento, mas também seu tempo, bom humor e dedicação, apoio sem o qual esta conquista não seria possível.

Ao Professor Levi, pelas observações fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, e aos colegas mestrandos e doutorandos, pelas contribuições e trocas valiosas em nossos encontros semanais.

À amável Lucianita, sempre disposta a ajudar os alunos com gentileza e prontidão.

Aos meus incríveis amigos, que me impulsionaram e acreditaram em mim.

À Marinha do Brasil, pela oportunidade de realizar este mestrado, e aos colegas de farda, pelo apoio técnico, pela flexibilidade e pela vibração em cada etapa vencida.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

EFEITOS DA NAVEGAÇÃO EM CALADO RESTRITO DE UMA EMBARCAÇÃO DE ALTO DESEMPENHO

Juliana Patricia Esquivel Pérez Barreiros

Outubro/2025

Orientador: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Co-orientador: Mojtaba Maali Amiri

Programa: Engenharia Oceânica

A navegação em águas rasas impõe desafios hidrodinâmicos significativos ao desempenho e à segurança de embarcações de alto desempenho, como lanchas de patrulha e veículos de superfície não tripulados. A interação entre o casco e o fundo, e o sistema de ondas gerado, altera parâmetros como resistência ao avanço, trim e afundamento. Este trabalho analisou, por meio de simulação numérica, os efeitos da profundidade limitada sobre o comportamento de um casco de planeio, utilizando a embarcação-tipo Generic Prismatic Planing Hull (GPPH) como modelo de estudo. Empregou-se o método de Savitsky para estimativas empíricas e comparação com o software STAR-CCM+ para a solução das equações de Navier–Stokes via CFD, com abordagem RANS, modelo de turbulência $k-\epsilon$, técnica Volume of Fluid (VOF) e malha overset. As simulações foram conduzidas para profundidades de 10 m, 5 m, 2,5 m e 1,0 m, mantendo a velocidade a 3,88 m/s. Os resultados indicaram variações moderadas de afundamento e trim, e comportamento não linear da resistência (leve aumento em profundidades intermediárias e redução quando a relação número de Froude em função da profundidade (F_h) ultrapassa o regime crítico). A comparação entre os métodos de Savitsky e CFD apresentou boa concordância, com diferenças inferiores a 4% na resistência total e 1% no trim. Além disso, foi notada redução do ângulo aparente de Kelvin, em relação às ondas formadas em regime abaixo do supercrítico. Os resultados confirmam que, em regimes supercríticos, embarcações de planeio tendem a apresentar redução de resistência em águas rasas, evidenciando a necessidade de considerar tais efeitos na fase de projeto e nas normas de operação em calado restrito.

EFFECTS OF SHALLOW WATER NAVIGATION ON A HIGH-PERFORMANCE VESSEL

Juliana Patricia Esquivel Pérez Barreiros

Outubro/2025

Advisor: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Co-Advisor: Mojtaba Maali Amiri

Department: Ocean Engineering

Navigation in shallow waters imposes significant hydrodynamic challenges on the performance and safety of high-speed vessels, such as patrol craft and unmanned surface vehicles. The interaction between the hull and the seabed, as well as the generated wave system, alters parameters such as resistance, trim, and sinkage. This study analyzes, through numerical simulation, the effects of limited depth on the behavior of a planing hull, using the *Generic Prismatic Planing Hull (GPPH)* as a reference model. The Savitsky method is employed for semi-empirical estimations and compared with results obtained in the CFD commercial code STAR-CCM+. The turbulent flow motion is modeled utilizing the unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) with $k-\epsilon$ turbulence model. Moreover, to capture the free surface together with the vessel two-degrees-of-freedom motions in heave and pitch directions, *Volume of Fluid (VOF)* technique and *overset* mesh are employed, respectively. Simulations are carried out for depths of 10 m, 5 m, 2.5 m, and 1.0 m, maintaining the velocity at 3,88 m/s. The results indicate moderate variations in sinkage and trim, and a nonlinear resistance behavior: a slight increase at intermediate depths and a reduction when the depth-based Froude number exceeded the critical regime. The comparison between Savitsky and CFD methods shows good agreement, with differences below 4% in total resistance and 1% in trim. In addition, a reduction in the Kelvin wave angle is observed when compared to waves formed below the supercritical regime. The results confirmed that, in supercritical regimes, planing vessels exhibit reduced resistance in shallow waters, highlighting the importance of considering such effects in the design phase and in operational standards for restricted-draft navigation.

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
1 Introdução.....	1
1.1.1 Efeito Squat	4
1.1.2 Ondas de Kelvin	5
1.2 Revisão Bibliográfica	8
1.2.1 Ensaios Experimentais	9
1.2.2 Métodos Semi-empíricos.....	11
1.2.3 Ferramentas Computacionais	14
1.3 Objetivo	16
1.3.1 Organização da dissertação.....	16
2 Método.....	18
2.1 Método de Savitsky.....	18
2.2 Computational Fluid Dynamics (CFD)	20
2.2.1 Equações Governantes	21
2.2.2 Modelo VOF	21
2.2.3 Modelo de Turbulência	22
2.2.4 Malha Adaptativa.....	25
2.2.5 Malha Overset	25
3 Simulação Computacional	27
3.1 Geometria.....	27
3.2 Condições computacionais	29
3.3 Domínio Computacional e Condições de Contorno	30
3.4 Passo de tempo	34
3.5 Geração da Malha	36
4 Resultados e Discussões.....	39
4.1 Comparação com método empírico	43
4.2 Ondas de Kelvin	45
5 Conclusão e Trabalhos Futuros.....	48
6 Referências	49

Lista de Figuras

Figura 1-Efeito Squat	4
Figura 2-Ondas geradas por uma embarcação (SOUZA, 2010)	5
Figura 3-Ondas geradas por um pato (MAVER, 2004).....	6
Figura 4-Padrão de Ondas de Kelvin (FALTINSEN, 2006).....	7
Figura 5-Lancha em água rasas em regime supercrítico (FALTINSEN, 2006)	8
Figura 6-Disponibilidade de laboratórios com tanque de reboque em águas rasas	11
Figura 7-Parâmetros de Savitsky (Adaptado de RICCIARDO,(2010))	19
Figura 8-Y+ Pupa	24
Figura 9-Y+ Proa.....	25
Figura 10-Background em verde, overset em rosa e casco em amarelo (imagem feita pela autora).....	26
Figura 11-Overset (imagem feita pela autora).....	26
Figura 12-Plano de Linhas GPPH (JUDGEA,2020)	27
Figura 13-Geometria no software Rhinoceros (imagem feita pela autora)	28
Figura 14-Geometria no software Star CCM+ (imagem feita pela autora).....	28
Figura 15-Graus de liberdade (FELIX, 2014)	29
Figura 16-Modelo livre em heave e pitch (imagem feita pela autora)	30
Figura 17-Domínio para águas profundas (imagem feita pela autora).....	31
Figura 18-Regiões de fronteira (imagem feita pela autora)	33
Figura 19-Variação de profundidade do domínio (imagem feita pela autora)	34
Figura 20-Configuração CFL no StarCCM+	35
Figura 21-Courant Number	35
Figura 22-Malha.....	39
Figura 23-Resistência em função da velocidade e profundidade	40
Figura 24-Gráficos de resultados para águas profundas, intermediárias e águas rasas .	42
Figura 25-Estimativa de trim por Savitsky	44
Figura 26-Estimativa de resistência ao avanço por Savitsky	44
Figura 27-Profundidade 10 metros, Fnh 0,39	45
Figura 28-Profundidade 5 metros, Fnh 0,55	46
Figura 29-Profundidade 2,5 metros, Fnh 0,78.....	46
Figura 30-Profundidade 1 metro, Fnh 1,24.....	47
Figura 31-Gráfico Kelvin Angle e Narrow Angle	47

Lista de Tabelas

Tabela 1-Métodos empíricos e semi-empíricos	14
Tabela 2-Características GPPH (WANG, 2025).....	27
Tabela 3-Características físicas da simulação	29
Tabela 4-Classificação águas rasas segundo relação da dispersão (DEAN et al. (1991)), onde d é a profundidade.....	32
Tabela 5-Parâmetros camada limite.....	38
Tabela 6-Características da malha	39
Tabela 7-Resultados para águas profundas e águas rasas.....	41
Tabela 8-Diferença dos resultados entre profundidades de 10 metros e 1 metro	42
Tabela 9-Comparação entre método CFD e Savitsky.....	43

1 Introdução

A navegação fluvial tem importância significativa em diversas áreas, tais como o transporte de cargas e pessoas, uma vez que os rios oferecem rotas de transporte eficientes e econômicas, acesso a áreas remotas permitindo o fornecimento de bens e serviços essenciais para a população ribeirinha e têm um papel significativo na área de esporte e recreio.

O desempenho e a segurança de manobra das embarcações são influenciados significativamente pelas condições de navegação. Uma dessas condições é a operação em condições de águas rasas, como pode ocorrer em rios, canais ou áreas costeiras. A redução da profundidade e, em alguns casos, também da largura disponível para o escoamento em torno do casco, altera consideravelmente o escoamento ao redor do casco, afetando parâmetros hidrodinâmicos importantes como resistência ao avanço, trim, afundamento e características de manobrabilidade. Em águas rasas, a resistência ao avanço pode se alterar devido ao aumento da velocidade do escoamento provocado pelo estreitamento da área de vazão entre o casco e o fundo e/ou paredes, alterando também, por efeito de águas rasas, o sistema de ondas gerado pelo casco que consequentemente pode resultar na alteração de trim e afundamento do casco. Já a manobrabilidade pode ser reduzida pela menor capacidade de resposta do leme, tornando a manobra mais difícil e exigindo maior atenção por parte da tripulação.

A importância da Marinha do Brasil - MB na segurança do tráfego aquaviário se reflete no aumento do número de embarcações registradas nos últimos anos, que demandou mais ações de fiscalização e normatização da MB. Em 2020, o total de embarcações registradas saltou de 687.885 para 992.697, um acréscimo de quase 45% (Diretoria de Portos e Costas, 2020). Com o crescimento expressivo da frota nacional, especialmente em regiões de águas rasas, aumentam os riscos de incidentes e a necessidade de normas específicas para garantir a segurança e eficiência da navegação.

Por outro lado, atividades ilegais configuram-se como ameaças relevantes, tanto pelo enfraquecimento da economia, decorrente de práticas como a pesca ilegal e não regulamentada, o contrabando e a pirataria, quanto pelos impactos sociais, que incluem riscos à salvaguarda da vida humana em vias fluviais, a intensificação da poluição hídrica e o comprometimento dos ecossistemas aquáticos.

Em regiões de difícil acesso, mas nas quais a presença do Estado se mostra imprescindível, as lanchas de emprego rápido assumem papel estratégico de grande relevância. Devido à sua elevada capacidade de mobilidade e velocidade, esses meios constituem instrumentos adequados para a contenção e o enfrentamento das múltiplas ameaças que se apresentam nesse contexto operacional.

Adicionalmente, observa-se a crescente utilização de embarcações de pequeno porte e alto desempenho como Veículos de Superfície Não Tripulados (VSNTs). Essa

tecnologia, tem sido progressivamente incorporada em diferentes áreas da defesa marítima, abrangendo desde atividades de vigilância costeira até operações de varredura e ações relacionadas à guerra de minas.

Diante desse cenário, evidencia-se a necessidade de atender a demandas operacionais em que o fator tempo é determinante para o êxito da missão. A concretização desses objetivos impõe a utilização de embarcações com capacidade de desenvolver altas velocidades. Contudo, tal requisito enfrenta limitações impostas pelas características específicas das hidrovias, cujas condições de navegabilidade variam em função da profundidade, da sazonalidade e da natureza do leito.

O comportamento hidrodinâmico de uma embarcação em águas profundas difere substancialmente daquele observado em águas rasas, em virtude da modificação da distribuição de pressões ao redor do casco, influenciada pela proximidade do fundo.

Apesar dos avanços obtidos nas normas internacionais de segurança da navegação, a mitigação de riscos associados a colisões e encalhes permanece um desafio. Tais ocorrências não decorrem exclusivamente de falhas humanas, mas também de fenômenos físicos que, em muitos casos, ainda não foram suficientemente investigados ou devidamente previstos na fase de projeto da embarcação.

Considerando que qualquer embarcação está sujeita a operar em águas rasas em diversos momentos de sua vida útil, como durante manobras de entrada e saída de portos ou em regiões influenciadas pela variação de maré, torna-se importante o estudo da hidrodinâmica do navio nessas condições. Tal investigação é relevante não apenas para a segurança da navegação, mas também para a concepção e manutenção de infraestruturas portuárias. Além disso, o estudo do comportamento hidrodinâmico em águas rasas é capaz de fornecer subsídios técnicos ao desenvolvimento de simulações computacionais e desenvolvimento de métodos semi-empíricos na engenharia naval.

Embora o fenômeno do squat (alteração de trim, calado e resistência ao avanço) seja conhecido na prática, sua investigação tem adquirido crescente relevância nos últimos anos, em razão da necessidade de se compreender, com maior precisão, a extensão dos efeitos hidrodinâmicos associados. Em embarcações de deslocamento, por exemplo, a influência de águas rasas pode levar ao aumento do calado aparente, à alteração do trim e, conseqüentemente, ao acréscimo da resistência ao avanço. Por outro lado, em cascos de planeio, quando o número de Froude definido em relação à profundidade da lâmina d'água (F_{nh}) supera o valor crítico de 1,0, observa-se efeito oposto: a alteração de trim pode vir acompanhada de redução do deslocamento, o que resulta, por sua vez, na diminuição da resistência ao avanço RADOJCIC *et al.* (2010), devido a redução da área molhada.

Adicionalmente, a propagação das ondas geradas (ondas de Kelvin) em água rasas, podem impactar o ambiente costeiro. Entre os efeitos associados às operações em condições de águas rasas, destacam-se, portanto, pelas suas potenciais conseqüências: o afundamento do casco (deslocamento vertical), a variação do seu trim, a variação da

resistência ao avanço e também a redução da manobrabilidade da embarcação. O estudo desses fenômenos visa aprimorar a capacidade preditiva, de modo a reduzir a probabilidade de acidentes durante operações em águas rasas.

1.1 Contextualização

Este capítulo apresenta um panorama geral dos principais fenômenos físicos associados ao desempenho hidrodinâmico de embarcações de alta velocidade em águas rasas. Entre esses efeitos, destacam-se as alterações de trim e/ou do calado, bem como a geração de ondas, a qual influencia diretamente o comportamento da embarcação (Havelock, 1908).

O conhecimento consolidado sobre os efeitos de águas rasas ainda é limitado, sendo que aproximadamente 90% dos acidentes marítimos ocorrem em águas restritas. Esses dados evidenciam lacunas tanto na regulamentação quanto na literatura técnica, destacando a importância de considerar esses efeitos na fase de projeto da embarcação (Gould et al., 2006), e na delimitação operacional em regiões portuárias.

Portanto, a investigação dos efeitos hidrodinâmicos em águas rasas e restritas é de grande relevância. Compreender esses fenômenos é fundamental não apenas para a segurança da navegação, mas também para apoiar a concepção de projetos navais, a operação em portos e canais, o desenvolvimento de simulações e modelos de treinamento de profissionais náuticos, e a formulação de diretrizes para reduzir riscos ambientais e econômicos associados à navegação em águas restritas.

1.1.1 Efeito Squat

O fenômeno "squat" em navios é um efeito hidrodinâmico que ocorre quando uma embarcação se move em águas rasas, profundidade limitada ou bancos de areia. Ele se manifesta como um afundamento temporário do navio, quando ele se desloca em regiões de redução de profundidade, acompanhado muitas vezes por uma mudança no trim e/ou alteração de calado do casco.

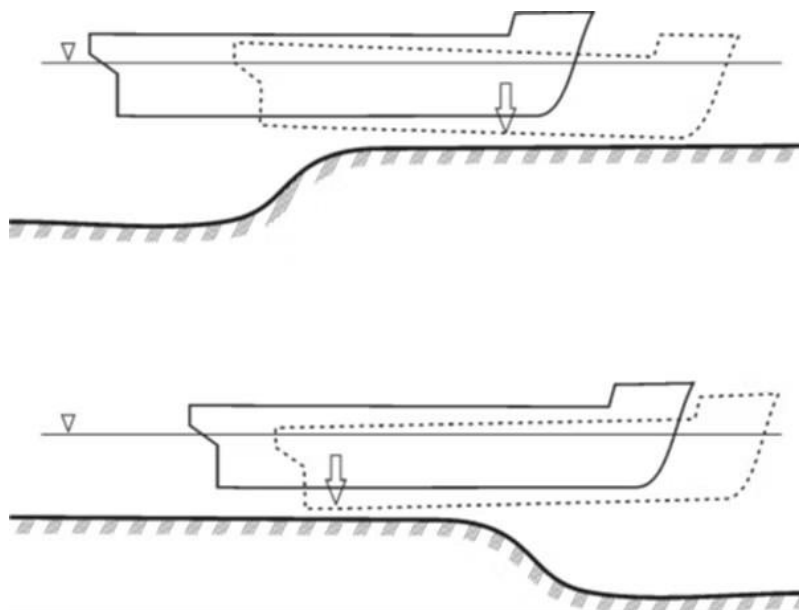


Figura 1-Efeito Squat

A condução de embarcações em águas rasas e restritas exige conhecimento operacional específico na área de atuação. Alguns fatores contribuem para esta complexidade, tais como proximidade com outras embarcações, objetos como troncos de árvores que ficam mais aparentes de acordo com a estação do ano, espaço limitado de manobra e redução de velocidade, que resulta em aumento do efeito de vento, ondas e correntes, e alterações na manobrabilidade do navio (Duarte et al., 2016), devido a redução de velocidade de avanço.

Segundo FAHRNHOLZ (2024), os efeitos de água rasa no fundo rígido de uma embarcação de deslocamento, tornam-se significativos quando a razão entre a lâmina d'água e o calado da embarcação é inferior a 1,5. Nessa condição, há um aumento da velocidade do escoamento entre a quilha e o solo, devido à redução de seção disponível para o fluxo. Como consequência, desenvolve-se uma região de baixa pressão sob a quilha, que pode dar origem à mudança de trim e/ou afundamento do casco.

A relação entre a velocidade do escoamento e a variação de pressão pode ser descrita de forma simplificada pela equação de Bernoulli, conforme expresso na equação 1.1, constituindo-se em uma das bases conceituais para a análise do problema. Pelo Princípio de Bernoulli, a soma das formas de energia em um escoamento incompressível e permanente permanece constante ao longo de uma linha de corrente.

Assim, quando a área da seção diminui, a velocidade do fluido aumenta, o que implica maior energia cinética. Para que o balanço seja mantido, a energia de pressão deve ser reduzida, justificando a queda de pressão na região de estreitamento.

(1.1)

$$P + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = cte$$

1.1.2 Ondas de Kelvin

As ondas geradas por embarcações de alta velocidade constituem um fator de preocupação em ambientes costeiros e interiores. A esteira resultante pode induzir movimentos indesejados em pequenas embarcações próximas, ocasionando adernamento, ou encalhes, além de provocar deslocamentos em navios atracados, com risco de rompimento das amarras. Ademais, tais ondas podem contribuir para processos de erosão ou, em casos mais severos, para o colapso de margens. Quando alcançam uma praia, suas amplitudes aumentam e podem arrebentar, e esse fenômeno pode manifestar-se mesmo quando a embarcação já se encontra fora do campo visual, surpreendendo banhistas e configurando um importante fator de risco à segurança (FALTINSEN, 2006).

O padrão de ondas gerado pela passagem de um navio em águas profundas consiste em dois sistemas principais: um conjunto de ondas divergentes, que acompanham o casco, e um sistema de ondas transversais, que se entrelaçam com as primeiras. Esses sistemas acompanham a embarcação, permanecendo estacionários em relação a ela. Embora tal fenômeno seja frequentemente mais perceptível em observações aéreas ou em pontos elevados da costa, trata-se de um efeito hidrodinâmico universal, que pode ser identificado inclusive em pequenas escalas, como no deslocamento de um pato nadando em um lago.



Figura 2-Ondas geradas por uma embarcação (SOUZA, 2010)



Figura 3-Ondas geradas por um pato (MAVER, 2004)

O movimento de uma embarcação em águas profundas gera um padrão característico de ondas, denominado padrão de Kelvin. Esse fenômeno resulta da superposição das ondas de gravidade produzidas continuamente pelo casco à medida que o navio avança, originando um sistema estacionário em relação à embarcação. Convém destacar que tal padrão pode ser explicado a partir do conceito de uma fonte pontual em movimento, cuja sobreposição das ondas geradas dá origem à estrutura característica observada na esteira do navio.

A análise matemática desse fenômeno, conduzida a partir do método da fase estacionária (MAVER, 2004), demonstra que apenas determinadas direções de propagação contribuem de forma significativa para o campo de ondas.

Na prática, o que ocorre é que a superfície da água é descrita como uma integral oscilatória em função do tempo e do ângulo θ . Encontram-se os instantes t que mais contribuem para o padrão de ondas formados, ou seja, regiões que a fase não varia ou varia muito pouco. O resultado é que apenas ondas dentro de um setor angular definido permanecem visíveis, levando ao valor limite do ângulo de Kelvin.

A condição fundamental para a delimitação desse setor é dada por (MAVER, 2004):

(1.2)

$$\cos^2 \theta \geq \frac{8}{9}$$

O limite dessa desigualdade define o ângulo de abertura do feixe de ondas:

(1.3)

$$\cos^2 \theta = \frac{8}{9} \rightarrow \cos \theta = \sqrt{\frac{8}{9}}$$

Dessa forma, obtém-se:

(1.4)

$$\theta = \arccos \sqrt{\frac{8}{9}} \rightarrow \theta \approx 19^\circ 28'$$

É importante destacar que o ângulo de Kelvin constitui um resultado que é independente da velocidade e das dimensões da embarcação, desde que o movimento ocorra em águas profundas e sob as hipóteses da teoria linear de ondas gravitacionais.

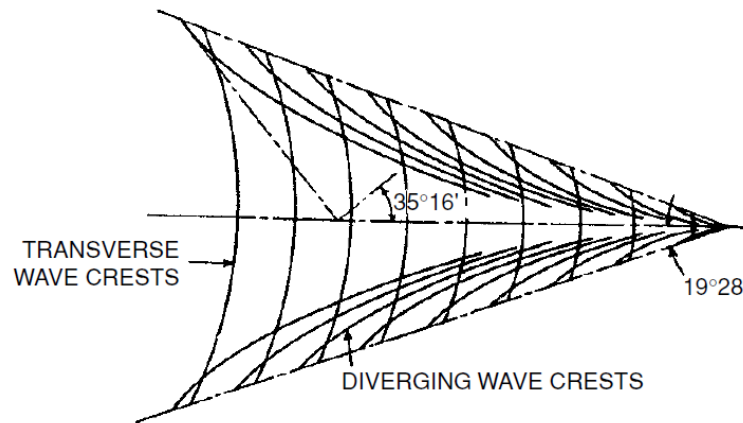


Figura 4-Padrão de Ondas de Kelvin (FALTINSEN, 2006)

A amplitude das ondas divergentes atinge seu valor máximo no ângulo de Kelvin. Já as ondas transversais, geradas na proa e na popa, podem resultar em interferência construtiva ou destrutiva podendo se intensificar ou atenuar a ré do navio.

Quando o navio se encontra em águas de profundidade finita e a razão entre profundidade (h) e comprimento (L) da embarcação é pequena, ocorrem grandes variações próximas ao valor crítico do número de Froude definido em relação à profundidade (Fn_h) (FALTINSEN, 2006):

(1.5)

$$Fn_h = \frac{U}{\sqrt{gh}} = 1$$

Na Figura 4 pode-se observar as ondas geradas por uma embarcação de alta velocidade em regime supercrítico em águas rasas. Nessa condição, não existem ondas transversais, propagam-se apenas ondas divergentes

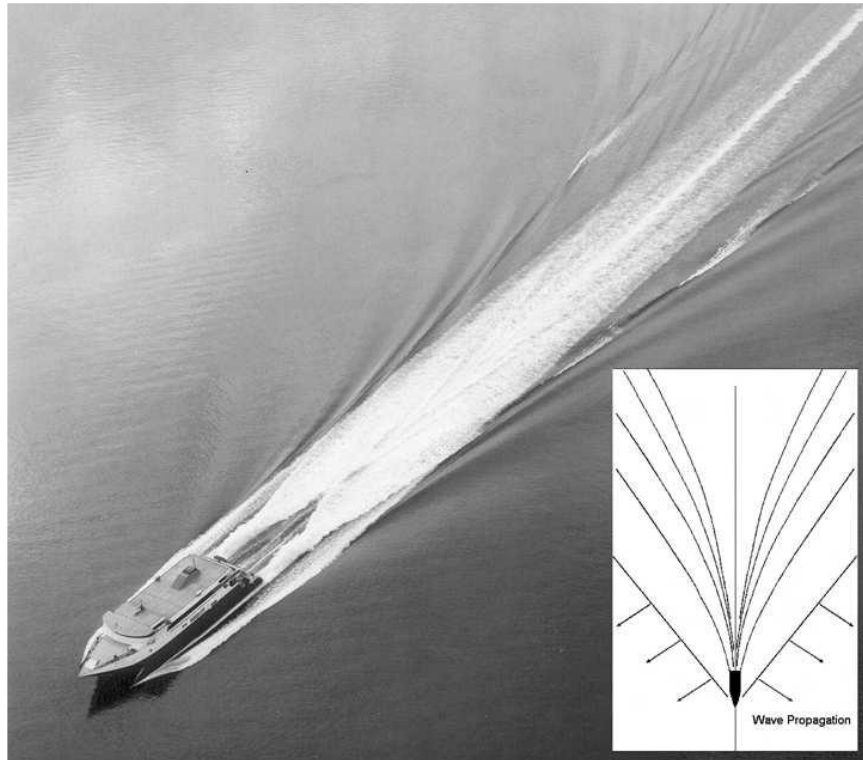


Figura 5-Lancha em água rasas em regime supercrítico (FALTINSEN, 2006)

1.2 Revisão Bibliográfica

O projeto de embarcações de planeio em águas profundas tem sido amplamente estudado, porém com o aumento de embarcações de alto desempenho e seu uso em esporte e recreio, e até mesmo em veículos de superfície não tripulados, em rios e zonas costeiras, surge a necessidade de informações adicionais em águas rasas.

Conforme Reyling (1976), embora alguns experimentos tenham sido realizados, eles extrapolam a faixa de operação real, ou se referem a cascos de planeio muito específicos. Apesar dos avanços significativos em CFD, a principal lacuna reside na escassez de dados experimentais validados, o que dificulta o desenvolvimento de correlações semi-empíricas e validação de modelo numérico.

A navegação de embarcações de planeio em ambientes de profundidade limitada apresenta características hidrodinâmicas sensivelmente distintas daquelas observadas em águas profundas, demandando metodologias específicas tanto para o projeto quanto para a operação.

Em regime de alta velocidade, uma parcela significativa do peso da embarcação passa a ser sustentada pela pressão hidrodinâmica de sustentação, fenômeno que reduz a área molhada do casco (Tavakoli,*et al.*, 2024). Quando essa condição se combina à restrição de lâmina d'água, estabelecem-se interações complexas entre o escoamento, o fundo e o sistema de ondas gerado, com impactos diretos sobre a resistência ao avanço, o trim e afundamento dinâmicos e a segurança da navegação.

No trabalho realizado por JUDGE, *et al.* (2020), foram realizados testes em águas calmas do modelo de casco Generic Prismatic Planning Hull (GPPH), em duas escalas diferentes, e em duas diferentes instalações de testes, e seus resultados comparados com simulações utilizando o STAR-CCM+ e CFDShip-Iowa. Para os resultados experimentais, o trim em águas calmas não foram consistentes entre os dois modelos em escala, embora as medições de alteração de calado e resistência tenham mostrado boa concordância. Estes estudos demonstraram que pequenas variações na geometria do casco, nas condições de lastro e na localização do ponto de reboque podem ter efeitos significativos sobre o trim. Isto reforça a importância de se utilizar informações geométricas e hidrostáticas precisas nas previsões numéricas e nos testes experimentais, de forma que o modelo reproduza dimensões e condições hidrostáticas com a maior precisão possível.

Outros estudos realizados para águas calmas e profundas, compararam os resultados de simulações computacionais e cascos de planeio. PENNINO, *et al.* (2016), observou que os erros médios para valores de resistência, afundamento e trim, foram em torno de 10%, 35% e 20%, respectivamente. SUKAS *et al.*, avaliou a aplicabilidade do uso de malha overset, obteve erros de cerca de 5% para a resistência, 5% para o afundamento e 8% para o trim, tendo concluído que a malha overset foi eficaz para capturar movimentos de um casco de planeio em altos números de Froude.

Neste subcapítulo, são apresentados três métodos empregados para a estimativa da resistência ao avanço, do afundamento e do trim de embarcações de planeio.

1.2.1 Ensaios Experimentais

Os ensaios experimentais constituem uma etapa importante na investigação científica e na engenharia naval, pois permitem obter dados reais e controlados que servem tanto para compreender fenômenos físicos quanto para validar modelos teóricos e numéricos. Em estudos de hidrodinâmica de embarcações, tais ensaios possibilitam avaliar, de forma sistemática, o comportamento do escoamento em torno do casco, a formação de ondas, a resistência ao avanço, o trim dinâmico e o afundamento, entre outros parâmetros de desempenho.

Nas recomendações do ITTC 78 é apresentado o ensaio de resistência ao avanço e as correlações do modelo em escala para o tamanho real da embarcação. Num tanque de provas de resistência, a principal grandeza fundamentalmente medida é a força de

resistência total ao avanço do modelo em função da velocidade. Todos os demais componentes, fricção, forma viscosa, onda e apêndices são estimados ou decompostos a partir dessa medição, seguindo os procedimentos recomendados pela ITTC.

Outras grandezas também são obtidas neste ensaio, tais como o calado e trim, através de medidores de nível, réguas ou sistemas ópticos, e altura e padrão de ondas, através de sondas, câmeras ou laser, para estudar a resistência ao avanço e o padrão de ondas de Kelvin.

Na literatura científica, são escassos os ensaios experimentais dedicados a embarcações de planeio em águas rasas. Entretanto, os resultados obtidos por Molland, *et al.* (1996), em testes com modelos de monocasco e de catamarã, evidenciam que, para números de Froude superiores a 0,35, ocorre variação significativa do trim e do afundamento do casco, mesmo sem considerar os efeitos de profundidade limitada do escoamento.

Uma dificuldade de ensaios experimentais é a escassez de tanques de reboque de águas rasas. Na página oficial na internet do ITTC, são apresentados os laboratórios e suas facilidades, disponíveis mundialmente. No caso de instalações que oferecem análise em águas rasas, nove laboratórios são encontrados, porém dentre eles, apenas quatro contam com tanque de reboque em águas rasas, que são: Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre, Krylov State Research Centre, Maritime Advanced Research Centre (CTO S.A.) e Australian Maritime College.



Figura 6-Disponibilidade de laboratórios com tanque de reboque em águas rasas

Cabe ressaltar que a realização de ensaios com modelos em alta velocidade impõe desafios adicionais, em virtude das grandes forças e momentos atuantes, geralmente associados à rigidez estrutural da montagem e a restrições inerentes aos sistemas de medição de movimento. Além disso, pequenas variações geométricas, diferenças nas propriedades de massa e nas condições hidrostáticas, podem impactar significativamente os resultados, sobretudo no que se refere ao trim, que, por assumir valores reduzidos, mostra-se especialmente sensível a tais fatores.

1.2.2 Métodos Semi-empíricos

A determinação da resistência total ao avanço constitui etapa fundamental no projeto de embarcações, pois permite estimar a potência propulsora necessária para atingir a velocidade de serviço. Antes das ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), essa previsão era realizada principalmente por meio de métodos empíricos e semi-empíricos, desenvolvidos a partir de extensas bases de ensaios em tanques de provas. Estes métodos, ainda amplamente utilizados em fases preliminares de projeto, fornecem estimativas rápidas e confiáveis para diferentes tipos de cascos e

faixas de número de Froude. A seguir, apresentam-se os principais métodos clássicos, com breve histórico e campo de aplicação.

ITTC Friction Line (1957/1978)

Este procedimento do ITTC constitui a base para o cálculo da resistência de fricção viscosa, sendo utilizada em praticamente todos os métodos subsequentes. Resulta de correlações experimentais que expressam o coeficiente de resistência de fricção em função do número de Reynolds, servindo como referência para decompor a resistência total em parcelas:

(1.6)

$$R_T = (1 + k)R_F + R_W + R_A$$

Série Padrão de Taylor

Desenvolvida na década de 1920 pelo U.S. Experimental Model Basin, a Taylor Standard Series correlaciona resistência e potência propulsora para cascos mercantes típicos.

Apesar de histórica, continua sendo utilizada como ferramenta de verificação em projetos de navios de carga de deslocamento para moderado e baixo número de Froude.

Série 60 de Gertler

Elaborada em meados do século XX, a Series 60 de Gertler apresenta formato com coeficiente de bloco próximo de 0,60, permitindo a estimativa da resistência de navios cargueiros convencionais. Tornou-se um dos conjuntos de dados experimentais mais difundidos para comparação de resultados de novos projetos.

Davidson Series 64

Com o objetivo de suprir as limitações da Series 60 para cascos mais finos e velozes, a Davidson Series 64 foi desenvolvida para navios de passageiros e de linha (que operam em rotas regulares) de alta velocidade, fornecendo correlações adequadas a números de Froude moderados.

Van Oortmerssen (1971)

O método de van Oortmerssen surgiu a partir de regressões estatísticas de ensaios com pequenos cargueiros e embarcações de serviço, ampliando as

possibilidades de previsão de resistência em geometrias menos convencionais. Posteriormente, o autor desenvolveu também versões específicas para embarcações de pesca.

Holtrop & Mennen (1978–1982)

Provavelmente o método empírico mais difundido na atualidade, o Holtrop & Mennen baseia-se em vasta campanha experimental e decompõe a resistência total em parcelas de fricção, forma, geração de ondas e resistências adicionais (apêndices, bulbo de proa, trim). É indicado para navios de deslocamento com $F_n < 0,4$ e tornou-se referência em softwares de projeto preliminar.

Savitsky (1964)

Para embarcações de planeio em alta velocidade, onde a sustentação hidrodinâmica (lift) passa a sustentar parte do peso, o método de Savitsky fornece estimativas de trim dinâmico, afundamento e resistência total. Derivado de ensaios em tanques de provas, é amplamente aplicado a lanchas rápidas e cascos deep-V, tornando-se o modelo clássico para regime de planeio.

A interação com águas rasas não apenas amplifica squat e resistência de onda, mas também altera a própria sustentação hidrodinâmica. O método clássico, amplamente adotado para previsão de resistência e trim em águas profundas, descreve o equilíbrio entre sustentação, peso e momento de arfagem. Experimentos controlados em tanques de provas, como os de Savitsky, Brown e Dalzell (2007), demonstraram que, em velocidades supercríticas ($F_{nh} \geq 1$), a resistência ao avanço de planadores pode inclusive diminuir, em contraste com navios de deslocamento, devido à redução do deslocamento aparente e à predominância de ondas divergentes de menor energia.

Savitsky, Brown & Dalzell (2007)

Como evolução do trabalho original, esta extensão do método Savitsky incorpora os efeitos de profundidade limitada, permitindo a análise de planadores em águas rasas. Considera o número de Froude por profundidade e descreve a alteração da resistência, trim e afundamento dinâmico quando a lâmina d'água é restrita.

A tabela a seguir apresenta um resumo dos métodos descritos.

Tabela 1-Métodos empíricos e semi-empíricos

Modelo	Aplicação típica	Faixa de validade (aprox.)	Observações
Holtrop & Mennen (1978–1982)	Navios de deslocamento (cargueiros, petroleiros, navios de passageiros)	$F_{nL} \lesssim 0,4$	Decompõe R_{TR_T} em fricção, forma, ondas e apêndices. É um dos mais utilizados em softwares de projeto preliminar.
ITTC 1957/1978 friction line	Cálculo de resistência de fricção em complemento a outros métodos	Todos os cascos	Fornece a correlação padrão para o atrito viscoso do casco; usada em praticamente todos os métodos.
Taylor Standard Series	Navios mercantes convencionais	F_{nL} baixo–moderado	Série experimental da década de 1920; serve como base para previsão de potência e comparação com métodos modernos.
Gertler Series 60	Casco com coeficiente de bloco $\sim 0,60$	F_{nL} moderado	Usada como série de referência para cargueiros e navios de linha clássicos.
Davidson Series 64	Navios de passageiros de alta velocidade (deslocamento)	F_{nL} moderado	Corrige limitações da Series 60 para cascos mais finos.
Oortmerssen (1971)	Pequenos cargueiros e navios de serviço	F_{nL} moderado	Regressão empírica para geometrias específicas.
Van Oortmerssen – Fishing Vessels	Embarcações de pesca	$F_{nL} \lesssim 0,4$	Ajustado para características típicas desse tipo de casco.
Savitsky (1964)	Embarcações de planeio (deep-V, lanchas rápidas)	$F_{nL} \gtrsim 0,8$	Considera sustentação hidrodinâmica, calcula trim e afundamento dinâmico; indicado para cascos de alta velocidade.
Savitsky, Brown & Dalzell (2007)	Planadores em águas rasas	F_{nL} crítico e supercrítico	Extensão do Savitsky clássico para efeitos de profundidade limitada.

1.2.3 Ferramentas Computacionais

A equação de Navier-Stokes descreve a física do escoamento do fluido ao redor do casco de uma embarcação e expressa, em forma de balanço de quantidade de movimento, a aplicação da segunda lei de Newton a um fluido viscoso, levando em conta forças de inércia, pressão, viscosidade e forças externas, como gravidade.

Segundo Sphaier, S. (2013), em um escoamento incompressível num campo de forças de corpo gravitacional, são regidos pela lei da conservação da massa, expressa na equação da continuidade (1.7) e pela conservação da quantidade de movimento, expressa pela equação de Navier-Stokes (1.8).

(1.7)

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

(1.8)

$$\rho \frac{D}{Dt} v = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 v$$

Onde

v [m/s] é a velocidade do fluido

t [s] é o tempo

ρ [kg/m³] é a massa específica do fluido

g [m/s²] é a aceleração da gravidade

p [Pa] é a pressão

μ [Pa.s] é a viscosidade dinâmica

A dificuldade surge ao tentar resolver as equações de Navier–Stokes, que constituem um sistema acoplado de equações diferenciais parciais não lineares e só foram resolvidas analiticamente para algumas configurações geométricas muito simples (Newman, J.).

Com o avanço da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), foi possível a criação de ferramentas capazes de utilizar as equações diferenciais de Navier-Stokes para a solução numérica de diversos problemas envolvendo a dinâmica dos fluidos.

Este sistema de equações não têm uma solução analítica geral, porém com ferramentas CFD, este sistema contínuo pode ser transformado em um problema discreto, tornando viável com a precisão controlada por estudos de malha e modelos de turbulência, a previsão de fenômenos complexos no escoamento em torno de navios, algo impossível de obter por soluções analíticas.

Dessa forma, torna-se possível prever a resistência ao avanço de uma embarcação, analisar efeitos de squat e trim dinâmico, bem como simular a interação casco–hélice, a formação de ondas de Kelvin e o desempenho de apêndices, entre outras aplicações, de acordo com a natureza do problema em estudo.

No estudo realizado por UTOMO, *et al.* (2023), com a ferramenta CFD, foi observado que quando um casco se desloca em águas rasas com velocidade subcrítica (comportamento de embarcações de deslocamento), a velocidade da embarcação tende a diminuir para uma mesma potência constante. Por outro lado, em águas rasas com velocidades supercríticas (características de embarcações de planeio), a velocidade da embarcação aumenta mantendo a potência.

1.3 Objetivo

O objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento hidrodinâmico de uma embarcação de planeio operando em condições de restrição de lâmina d'água, com avaliação do comportamento das forças e momentos atuantes no casco, do trim, do afundamento e do padrão de formação de ondas e dos efeitos hidrodinâmicos decorrentes desse regime.

Para o alcance deste objetivo, são definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Caracterizar os regimes de navegação em águas rasas por meio dos parâmetros adimensionais, em especial o número de Froude por profundidade (F_{nh}), identificando as faixas subcrítica, crítica e supercrítica e discutindo suas implicações sobre o escoamento em torno do casco para análise de resistência ao avanço;
2. Investigar a influência da profundidade relativa na geração e na propagação das ondas, bem como nas alterações do ângulo de Kelvin;
3. Avaliar os efeitos da restrição de lâmina d'água sobre variáveis de desempenho hidrodinâmico, tais como resistência ao avanço, trim e afundamento;
4. Aplicar e validar ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para simular o escoamento em condições de águas rasas, com ênfase na execução de estudos de convergência de malha e análise de incerteza, seguindo as recomendações do ITTC (2011) para verificação e validação de CFD;
5. Confrontar os resultados numéricos com referências teóricas, consolidando a metodologia empregada e fornecendo subsídios técnicos que reforcem a confiabilidade dos resultados obtidos.

1.3.1 Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida nos seguintes capítulos:

- Capítulo 2: Uma breve apresentação do estudo realizado por Savitsky, para cascos de planeio, e posteriormente para cascos de planeio em águas rasas, aplicados aos dados de entrada utilizados neste trabalho. Também serão apresentadas as equações governantes do problema físico, bem como as considerações escolhidas para a configuração da simulação numérica;
- Capítulo 3: Apresentação da geometria estudada, utilização da ferramenta CFD, através do software comercial Star CCM+, seguindo as recomendações do ITTC para o domínio computacional, condições de contorno, geração de malha.

Ademais, será apresentada a verificação e validação da simulação em águas profundas e apresentação das malhas geradas para as profundidades de 10 metros, 5,0 metros, 2,5 metros e 1,0 metro;

- Capítulo 4: Apresentação dos resultados, discussões dos efeitos em águas rasas e comparação com o método de estimativa de Savitsky;
- Capítulo 5: Conclusão sobre o estudo realizado, e sugestões para trabalhos futuros;
- Capítulo 6: Referências utilizadas para estudo e realização deste trabalho.

2 Método

2.1 Método de Savitsky

O desempenho hidrodinâmico de embarcações de planeio requer metodologias específicas, pois, em altas velocidades, parte significativa do peso da embarcação é sustentada por forças hidrodinâmicas de sustentação (lift), e não apenas pelo empuxo estático. Entre os modelos consagrados para a previsão do comportamento dessas embarcações destaca-se o método de Savitsky, proposto em 1964 por Daniel Savitsky, que se tornou referência na engenharia naval e em particular no projeto de cascos de V profundo e embarcações de alto desempenho.

Durante a década de 1960, o rápido crescimento do setor de lanchas de alta velocidade e de embarcações militares de patrulha criou a necessidade de ferramentas de projeto capazes de prever resistência, trim e afundamento dinâmico em regime de planeio. Savitsky desenvolveu um conjunto de equações semi-empíricas a partir de dados experimentais de tanque de provas e de princípios da hidrodinâmica de escoamento livre, oferecendo uma alternativa prática aos métodos puramente experimentais, até então dominantes.

Seu trabalho, *Hydrodynamic Design of Planing Hulls* (1964), estabeleceu as bases para uma metodologia de cálculo que, com pequenas atualizações, continua sendo amplamente aplicada tanto em projetos civis quanto militares.

O método de Savitsky assume um casco de fundo em V (deep-V) ou de fundo praticamente plano, navegando em regime de planeio em águas profundas, e considera o equilíbrio entre:

- Forças de sustentação hidrodinâmica, geradas pela pressão na carena devido ao escoamento de alta velocidade.
- Peso total da embarcação, que deve ser equilibrado pela resultante da força de sustentação.
- Momento de arfagem (trim), que ajusta o ângulo da embarcação em relação à superfície livre.

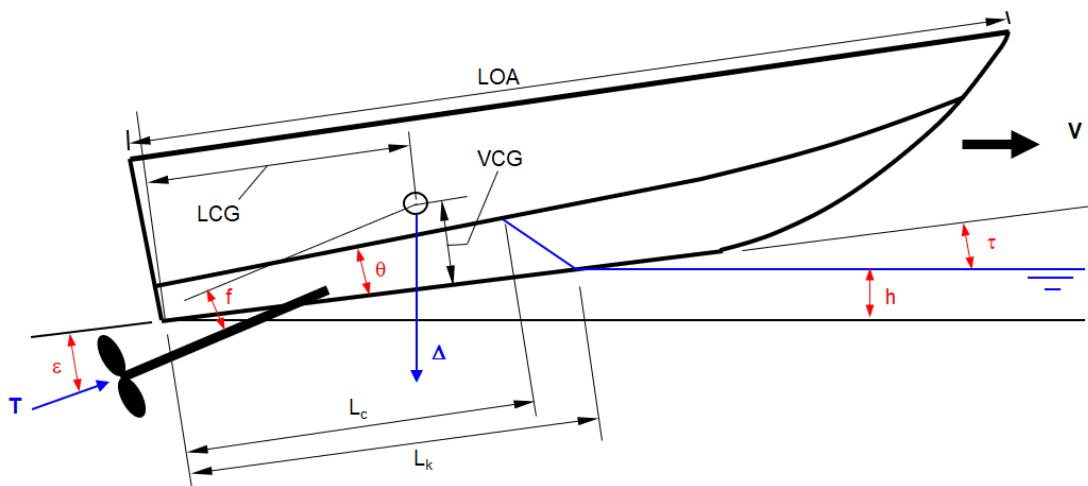


Figura 7-Parâmetros de Savitsky (Adaptado de RICCIARDO,(2010))

A formulação relaciona o coeficiente de sustentação, o ângulo de trim dinâmico e a área molhada da carena, permitindo calcular:

1. Trim de equilíbrio – ângulo em que se equilibra o momento entre o peso e a sustentação.
2. Afundamento dinâmico (sinkage) – redução do calado devido ao efeito de sustentação.
3. Resistência total ao avanço, composta pela resistência de fricção (calculada, por exemplo, pelo ITTC-57 ou ITTC-78) e pela parcela de arrasto induzido pela geração de sustentação.

Savitsky também introduziu correções para efeitos de spray, influência da velocidade e do número de Froude, e para a geometria do “V-bottom”, permitindo estimativas robustas em uma ampla faixa de velocidades de planeio.

O método tornou-se padrão de projeto para:

- Lanchas de alta velocidade, iates esportivos e embarcações de patrulha.
- Estudos preliminares de desempenho em cascos de planeio simples ou múltiplos.

Contudo, a formulação original pressupõe águas profundas e regime de planeio puro (número de Froude elevado). Para condições de águas rasas ou regimes de transição entre deslocamento e planeio, adaptações posteriores foram propostas, como o trabalho de SAVITSKY *et al.* (1964), que incorpora os efeitos de profundidade limitada e de número de Froude por profundidade.

O método de Savitsky permanece como uma ferramenta essencial no dimensionamento preliminar de embarcações de alto desempenho, permitindo prever de forma rápida e confiável o comportamento em altas velocidades sem a necessidade

imediate de ensaios em tanque de provas. Sua utilização continua sendo recomendada tanto em projetos navais quanto em estudos acadêmicos que tratam de hidrodinâmica de cascos de planeio.

2.2 Computational Fluid Dynamics (CFD)

A aplicação de CFD apresenta um conjunto de vantagens relevantes para a engenharia naval e oceânica. Primeiramente, destaca-se a capacidade de visualização detalhada do escoamento, fornecendo campos de velocidade, pressão e vorticidade, permitindo acesso a grandezas dificilmente mensuráveis em experimentos físicos. Além disso, o uso de CFD proporciona redução de custos e tempo de projeto, na medida em que diminui a necessidade de protótipos físicos e ensaios experimentais, os quais frequentemente demandam infraestrutura especializada, como tanques de provas, tanques de manobras e túneis de cavitação.

Outra vantagem consiste na flexibilidade de simulação em cenários distintos, permitindo a análise de geometrias variadas e condições de contorno diversas, como escoamentos em altas velocidades, fluidos incompressíveis ou compressíveis, interação com fluidos de diferentes densidades e viscosidades, interação com superfícies distintas. O CFD também atua como complemento aos ensaios experimentais, viabilizando a redução do número de testes físicos e contribuindo para a interpretação de resultados em escala real ou reduzida.

Este estudo utilizou como ferramenta o software comercial STAR CCM+, que usa Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) baseado no método de volumes finitos, e constitui um campo da engenharia que utiliza modelagem matemática, métodos numéricos e recursos computacionais para simular o comportamento de escoamentos de fluidos e fenômenos associados, tais como transferência de calor, turbulência, cavitação, interação fluido-estrutura e processos multifásicos. Fundamenta-se, essencialmente, na resolução numérica das equações de Navier-Stokes, as quais descrevem a conservação de massa, quantidade de movimento e energia em meios fluídos.

Além disso, com a ferramenta computacional é possível simular as ondas de Kelvin, e, portanto, analisar o ângulo formado entre as ondas geradas e a linha de centro.

Em águas profundas, a teoria de Kelvin descreve o padrão de ondas gerado pelo movimento de um corpo na superfície livre, caracterizado por um ângulo de $19^{\circ}28'$ (Lighthill, 1978). Em águas rasas, a relação de dispersão das ondas de gravidade $\omega^2 = gk \tanh(kh)$ mostra que, à medida que a profundidade relativa diminui ($kh \rightarrow 0$), a velocidade de fase passa a depender unicamente de h e o sistema de ondas sofre alterações significativas (Dean & Dalrymple, 1991).

2.2.1 Equações Governantes

O escoamento de um fluido é matematicamente representado pela equação da continuidade, que representa o princípio de conservação da massa, e pela equação de Navier-Stokes, que representa a segunda lei de Newton aplicada ao fluido.

O princípio da conservação da massa expressa que em qualquer instante de tempo, o fluxo que entra em um volume de controle é o mesmo que sai.

(2.1)

$$\nabla \cdot V = 0$$

Nota-se que o escoamento de fluido é considerado incompressível e a equação de Navier-Stokes expressa a conservação da quantidade de movimento, levando em conta as forças de inércia, de pressão, de viscosidade e a força resultante da ação da gravidade.

(2.2)

$$\rho \frac{D}{Dt} V = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 V$$

A equação descreve como a velocidade e a pressão evoluem no espaço e no tempo, e permitindo analisar e prever os fenômenos hidrodinâmicos que afetam diretamente o desempenho de embarcações.

2.2.2 Modelo VOF

Utilizado para modelar a superfície livre da simulação, consiste em descrever a interface entre duas ou mais fases imiscíveis, neste caso entre a água e o ar, com a ideia de que, em cada célula da malha, é possível definir a fração de volume representada por α ocupada por uma das fases

- $\alpha = 0 \rightarrow$ célula completamente preenchida pela fase gasosa.
- $\alpha = 1 \rightarrow$ célula completamente preenchida pela fase líquida.
- $0 < \alpha < 1 \rightarrow$ célula de interface, onde a superfície livre está passando.

Essa abordagem permite resolver a equação de continuidade da fração volumétrica, dada pela equação (2.3), no elemento de interface para o fluido, onde α representa a fração de volume ocupada na célula.

(2.3)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} = 0$$

Assim, em vez de acompanhar partículas ou interfaces como superfícies explícitas, o método acompanha esse campo escalar α que evolui no tempo, rastreando a elevação da superfície livre em cada célula.

Para este estudo, optou-se por modelar a superfície livre em 50% água e 50 % ar.

2.2.3 Modelo de Turbulência

A modelagem da turbulência constitui um dos principais desafios da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Em escoamentos turbulentos, especialmente nas camadas de cisalhamento, as mudanças na direção do fluxo ocorrem de forma suficientemente lenta para que a turbulência possa se ajustar às condições locais. Quando os efeitos de convecção e difusão das propriedades turbulentas são desprezíveis, é possível descrever o comportamento do escoamento, entretanto essa abordagem não se mostra adequada em situações mais complexas, como escoamentos com recirculação, forte curvatura ou separação de fluxo.

Para superar essas limitações, foram desenvolvidos modelos baseados em formulações mais abrangentes, que consideram diretamente a dinâmica da energia turbulenta. Dentre eles, destaca-se o modelo $k-\varepsilon$, originalmente proposto por LAUNDER *et al.* (1974), que introduz duas equações de transporte adicionais: uma para a energia cinética turbulenta (k) e outra para a sua taxa de dissipação (ε). Essas equações permitem o fechamento das equações de Navier–Stokes médias de Reynolds (RANS), possibilitando a representação dos efeitos médios da turbulência sobre o escoamento.

O escoamento turbulento foi modelado com a abordagem RANS, e utilizado o modelo de taxa de dissipação ε para águas rasas conforme, estudo de NIKSERESHT *et al.* (2016)

A velocidade instantânea é decomposta na soma de sua média temporal e uma flutuação turbulenta (ε), onde o parâmetro ε corresponde à taxa de dissipação viscosa da energia turbulenta, relacionada à transferência de energia das grandes escalas para as pequenas escalas de movimento até ser finalmente dissipada em calor pela viscosidade.

(2.4)

$$u_i(x, t) = \bar{u}_i(x, t) + u'_i(x, t)$$

- $\bar{u}_i(x, t)$ Componente média da velocidade

- $u'_i(x, t)$ Flutuação turbulenta

Substituindo a equação (2.4) na equação de Navier-Stokes, tem-se a seguinte relação médias de Reynolds:

(2.5)

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

O termo adicional $\overline{u'_i u'_j}$ é chamado de tensor de tensões de Reynolds, e representa as contribuições da turbulência sobre o escoamento médio, e é onde o modelo de turbulência k-ε é aplicado.

As equações de transporte que descrevem a evolução de (k) e (ε) podem ser expressas, de forma simplificada, como:

(2.6)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

(2.7)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$$

Onde:

P_k : termo de produção de energia turbulenta;

ν : viscosidade molecular;

$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$: viscosidade turbulenta;

$C_{1\varepsilon} = 1,92$; $C_{2\varepsilon} = 1,44$; $C_\mu = 0,09$: constantes empíricas do modelo.

Para calcular as tensões de Reynolds com o modelo k-ε, é utilizada uma relação de Boussinesq estendida.

(2.8)

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

Dividindo a equação por ρ, tem-se:

(2.9)

$$\tau_{ij} = -\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

Onde,

$$\delta_{ij} = 1, \text{ se } i = j \text{ e } \delta_{ij} = 0, \text{ se } i \neq j$$

Assim, esse modelo de turbulência representa a forma capaz de prever, de maneira consistente, tanto os fenômenos de escoamento próximo às paredes quanto os escoamentos livres com cisalhamento, sem a necessidade de ajustes adicionais em coeficientes ou funções empíricas (LAUNDER *et al.*, 1974). Seu emprego tem resultado em previsões bastante precisas para escoamentos do tipo camada-limite e escoamentos com recirculação.

Para determinar o comportamento do escoamento turbulento na região próxima à parede (superfície do casco da embarcação), utiliza-se um tratamento de parede para todos os valores de y^+ (*all- y^+ wall treatment*), onde uma função de parede é usada para malhas grosseiras com valores de y^+ maiores que 30 ($y^+ > 30$), enquanto a subcamada viscosa é resolvida para malhas finas com os valores de y^+ menores que 1 ($y^+ < 1$). Além disso, ao combinar adequadamente a subcamada viscosa e a subcamada logarítmica, a abordagem produz resultados consistentes para casos em que as células imediatamente próximas à parede se enquadram na região intermediária da camada limite ($1 < y^+ < 30$).

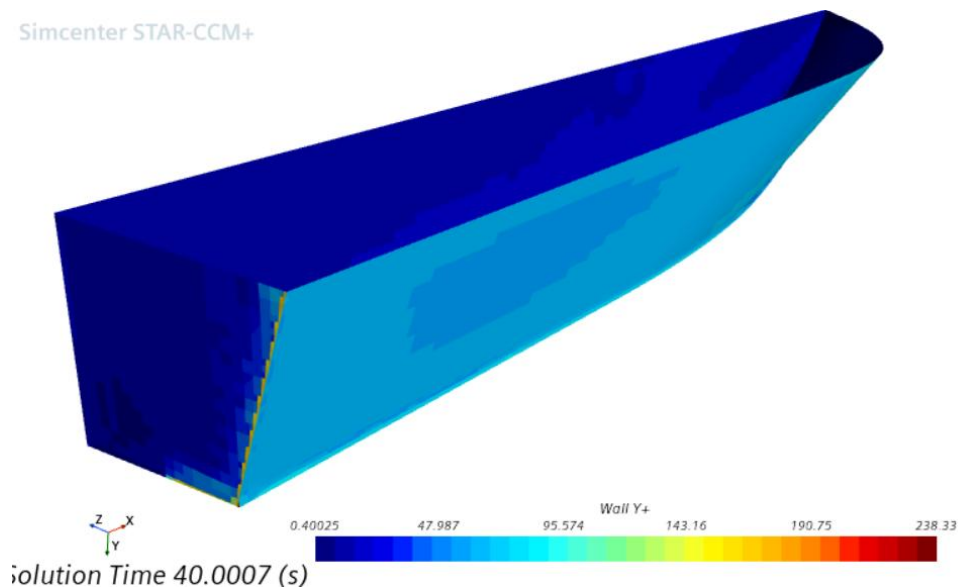


Figura 8- y^+ Popa

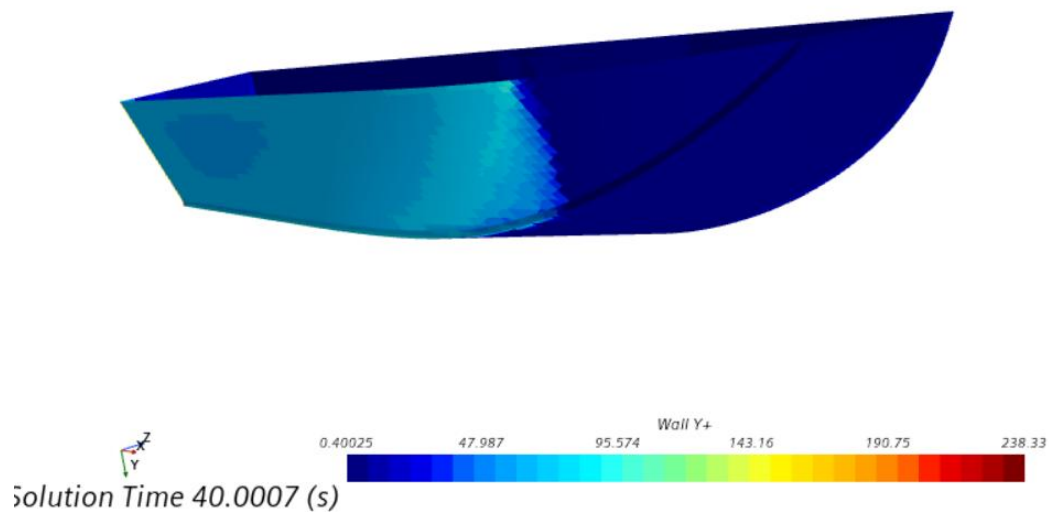


Figura 9-Y+ Proa

2.2.4 Malha Adaptativa

A malha adaptativa (*Adaptive Mesh Refinement – AMR*) constitui uma técnica numérica que permite o ajuste dinâmico da discretização espacial do domínio computacional ao longo da simulação. Esse recurso tem como finalidade aumentar a precisão em regiões de maior relevância física, ao mesmo tempo em que se reduz o custo computacional, evitando o emprego de malhas uniformemente refinadas em todo o domínio.

O princípio fundamental da abordagem adaptativa consiste em monitorar determinados critérios de refinamento, os quais podem incluir: gradientes elevados de variáveis de escoamento (pressão, velocidade ou temperatura), a posição da superfície livre em simulações multifásicas, a formação de vórtices e regiões de impacto ou ainda zonas de elevada curvatura geométrica. Sempre que tais critérios atingem valores pré-estabelecidos, o algoritmo de malha procede ao refino local (subdivisão de células em elementos menores) ou ao *coarsening* (aglomeração de elementos em regiões de menor interesse).

2.2.5 Malha Overset

A malha overset consiste em uma técnica de discretização para lidar com problemas que envolvem corpos móveis ou domínios de geometria complexa. A abordagem tem como princípio a decomposição do domínio computacional em múltiplas malhas sobrepostas, que interagem entre si por meio de processos de interpolação numérica.

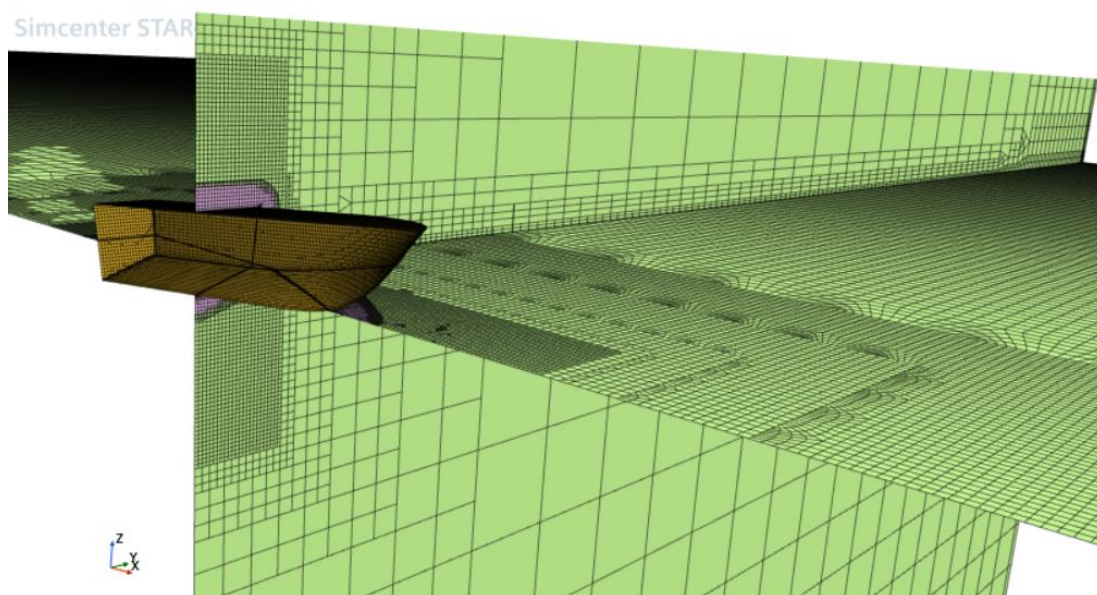


Figura 10-Background em verde, overset em rosa e casco em amarelo (imagem feita pela autora)

De modo geral, define-se uma malha de fundo (*background grid*), responsável por representar o domínio global, como o tanque de ensaio, e uma ou mais malhas móveis (*overset grids*), que envolvem os corpos de interesse, como cascos, lemes, hélices ou submarinos.

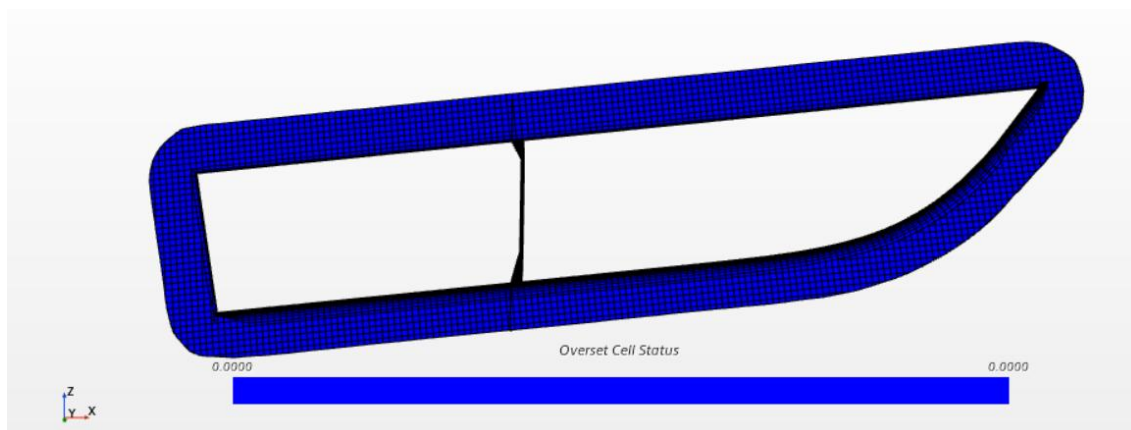


Figura 11-Overset (imagem feita pela autora)

3 Simulação Computacional

Neste capítulo serão apresentadas as configurações e ferramentas utilizadas para simular o problema físico proposto.

3.1 Geometria

Neste estudo foi utilizado a forma de casco de planeio, conhecido como Generic Prismatic Planing Hull (GPPH), utilizado em diversos estudos da comunidade científica com as seguintes dimensões:

Tabela 2- Características GPPH (WANG, 2025)

LOA	2413	mm
B	741	mm
D	400	mm
T	146,3	mm
β (deadrise)	17,94	°
VCG	180	mm
LCG	859,5	mm
m	50,75	kg

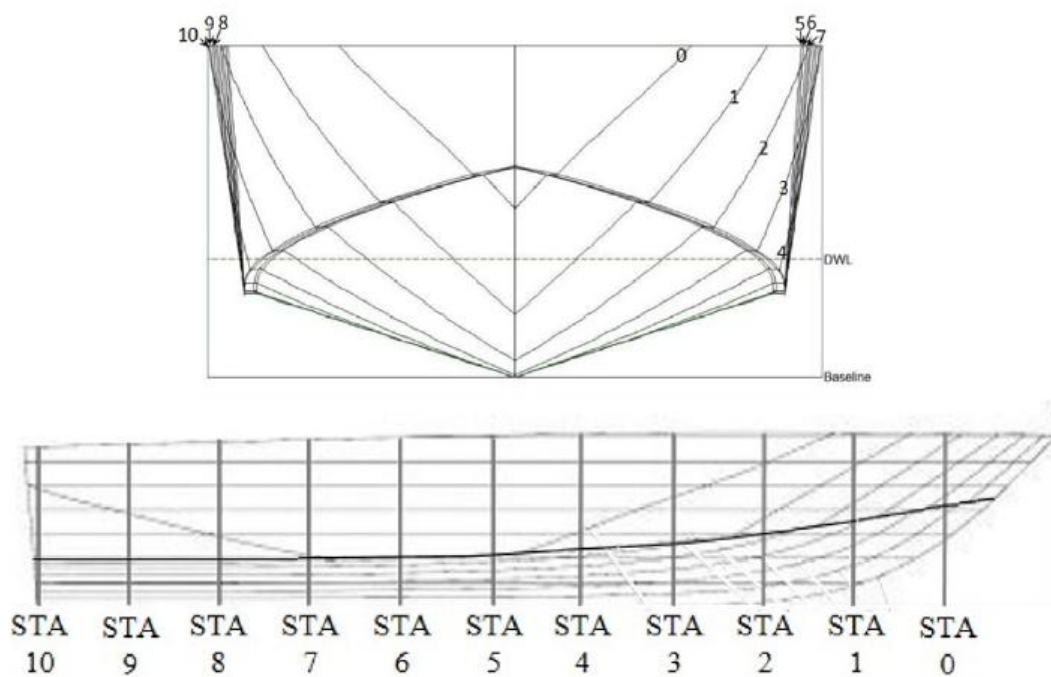


Figura 12- Plano de Linhas GPPH (JUDGEA, 2020)

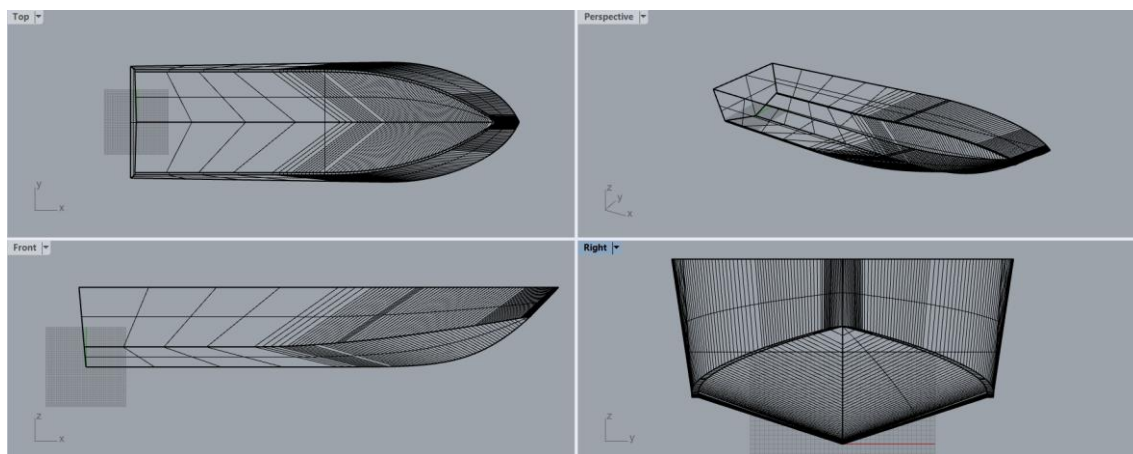


Figura 13-Geometria no software Rhinoceros (imagem feita pela autora)

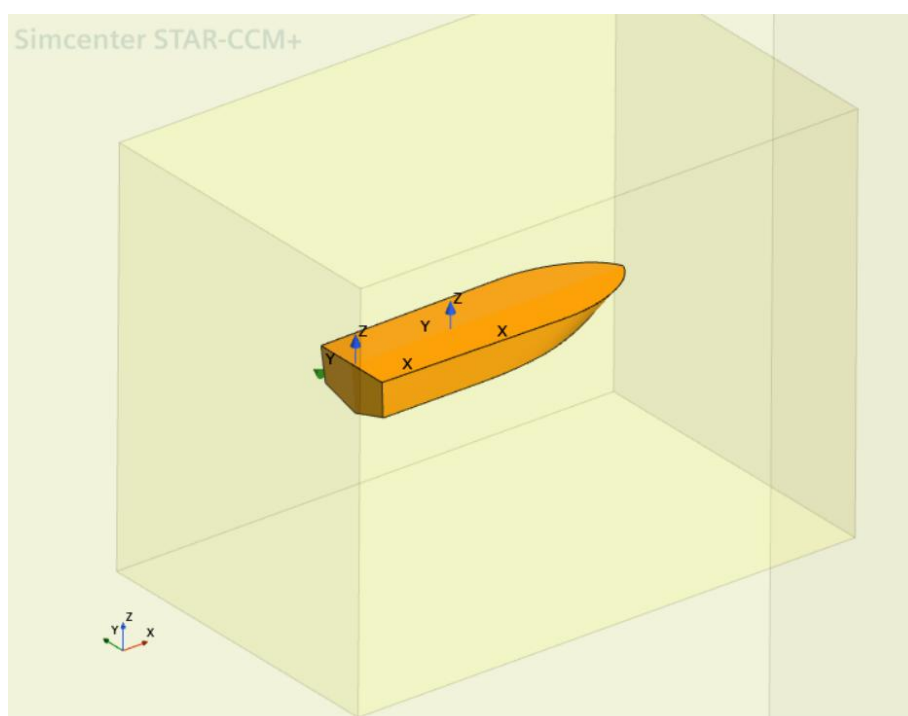


Figura 14-Geometria no software Star CCM+ (imagem feita pela autora)

3.2 Condições computacionais

As condições físicas simuladas no modelo computacional podem ser vistas na tabela 3. A fim de verificar o efeito da redução de profundidade no escoamento, o número de Froude, $Fn = v/\sqrt{gL}$, foi fixado em 0,8.

Tabela 3- Características físicas da simulação

Velocidade do casco	3,88 m/s
Fn	0,80
Profundidade 1	10,00 m
Profundidade 2	5,00 m
Profundidade 3	2,50 m
Profundidade 4	1,00 m

A embarcação é livre para movimento de translação no eixo z, chamado de *heave* ou arfagem, e livre para rotação em torno do eixo y, conhecido como movimento de *pitch* ou caturro.

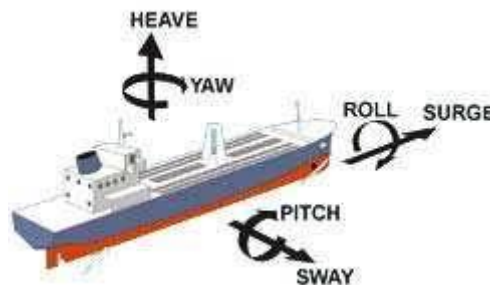


Figura 15- Graus de liberdade (FELIX, 2014)

Para simular tais movimentos, foi utilizado o modelo de interação dinâmica *Dynamic Fluid Body Interaction* (DFBI) é um método de acoplamento fluido-estrutura que permite que corpos rígidos se movam livremente em resposta às forças e momentos hidrodinâmicos gerados pelo escoamento ao redor deles.

Em outras palavras, o escoamento do fluido gera forças que atuam no corpo rígido, o corpo responde com movimentos de translação, rotação e aceleração, e estes novos movimentos a cada passo de tempo alteram o escoamento. Assim o processo iterativo reinicia com novas forças e movimentos de resposta.

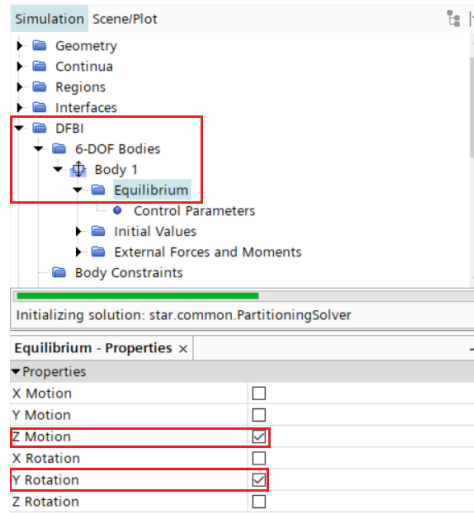


Figura 16-Modelo livre em heave e pitch (imagem feita pela autora)

3.3 Domínio Computacional e Condições de Contorno

O domínio computacional é definido de acordo com o comprimento total do casco, boca e velocidade de avanço. Nas diretrizes do ITTC, o procedimento de análise CFD é dividido em três etapas: Pré-processamento, Computacional e Pós-processamento. O pré- processamento consiste na definição da geometria, do domínio computacional e geração da malha computacional.

Da relação de dispersão linear de ondas na superfície, tem-se a seguinte relação, onde λ é o comprimento de onda gerado pelo casco, v é a velocidade de avanço e θ é o ângulo entre a direção do deslocamento e o vetor normal à crista da onda formada pelo casco:

(3.1)

$$\lambda = 2\pi \frac{v^2}{g} \cos^2 \theta$$

Dividindo os dois lados da equação pelo comprimento do casco:

(3.2)

$$\frac{\lambda}{L} = 2\pi \frac{v^2}{gL} \cos^2 \theta \rightarrow \frac{\lambda}{L} = 2\pi F_n^2 \cos^2 \theta$$

Sabendo que para este estudo o número de Froude é 0,8, foi obtido o valor do

comprimento de onda gerado pelo casco. O comprimento de onda é um parâmetro importante para definir as dimensões do domínio.

(3.3)

$$\frac{\lambda}{2,4} = 2\pi 0,8^2 \cos^2(0) \rightarrow \frac{\lambda}{2,4} = 4,021 \rightarrow \lambda = 9,651 \text{ m}$$

As coordenadas do modelo seguem a seguinte orientação: x positivo de ré para vante, sendo zero no espelho de popa, z positivo do calado de projeto para cima e y positivo para bombordo.

Dessa forma, o domínio para águas profundas foi definido de $[-2\lambda, 0, -4L]$ até $[2L+\lambda, 2L+\lambda, 2L]$.

Simcenter STAR-CCM+

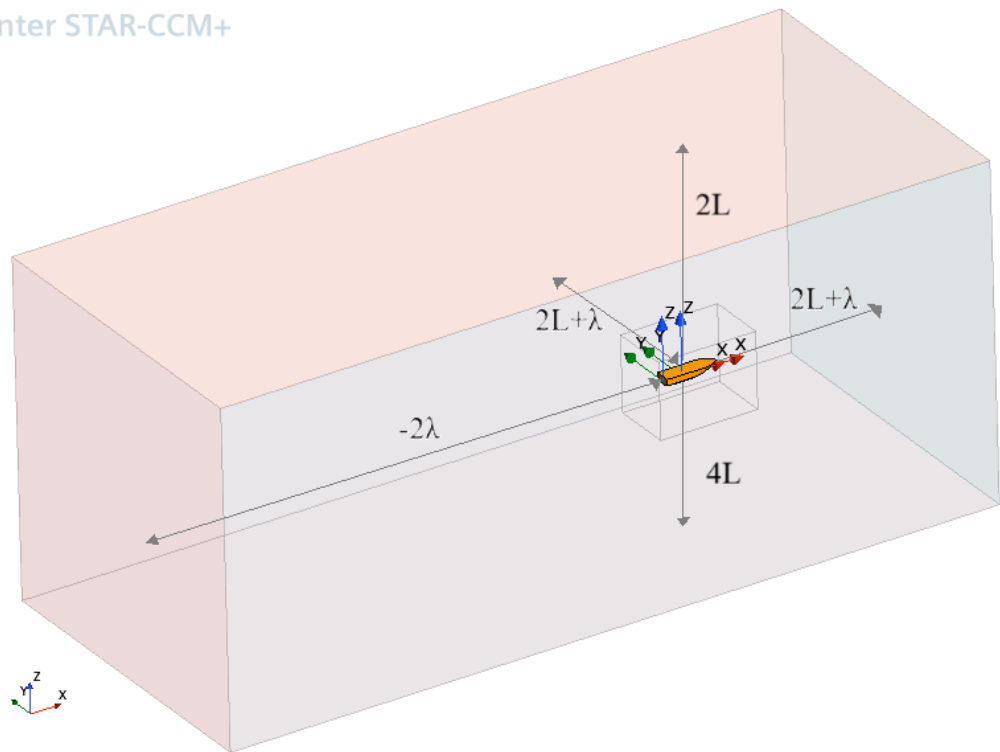


Figura 17-Domínio para águas profundas (imagem feita pela autora)

Para águas rasas, temos três considerações em relação à profundidade para definir o que é considerado águas rasas:

Relação de dispersão de ondas

A distinção entre águas profundas, intermediárias e rasas é feita a partir da relação entre a profundidade h e o comprimento de onda λ . A base teórica vem da relação de dispersão:

(3.4)

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

(3.5)

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Tabela 4-Classificação águas rasas segundo relação da dispersão (DEAN et al. (1991)), onde d é a profundidade

Classification of Water Waves

Classification	d/L	kd	$\tanh(kd)$
Deep water	$1/2$ to ∞	π to ∞	≈ 1
Transitional	$1/20$ to $1/2$	$\pi/10$ to π	$\tanh(kd)$
Shallow water	0 to $1/20$	0 to $\pi/10$	$\approx kd$

Para águas rasas, segundo DEAN *et al.* (1991), a razão profundidade-comprimento de onda, deve ser menor que $1/20$.

(3.6)

$$\frac{h}{\lambda} \leq 0,05$$

Razão profundidade/calado

Conforme descrito por DUARTE, *et al.* (2016), a razão entre a profundidade da água (h) e o calado do navio (T), é uma relação na qual as seguintes faixas apresentam mudanças de comportamento. Mudanças significativas no comportamento da embarcação tornam-se perceptíveis quando $h/T < 1,5$.

Número de Froude em relação à profundidade

Diversas referências indicam que os efeitos de águas rasas começam a se manifestar para números de Froude, em relação à profundidade, maiores que aproximadamente 0,7, atingem sua máxima intensidade na faixa de 0,9–1,0 e diminuem

gradualmente a partir de cerca de 1,2(RADOJCICet *al.*, 2010). Com base nessas informações, podem ser identificadas três regiões características:

Região subcrítica ($F_{nh} < 0,6-0,7$)

- O comportamento das ondas ainda se assemelha ao regime de águas profundas.
- A influência da profundidade é limitada e os efeitos de squat e resistência adicional são pouco significativos.
- O padrão de ondas ainda apresenta tanto componentes transversais quanto divergentes, mantendo o ângulo de Kelvin próximo ao valor clássico ($19^{\circ}28'$).

Região crítica ($0,9 < F_{nh} < 1,0$)

- Ocorrem os efeitos mais pronunciados de águas rasas.
- Observa-se forte aumento do squat, amplificação da resistência de onda e modificação do padrão de ondas.

Região supercrítica ($F_{nh} \geq 1,0$)

- As ondas transversais deixam de existir, restando apenas ondas divergentes no campo distante.

A análise física deste trabalho consiste em um fluido com velocidade contante de 3,88 m/s e condição de mar calmo, ou seja, sem ondas incidentes. A fim de representar a dinâmica da simulação, condições de contorno foram configuradas nas faces do tanque, conforme figura a seguir, para águas profundas.

Simcenter STAR-CCM+

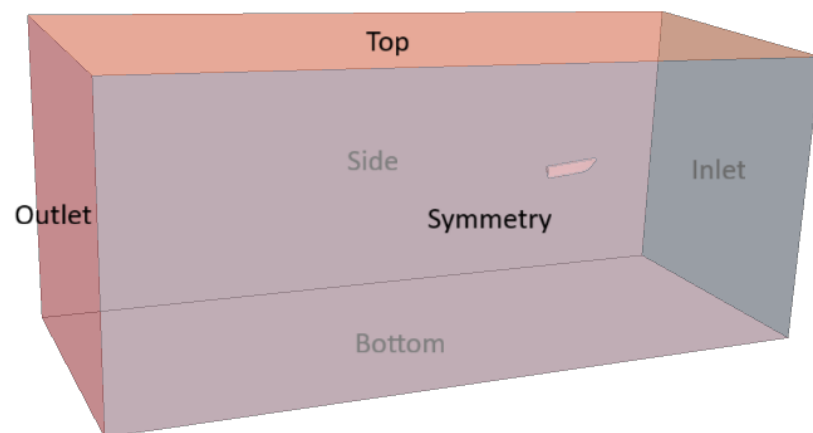


Figura 18-Regiões de fronteira (imagem feita pela autora)

As condições de contorno das fronteiras foram definidas como velocidade de entrada, ou seja, a velocidade de 3,88 m/s do escoamento para as faces *inlet*, *outlet* e *bottom* e *side*, já no *top* foi imposta a configuração de *pressure outlet*.

Ao variar a profundidade do tanque para águas rasas, é necessário alterar a condição de contorno para *Wall*, e selecionar no StarCCM+ a tensão cisalhante para *slip*, a fim de capturar a influência do fundo do tanque no escoamento do casco.

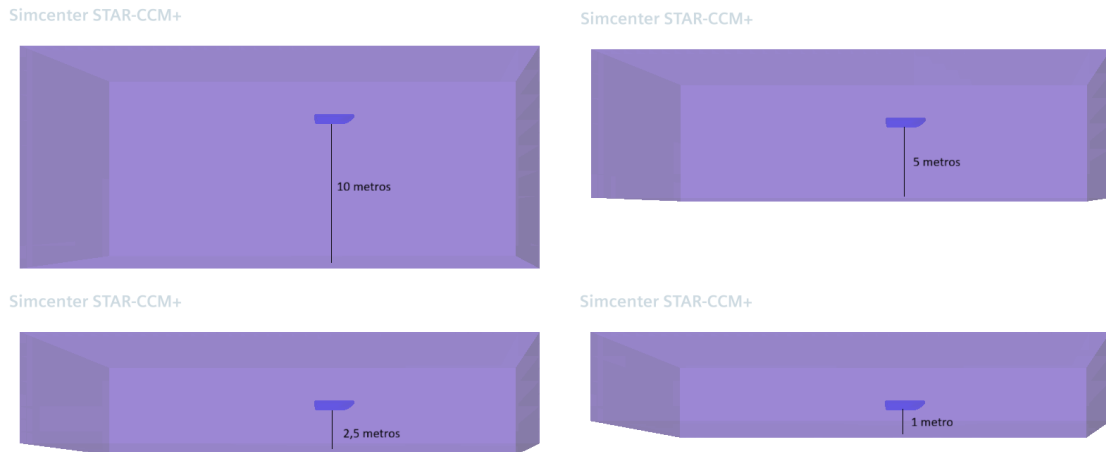


Figura 19-Variação de profundidade do domínio (imagem feita pela autora)

3.4 Passo de tempo

O passo de tempo foi definido de forma a satisfazer a condição de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL). A condição CFL impõe um limite ao número de pontos percorridos por uma partícula de fluido dentro de um intervalo de tempo igual ao passo de tempo, definido pelas condições do escoamento. Em outras palavras, é a relação entre a distância percorrida pelo fluido no passo de tempo e o tamanho linear da célula na direção do escoamento (Δx):

(3.7)

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x} < 1$$

Na configuração do setup do software StarCCM+ é possível definir a malha adaptativa impondo a condição média de $CFL < 1$, conforme figura abaixo.

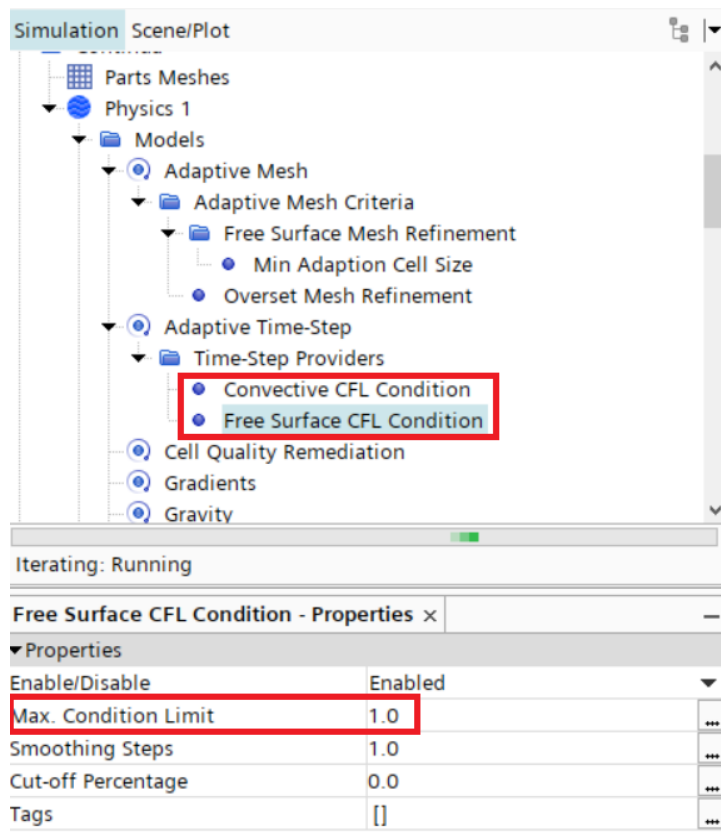


Figura 20-Configuração CFL no StarCCM+

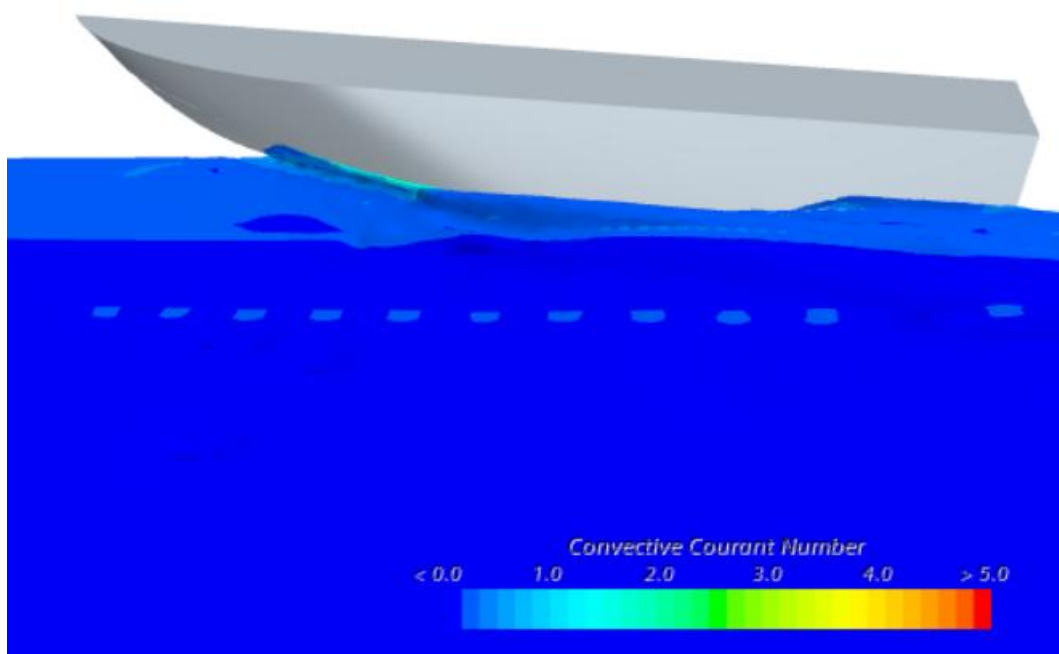


Figura 21-Courant Number

3.5 Geração da Malha

O processo de discretização do domínio em malhas computacionais constitui uma das etapas mais relevantes no emprego da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), pois exerce influência direta na precisão e confiabilidade dos resultados. O refinamento da malha determina a capacidade do modelo numérico em capturar gradientes de velocidade, pressão e turbulência, especialmente em regiões críticas como a proa, a popa, a superfície livre e a esteira.

O estudo de malha, também denominado *grid refinement study* ou *grid convergence study*, consiste na execução de simulações sucessivas com diferentes níveis de discretização, de modo a verificar a independência de malha. Esse conceito assegura que os resultados obtidos não dependem artificialmente do tamanho dos elementos, mas sim da formulação física e matemática subjacente. Em aplicações de hidrodinâmica naval, o procedimento é recomendado pelo International Towing Tank Conference (ITTC, 2011), como etapa para validação de resultados numéricos.

Além da garantia de confiabilidade, o estudo de malha permite estabelecer um compromisso entre custo computacional e acurácia. Malhas excessivamente refinadas aumentam o tempo de processamento e a demanda de recursos computacionais, enquanto malhas grosseiras podem introduzir erros de discretização relevantes. Assim, o processo de avaliação da independência de malha fornece subsídios para a escolha de uma malha ótima, que assegure precisão suficiente com esforço computacional aceitável (FERZIGER *et al.* (2002) e VERSTEEG *et al.* (2007)).

Cabe destacar que a documentação de um estudo de malha bem estruturado representa um requisito para a aceitação científica de resultados de CFD. Sem essa verificação, as conclusões obtidas podem ser questionadas quanto à sua robustez e validade.

No software STARCCM+, antes da malha ser gerada, é necessário realizar as configurações na camada limite, tais como a espessura da camada limite (δ), a taxa de crescimento de cada elemento dentro da camada limite (r) e o número de layers na camada limite (m).

Conforme proposto por WHITE *et al.* (2006), a espessura da camada limite pode ser estimada através da relação:

(3.8)

$$\frac{\delta}{L} = \frac{0,16}{Re_L^{1/7}}$$

O número de Reynolds é obtido através da formulação:

(3.9)

$$Re = \frac{\rho * V * L}{\mu} \rightarrow Re = \frac{V * L}{\nu}$$

Através do número de Froude, é obtida a velocidade do escoamento:

(3.10)

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g * L}} \rightarrow 0,8 = \frac{V}{\sqrt{9,81 * 2,4}} \rightarrow V = 3,88 \text{ m/s}$$

De posse da velocidade do escoamento, o número de Reynolds foi calculado:

(3.11)

$$Re = \frac{3,88 * 2,4}{0,00000089088} \rightarrow Re = 1,05 * 10^7$$

Substituindo o valor de Reynolds para obter a espessura da camada limite:

(3.12)

$$\frac{\delta}{2,4} = \frac{0,16}{(1,05 * 10^7)^{1/7}} \rightarrow \delta = 0,038155 \text{ m}$$

A espessura do primeiro *layer* da camada limite é dada pela equação:

(3.13)

$$\frac{Y^+}{X} = \frac{0,487}{\nu * \ln(0,06 * Re)} * V$$

Para simulações nas quais os efeitos viscosos na camada limite não são predominantes, o valor de Y^+ pode variar entre $30 > Y^+ > 500$. Para esta simulação, foi adotado Y^+ igual a 100.

(3.14)

$$\frac{100}{X} = \frac{0,487}{0,00000089088 * \ln(0,06 * 10457362)} * 3,88 \rightarrow X = 0,00089 \text{ m}$$

Com o valor da espessura do primeiro layer da camada limite, foi calculado o número de *layers*, considerando uma taxa de crescimento da camada limite de 1,3.

(3.15)

$$m = \frac{\ln \left(1 - (1 - r) * \frac{\delta}{X} \right)}{\ln r} \rightarrow m = \frac{\ln \left(1 - (1 - 1,3) * \frac{0,038155}{0,00089} \right)}{\ln 1,3} \rightarrow m = 10,022$$

Os cálculos apresentados acima foram detalhados com o objetivo de demonstrar o processo utilizado na configuração da malha. Trata-se de um procedimento iterativo, no qual os parâmetros são ajustados progressivamente, e a qualidade da malha é avaliada a cada etapa. A tabela a seguir apresenta os valores adotados e obtidos para a espessura da camada limite, a taxa de crescimento e a espessura do primeiro layer dessa camada.

Tabela 5-Parâmetros camada limite

δ [m]	X[m]	r	m _{setup}
0,038155	0,00089	1,05	24
0,038155	0,00089	1,10	18
0,038155	0,00089	1,15	15
0,038155	0,00089	1,20	13
0,038155	0,00089	1,25	12
0,038155	0,00089	1,30	11
0,038155	0,00089	1,35	10
0,038155	0,00089	1,40	9
0,038155	0,00089	1,45	9
0,038155	0,00089	1,50	8

4 Resultados e Discussões

A malha utilizada para realizar as simulações com redução de profundidade foi a malha média, com as seguintes características, para 10 metros de profundidade:

Tabela 6- Características da malha

Qualidade da Malha	Medium
Tamanho Base	*sqrt(2)
Nº de elementos Overset	153584
Nº de elementos Tank	869431
Nº de elementos Total	1023015

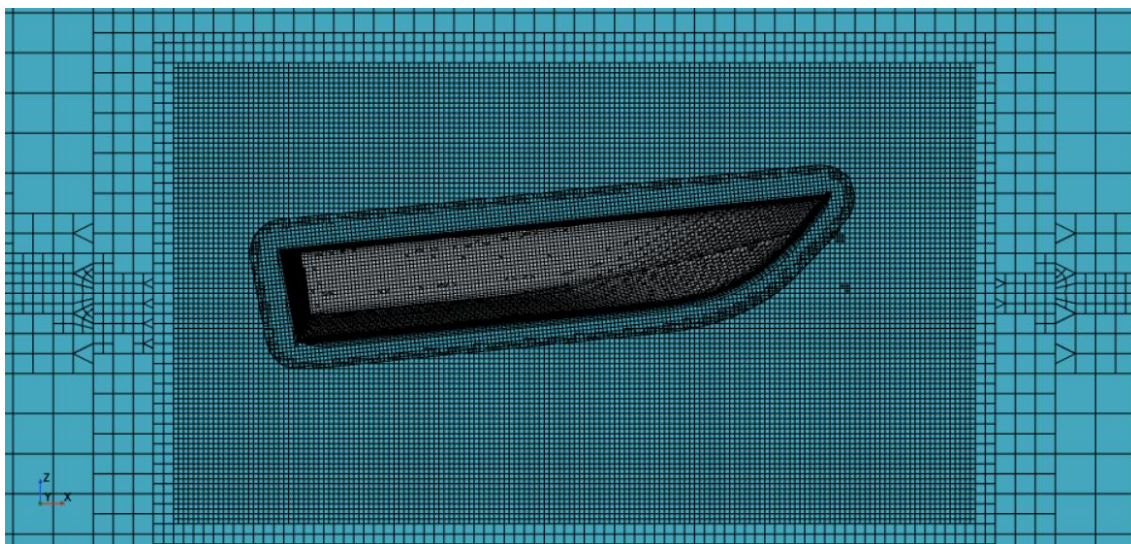


Figura 22- Malha

A análise dos resultados apresentados demonstra que a profundidade da lâmina d'água exerce influência direta sobre o desempenho hidrodinâmico da embarcação, ainda que com variações sutis nos parâmetros de afundamento, trim e resistência total, devido às dimensões do modelo.

Em águas profundas (10 m), a embarcação apresenta um afundamento de 0,0253 m, trim de $-5,68^\circ$ e resistência total de 158,94 N, valores que podem ser considerados representativos da condição de referência, sem interferência do fundo. À medida que a profundidade é reduzida para 5 m e 2,5 m, observa-se ligeira redução do afundamento e variações no trim, o que indica uma interação inicial entre o escoamento e o fundo, embora sem alteração drástica do comportamento global. Nessas condições intermediárias, a resistência total aumenta levemente, atingindo 160,75 N em 2,5 m, correspondendo a um acréscimo de cerca de 1,1% em relação ao caso de 10 m, o que

pode ser atribuído ao aumento da velocidade do escoamento sob o casco e à geração de ondas fenômenos típicos da aproximação do regime crítico.

Por outro lado, ao atingir 1,0 m de profundidade, observa-se uma redução da resistência total para 154,49 N, mesmo com valores praticamente constantes de afundamento (0,0247 m) e trim (-5,60°). Esta redução da resistência ao avanço na região de regime crítico para supercrítico, também foi observado no estudo de RADOJCIC et al. (2010), conforme figura 23, onde R_{Wh} é a resistência de ondas em águas rasas e R_{Wd} é a resistência de ondas em águas profundas

- Região subcrítica ($F_{nh} < 0,7$): os efeitos da profundidade são praticamente desprezíveis;
- Região crítica ($0,7 < F_{nh} < 1,2$): R_{Wh} aumenta de forma acentuada;
- Região supercrítica ($F_{nh} > 1,2$): R_{Wh} pode ser menor que R_{Wd}

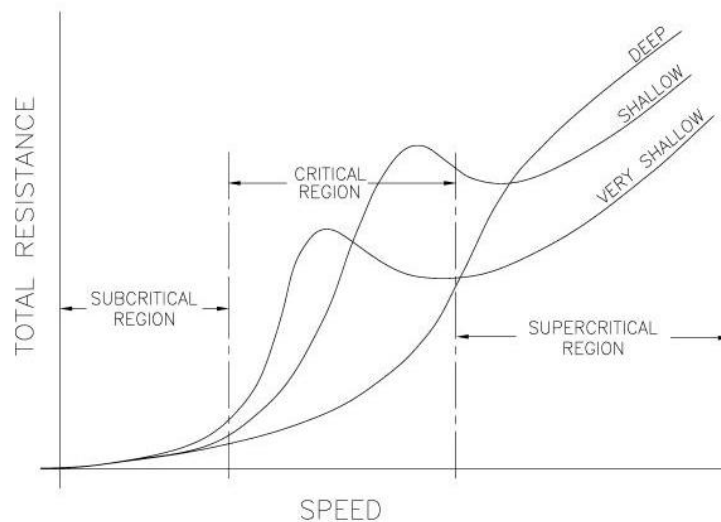


Figura 23-Resistência em função da velocidade e profundidade

Assim, conclui-se que:

- Para profundidades intermediárias (5–2,5 m), ocorre aumento moderado da resistência, devido à restrição do escoamento e intensificação da geração de ondas;
- Para profundidades muito rasas (1,0 m), ocorre redução da resistência total, sugerindo de efeitos de sustentação hidrodinâmica no casco e efeito de águas rasas na resistência de ondas;
- As variações de trim e afundamento permanecem pequenas, enquanto que a influência da profundidade se manifesta principalmente na resistência ao avanço.

Esses resultados corroboram observações experimentais e computacionais, e destacam o comportamento não linear da resistência de embarcações de planeio em função da profundidade relativa e do número de Froude por profundidade.

Tabela 7-Resultados para águas profundas e águas rasas

F_{nh}	Profundidade	Afundamento (m)	Trim (°)	Total drag (N)
0,39	10 metros	0,0253	-5,677	158,935
0,55	5 metros	0,025	-5,64	159,056
0,78	2,5 metros	0,0245	-5,87	160,748
1,24	1,0 metros	0,0347	-5,598	154,494

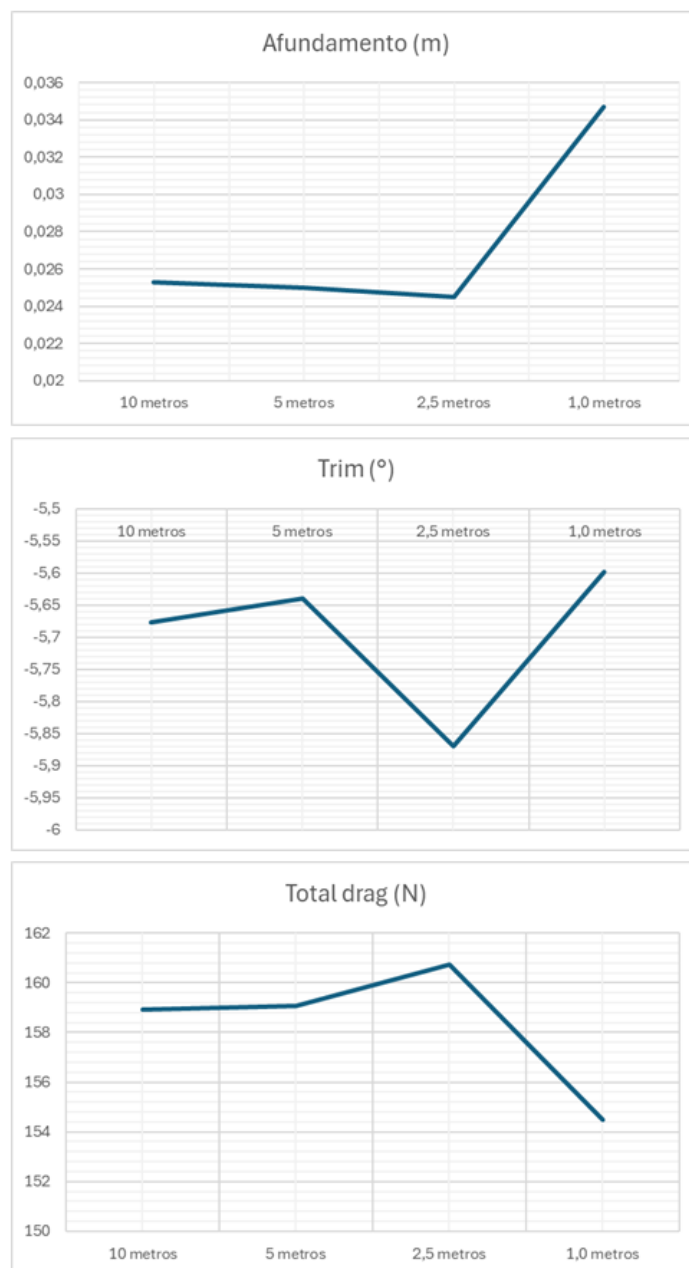


Figura 24-Gráficos de resultados para águas profundas, intermediárias e águas rasas

Tabela 8-Diferença dos resultados entre profundidades de 10 metros e 1 metro

Diferença entre águas profundas e águas rasas	Afundamento (m)	Trim (°)	Total drag (N)
	-2,372%	-1,392%	-2,794%

4.1 Comparação com método empírico

A comparação entre os resultados obtidos pelo método empírico de Savitsky e pela simulação numérica via CFD evidencia uma boa concordância geral nos valores de resistência total e de trim dinâmico.

O método de Savitsky estimou uma resistência total de 153,2 N, enquanto o modelo CFD apresentou 158,94 N, resultando em uma diferença de aproximadamente 3,6%. Essa variação é considerada aceitável dentro dos limites usuais de incerteza para comparações entre métodos empíricos e numéricos, especialmente considerando as simplificações assumidas no modelo de Savitsky.

Em relação ao trim dinâmico, o método de Savitsky previu um valor de $-5,74^\circ$, enquanto o CFD resultou em $-5,68^\circ$, representando uma diferença de apenas 1,13%. Essa proximidade confirma que os métodos capturam de forma coerente o equilíbrio hidrodinâmico entre sustentação e resistência, o que reforça a validade do modelo empírico para condições de planeio em águas profundas.

De modo geral, os resultados demonstram que o método de Savitsky, embora simplificado, fornece estimativas adequadas do comportamento global da embarcação, enquanto o CFD permite análises mais detalhadas do campo de escoamento e da distribuição de pressões no casco. A concordância entre os métodos indica que a abordagem numérica foi implementada corretamente e representa com boa precisão o regime de planeio avaliado.

Tabela 9-Comparação entre método CFD e Savitsky

Método	Total drag (N)	Trim (°)
CFD	158,935	-5,677
Savitsky	144,51	-5,741
Diferença (%)	-9,076%	1,127%

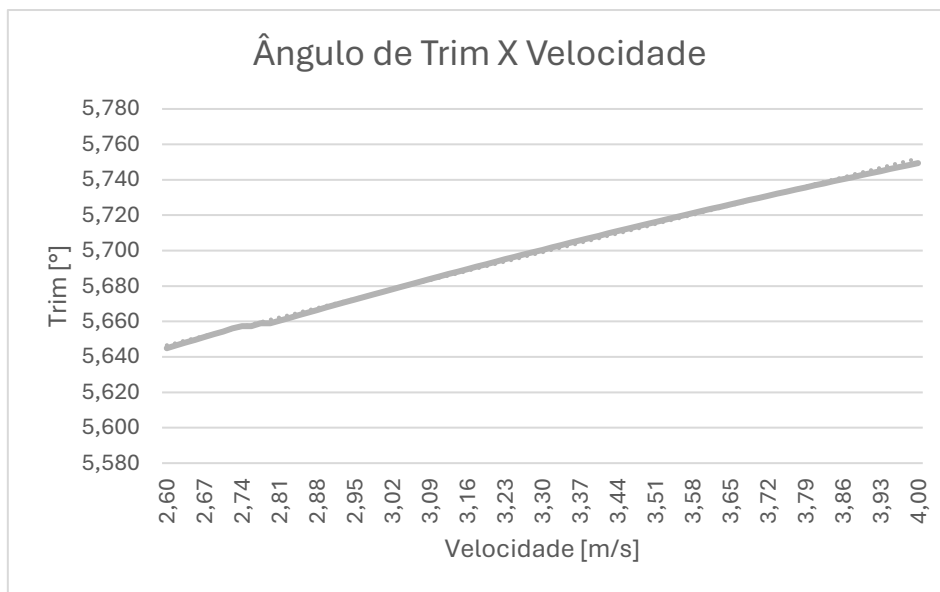


Figura 25-Estimativa de trim por Savitsky

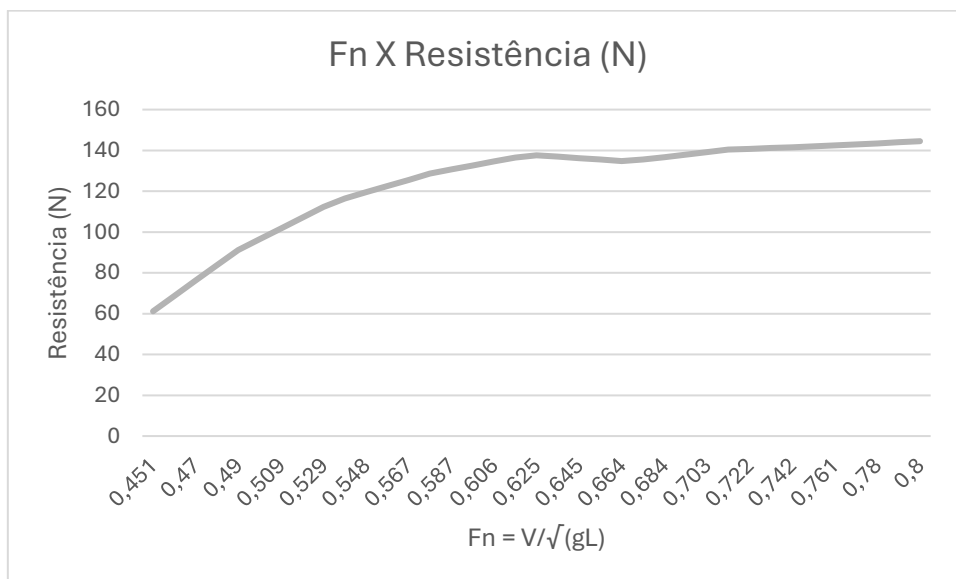


Figura 26-Estimativa de resistência ao avanço por Savitsky

4.2 Ondas de Kelvin

Os estudos de Lord Kelvin mostram que as ondas formadas pelo casco em deslocamento, permanecem dentro de uma região em formato “V”, e apresenta ângulo máximo em torno de $19,48^\circ$. As simulações realizadas indicaram que este valor se preserva para águas profundas e rasas.

Este ângulo é nítido para número de Froude, em relação ao comprimento do casco, em torno de 0,5. Porém, ao aumentar a velocidade, o que é observado é uma redução do ângulo aparente de Kelvin, também conhecido na literatura científica como *Narrow Angle*. Tal ângulo aparente é formado pelas máximas amplitudes do grupo de ondas gerado pelo casco

As simulações realizadas resultaram em ângulos aparentes próximos de 11° . Esses valores são coerentes com o comportamento esperado para os números de Froude observados, uma vez que o aumento do Froude (seja pela elevação da velocidade ou pela redução da profundidade efetiva) tende a comprimir o padrão de ondas, reduzindo o ângulo das frentes divergentes.

Fisicamente, esse fenômeno decorre do fato de que, à medida que o número de Froude relativo à profundidade se eleva, a componente transversal das ondas perde intensidade, predominando as ondas divergentes mais alongadas e de menor inclinação em relação à direção de avanço.

Assim, o ângulo aparente médio obtido em torno de 11° demonstra consistência com previsões teóricas e observações experimentais para embarcações operando próximas ao regime crítico. A redução do ângulo aparente observada reforça a coerência do modelo numérico e evidencia a influência direta do número de Froude sobre a formação e a propagação das ondas de superfície, aspecto que, valida o comportamento hidrodinâmico do casco.

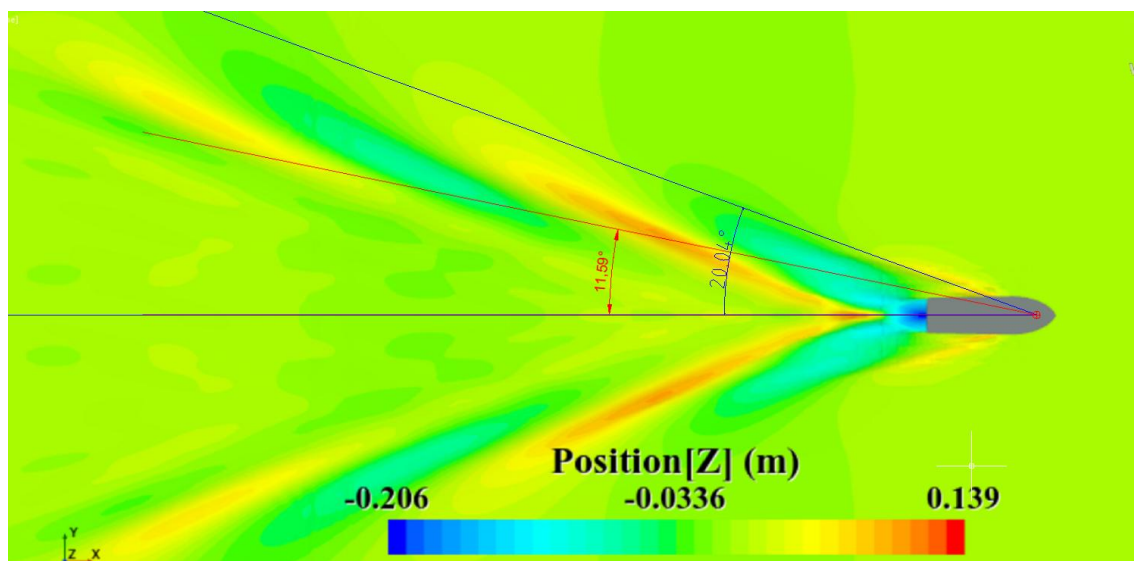


Figura 27-Profundidade 10 metros, F_{nh} 0,39

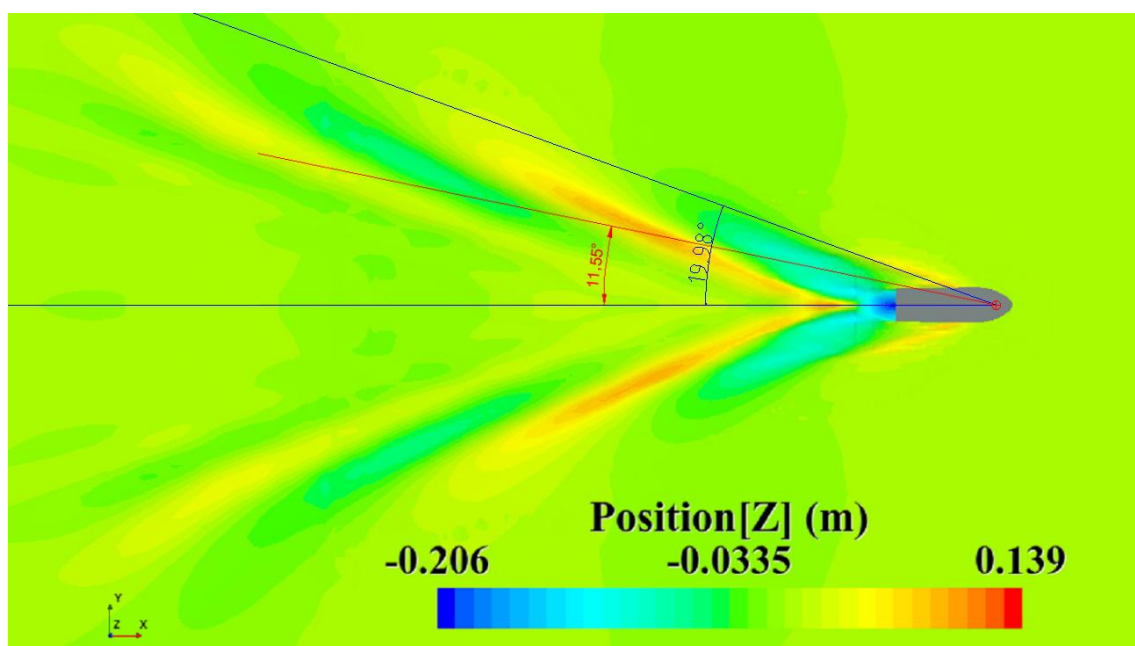


Figura 28-Profundidade 5 metros, F_{nh} 0,55

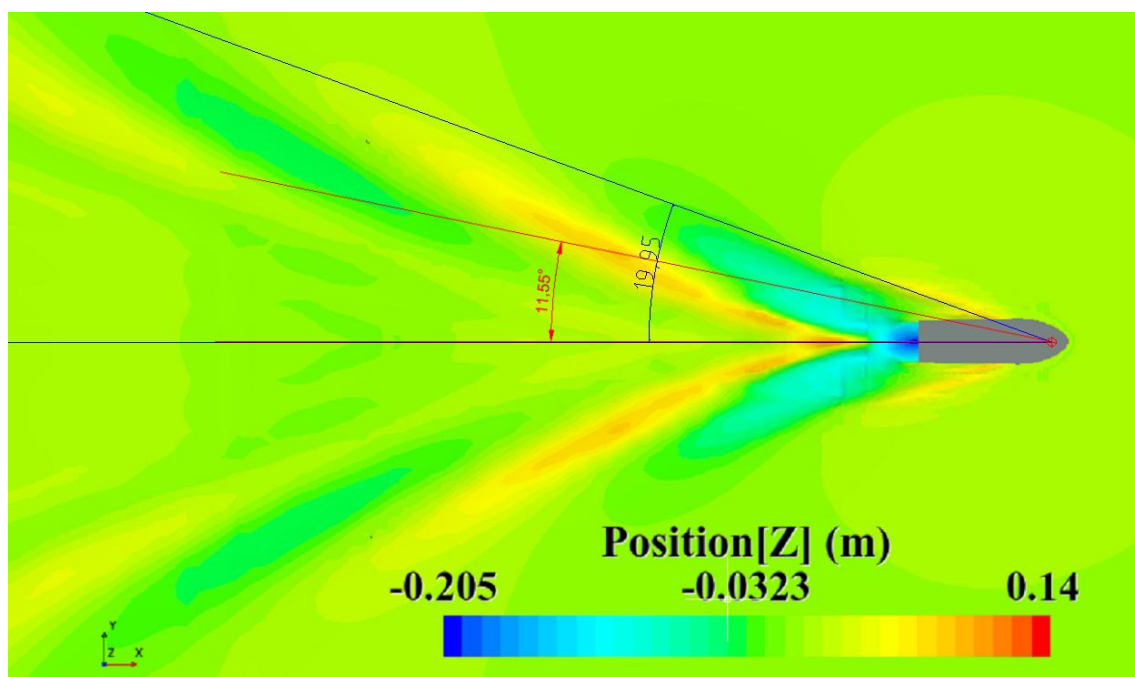


Figura 29-Profundidade 2,5 metros, F_{nh} 0,78

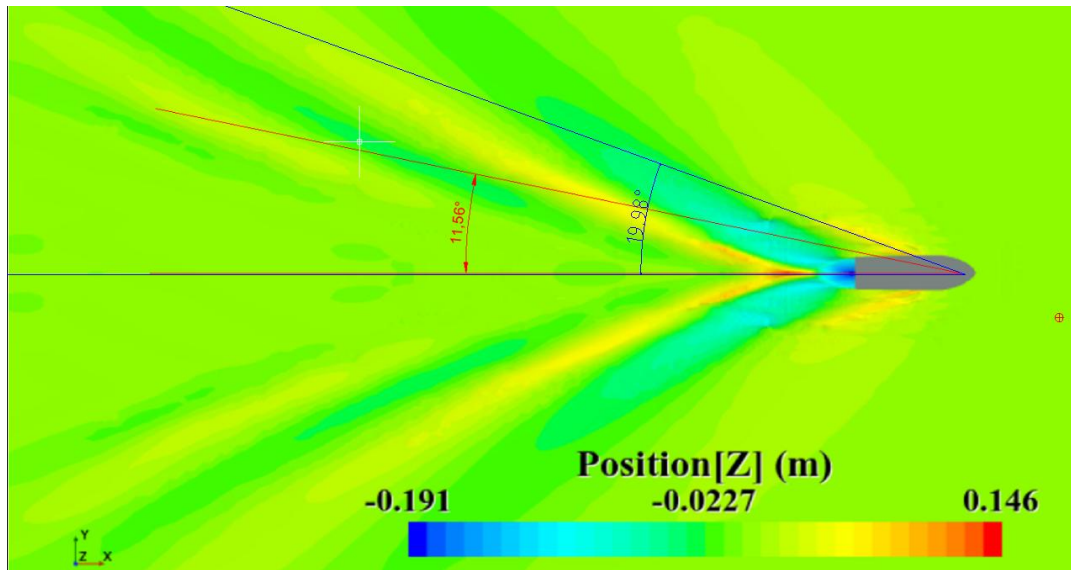


Figura 30-Profundidade 1 metro, F_{nh} 1,24

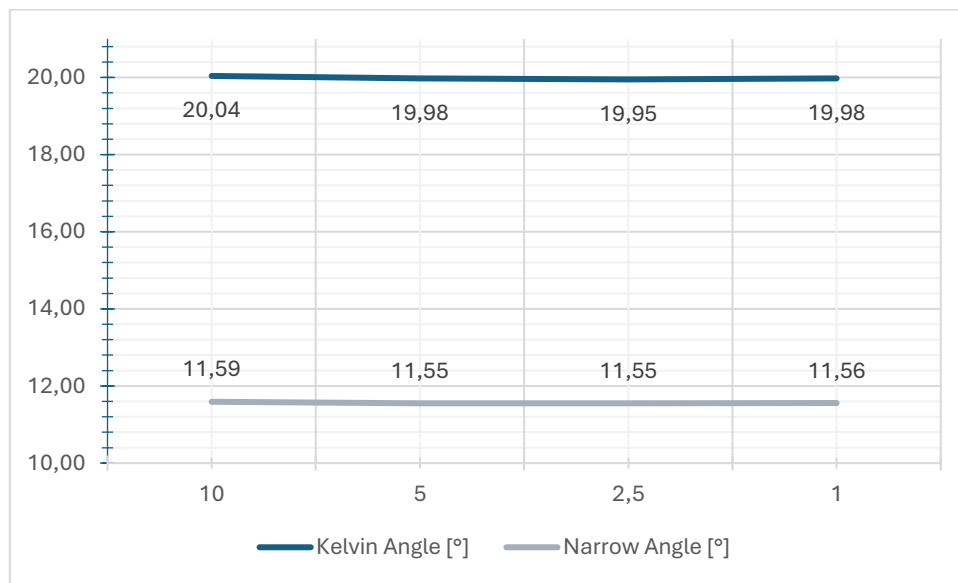


Figura 31-Gráfico Kelvin Angle e Narrow Angle

5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos neste estudo permitiram analisar o comportamento hidrodinâmico de uma embarcação de planeio operando sob diferentes profundidades de lâmina d'água, com base em simulações numéricas e parâmetros característicos de afundamento, trim e resistência total.

De modo geral, observou-se que a profundidade da lâmina d'água exerce influência direta sobre a resistência ao avanço, também nas embarcações de alto desempenho. Para condições intermediárias de profundidade, verificou-se um aumento gradual da resistência total, associado à restrição do escoamento sob o casco e à maior interação com o fundo, o que caracteriza o regime crítico. Por outro lado, quando a embarcação opera em profundidades muito rasas, ocorre uma redução da resistência, indicando a transição para o regime supercrítico, em que os efeitos de águas rasas se tornam relevantes.

O comportamento observado está em consonância com estudos da comunidade científica, confirmando que o efeito da profundidade é não linear e que as condições de regime crítico representam a faixa mais sensível da operação em águas rasas, exigindo atenção especial em termos de projeto, desempenho e segurança da navegação.

Em termos metodológicos, este trabalho demonstrou que o uso de simulações CFD é uma ferramenta eficaz para a análise de embarcações de planeio, permitindo decompor as componentes de resistência (de pressão e de cisalhamento), visualizar o campo de velocidades e avaliar efeitos locais de pressão e sustentação, de modo não acessível por métodos empíricos.

Como continuidade desta pesquisa, sugere-se estudos com maiores números de Froude, a fim de comparar com resultados experimentais obtidos na comunidade científica, modelos de maiores dimensões, com a finalidade de avaliar a influência da escala nos resultados, variação geométrica para investigação da influência de ângulo de deadrise, posição do centro de gravidade e superfície molhada sobre a transição entre regimes subcrítico e supercrítico, e por fim, realização de ensaios em tanque de provas com variação controlada da profundidade, a fim de validar os resultados numéricos e quantificar as incertezas associadas às simulações.

Em resumo, este trabalho contribui para entender melhor os fenômenos hidrodinâmicos que influenciam o desempenho de embarcações de planeio em águas rasas, fornecendo informações técnicas e metodológicas que podem ajudar a melhorar futuras diretrizes de projeto e simulações computacionais, operação e segurança na área da engenharia naval.

6 Referências

DEAN, R., DALRYMPLE R., *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, 1 ed, Flórida, Estados Unidos da América, World Scientific Publishing Company, 1991.

DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS. *Diretor De Portos E Costas Esclarece Dúvidas Sobre Segurança Da Navegação*. Marinha Do Brasil. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/noticias/diretor-de-portos-e-costas-esclarece-duvidas-sobre-seguranca-da-navegacao>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

DUARTE, H., DROGUETT E.; MARTINS M., et al., “Review of practical aspects of shallow water and bank effects”, *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A: International Journal of Maritime Engineering*, v. 158, p. 177–186, 2016.

FAHRNHOLZ, S. *Numerical Investigation of the Muddy Seabed Influence on Ship Navigation*, MSc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2024.

FALTINSEN, O. M., *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*, 1ª ed, Nova Iorque, Estados Unidos da América, Cambridge University Press, 2006.

FELIX A., *Sistema de Posicionamento Dinâmico: O Surgimento, Desenvolvimento, Benefícios, Problemas e Operacionalidade*. Centro de Instrução Almirante Graça Aranha – CIAGA, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

FERZIGER, J., PERIĆ, M., *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, 3ª ed, Nova Iorque, Estados Unidos da América, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.

ITTC – International Towing Tank Conference. *Recommended Procedures and Guidelines, Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures*, 2011

ITTC facilities. Disponível em: <https://ittc.info/facilities/>. Acesso em: 01 de outubro de 2025, 16:35:10.

JUDGE C., MOUSAVIRAADB M., STERN F., et al., “Experiments and CFD of a high-speed deep-V planing hull—Part I: Calm water”, *Applied Ocean Research*, v. 96, n. 102060, Março, 2020.

LAUNDER B., SPALDING D., “The Numerical Computation of Turbulent Flows”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 3, n. 2, p. 269–289, 1974.

MAVER, K., “Kelvin Ship Waves”, University of Liubliana, Eslovênia, 2004.

NIKSERESHT, A., SAFARI A., “Numerical investigation of shallow water resistance of a planing vessel”, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, v. 3, n. 2372-3971, Abril 2016.

PENNINO S., KLYMENKO H., SCAMARDELLA A, et al., “Three-Dimensional Pressure Distribution on Planing Hulls”, *Proceedings of the 3rd International Conference on Maritime Technology and Engineering*, p. 353-360, Lisboa, Portugal, 4-6 Julho 2016.

RADOJCIC, D., BOWLES, J., “On High-Speed Monohulls in Shallow Water”, *The Second Chesapeake Power Boat Symposium*, Anapolis, Maryland, Estados Unidos da América, Março 2010.

RICCIARDO, M., “Planning Hull Hydrodynamics”, Universidade de Michigan, Michigan, Estados Unidos da América, 2010.

SOUZA, A.R.; AGUIAR, C.E., “Ondas, Barcos e o Google Earth”, *XII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física – Águas de Lindóia*, Rio de Janeiro, Brasil, 24 - 28 Outubro, 2010.

SPHAIER, S.H., “Hidrodinâmica”, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, Março, 2013.

TAVAKOLI, S., ZHANG, M., KONDRATENKO, A., et al., “A review on the hydrodynamics of planing hulls”, *Ocean Engineering*, v. 303, n. 117046, Julho 2024.

UTOMO, B., SAMUEL, MANIK P., *et al.*, “Hydrodynamic Analysis of High-Speed Vessels in Shallow and Deep Water Using CFD”, *Journal of Marine Science and Technology*, v. 22, n. 3, pp. 146 – 153, outubro, 2023.

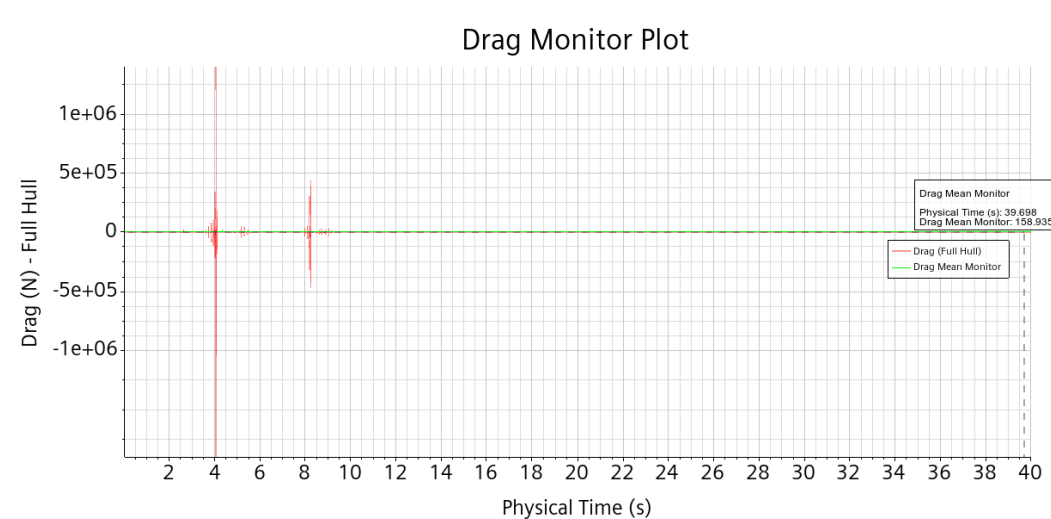
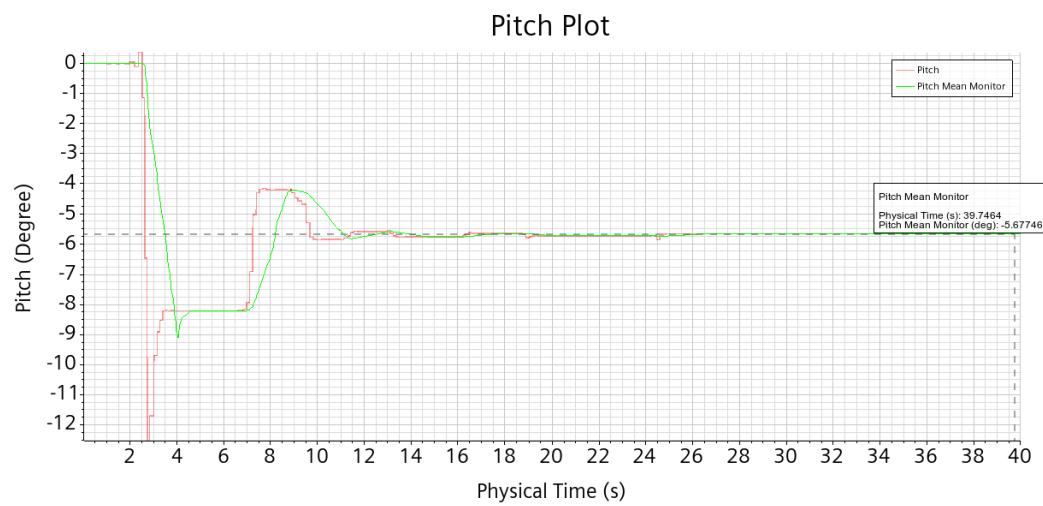
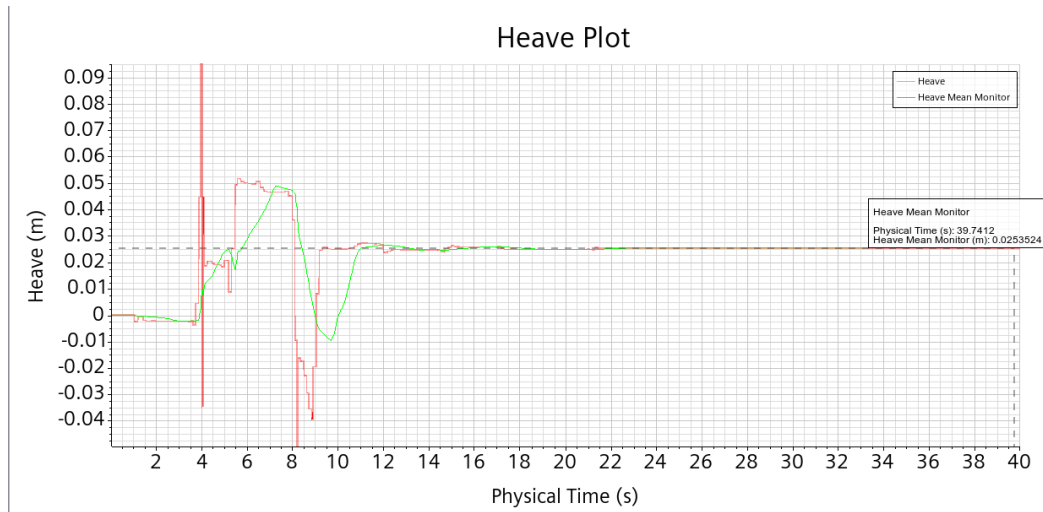
VERSTEEG, H., MALALASEKERA, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2^a ed, Londres, Reino Unido, Pearson, 2007.

WANG, S., CHOI J., KIM Y., “CFD Study on Seakeeping Performance of Planing Hulls”, *40th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Seoul, Korea, 11 – 14 Maio, 2025.

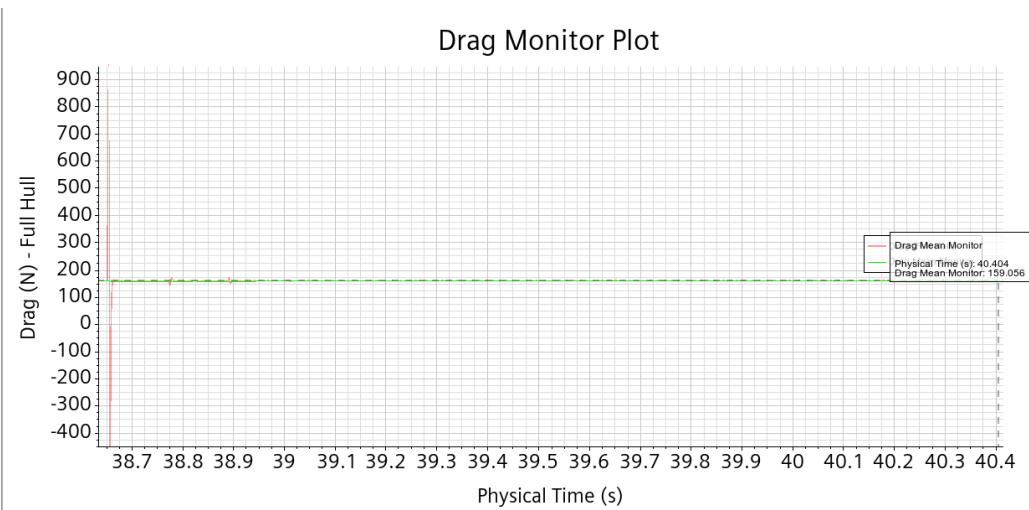
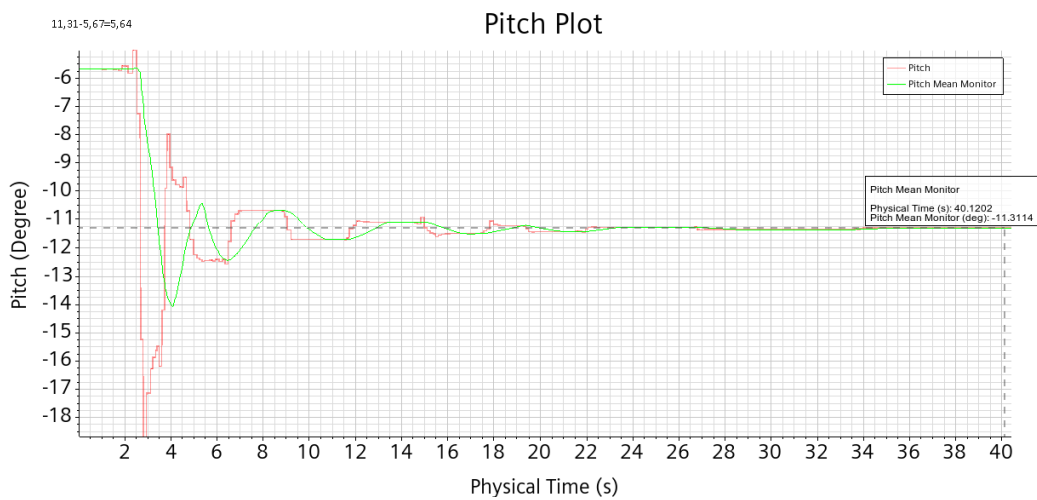
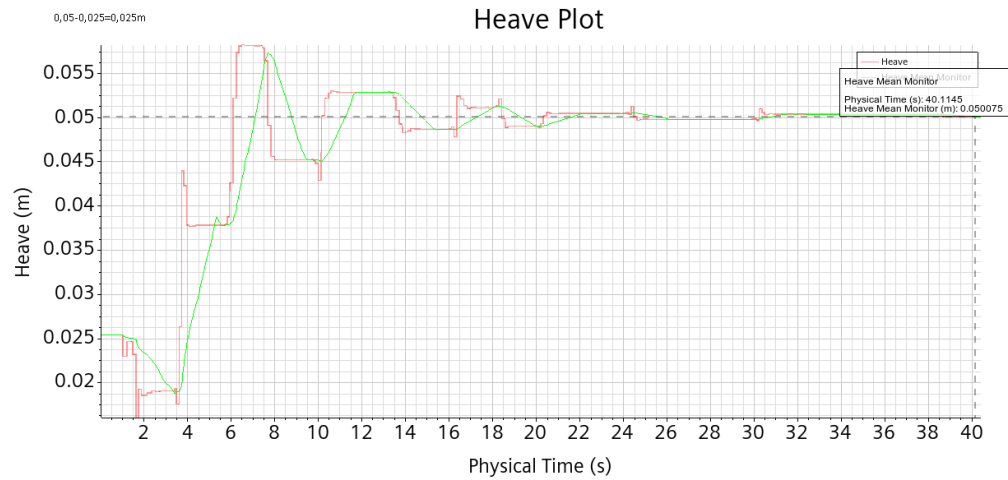
WHITE F., CORFIELD I., *Viscous Fluid Flow*, 3^a ed, Nova Iorque, Estados Unidos da América, McGraw Hill, 2006.

Apêndice A

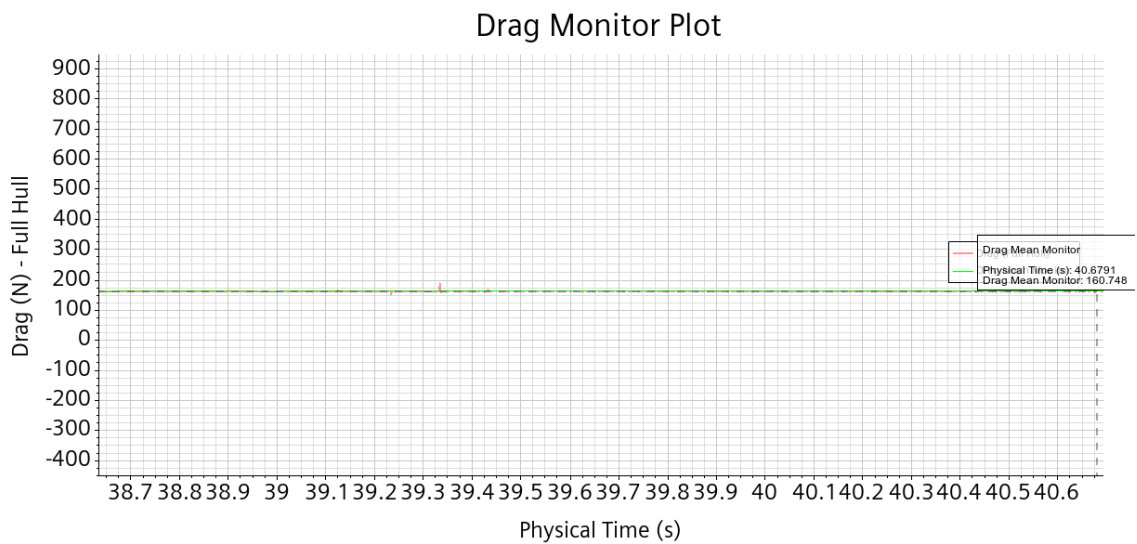
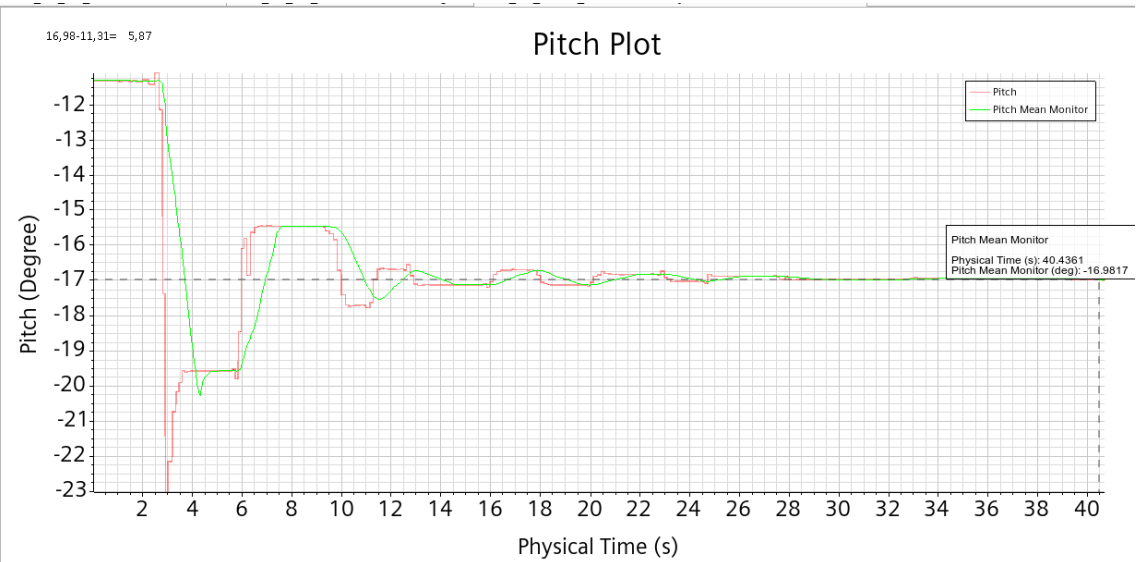
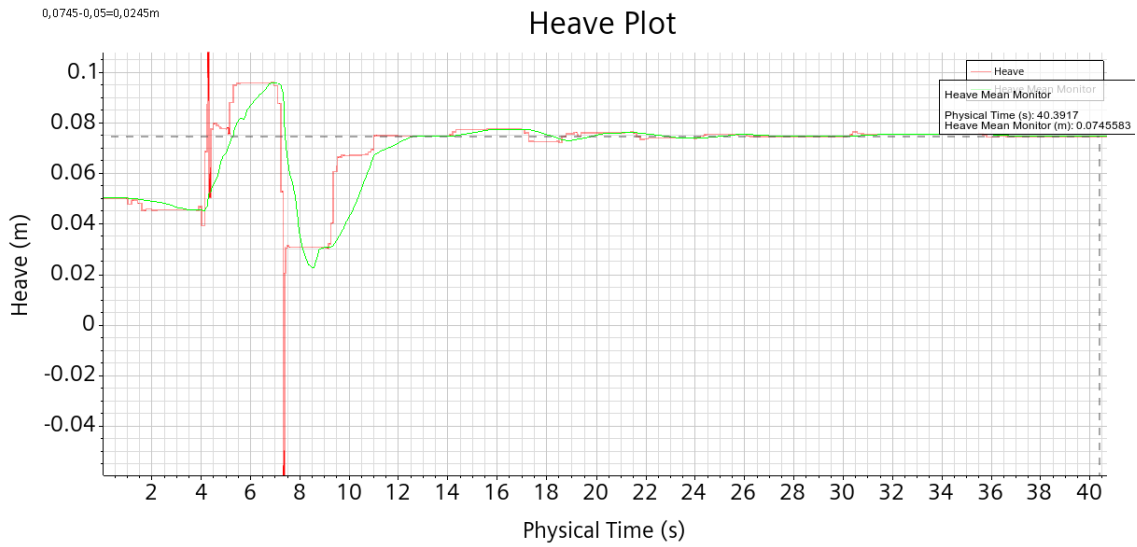
- 10 metros de profundidade



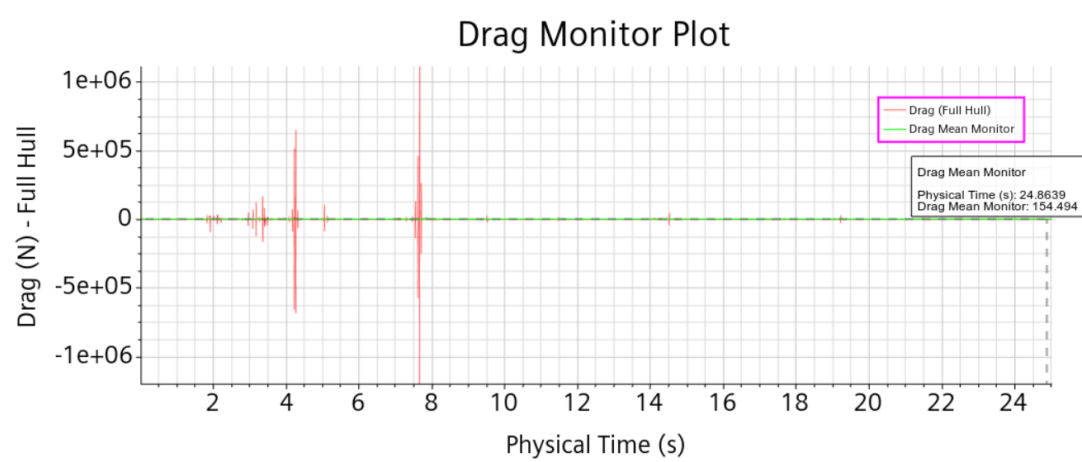
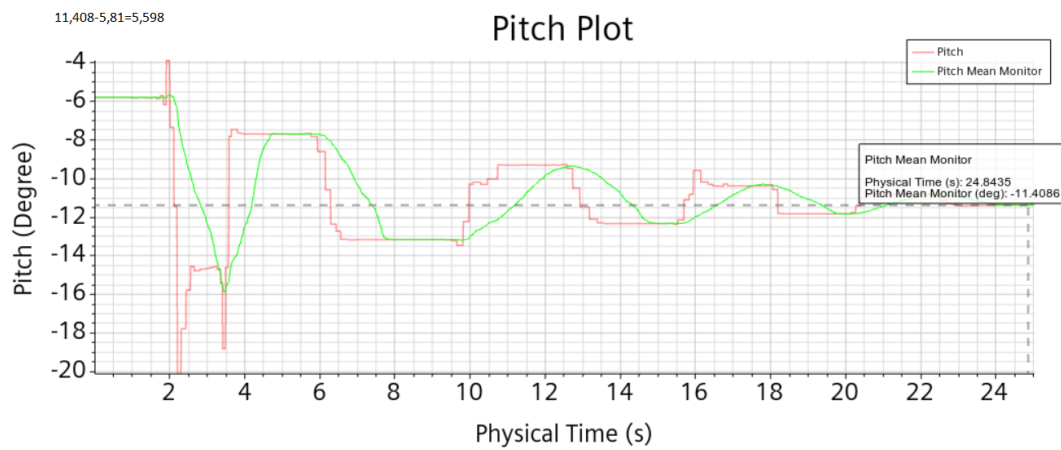
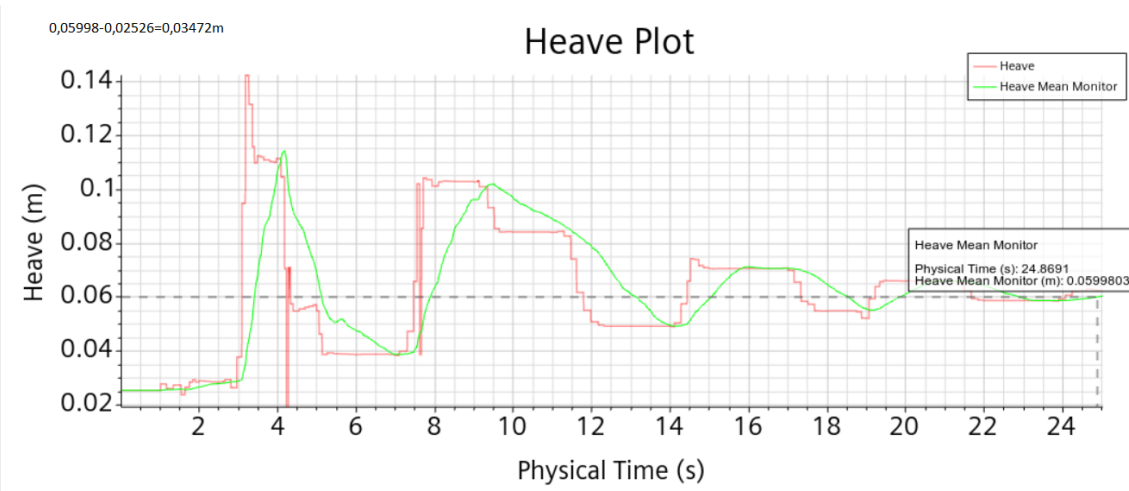
- 5 metros de profundidade



- 2,5 metros de profundidade



- 1,0 metro de profundidade



Apêndice B – Resultados Savitsky

Velocidade (m/s)	Ângulo de Planeio (°)
2,60	-5,749
2,62	-5,748
2,64	-5,747
2,65	-5,746
2,67	-5,745
2,69	-5,744
2,71	-5,743
2,72	-5,741
2,74	-5,740
2,76	-5,739
2,78	-5,738
2,79	-5,737
2,81	-5,736
2,83	-5,734
2,85	-5,733
2,86	-5,732
2,88	-5,731
2,90	-5,730
2,92	-5,729
2,93	-5,727
2,95	-5,726
2,97	-5,725
2,99	-5,724
3,00	-5,722
3,02	-5,721
3,04	-5,720
3,06	-5,719
3,07	-5,717
3,09	-5,716
3,11	-5,715
3,13	-5,714
3,14	-5,712
3,16	-5,711
3,18	-5,710
3,20	-5,708
3,21	-5,707
3,23	-5,706
3,25	-5,704
3,27	-5,703
3,28	-5,702
3,30	-5,700
3,32	-5,699

3,34	-5,698
3,35	-5,696
3,37	-5,695
3,39	-5,694
3,41	-5,692
3,42	-5,691
3,44	-5,690
3,46	-5,688
3,48	-5,687
3,49	-5,685
3,51	-5,684
3,53	-5,683
3,55	-5,681
3,56	-5,680
3,58	-5,678
3,60	-5,677
3,62	-5,675
3,63	-5,674
3,65	-5,672
3,67	-5,671
3,69	-5,669
3,70	-5,668
3,72	-5,666
3,74	-5,665
3,76	-5,663
3,77	-5,662
3,79	-5,660
3,81	-5,659
3,83	-5,657
3,84	-5,657
3,86	-5,656
3,88	-5,656
3,90	-5,654
3,91	-5,653
3,93	-5,651
3,95	-5,650
3,97	-5,648
3,98	-5,646
4,00	-5,645

Velocidade (m/s)	Froude	Resistência (N)
2,188	0,451	61,15
2,235	0,461	68,69
2,282	0,47	76,24
2,329	0,48	83,79
2,376	0,49	91,18
2,423	0,499	96,44
2,47	0,509	101,71
2,517	0,519	106,99
2,564	0,529	112,26
2,611	0,538	116,45
2,658	0,548	119,48
2,705	0,558	122,51
2,752	0,567	125,55
2,799	0,577	128,59
2,846	0,587	130,64
2,893	0,596	132,59
2,94	0,606	134,54
2,987	0,616	136,49
3,034	0,625	137,62
3,081	0,635	136,9
3,128	0,645	136,19
3,175	0,654	135,48
3,222	0,664	134,78
3,269	0,674	135,48
3,316	0,684	136,73
3,363	0,693	137,98
3,41	0,703	139,24
3,457	0,713	140,39
3,504	0,722	140,78
3,551	0,732	141,17
3,598	0,742	141,57
3,645	0,751	141,97
3,692	0,761	142,43
3,739	0,771	142,94
3,786	0,78	143,46
3,833	0,79	143,98
3,88	0,8	144,51