

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/345385130>

Estimativa da Resistência ao Avanço de uma Balsa por Software Livre e Comparação com o Método Holtrop

Conference Paper · November 2020

DOI: 10.1.1.7648/sobena-2020-122818

CITATIONS

0

READS

27

4 authors, including:



Otavio Heckler

Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

1 PUBLICATION 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Jean David Caprace

Federal University of Rio de Janeiro

105 PUBLICATIONS 282 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Crístofer Hood Marques

Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

24 PUBLICATIONS 45 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Decommissioning of Subsea Assets [View project](#)



A Dynamic Port Congestion Indicator – A Case Study of the Port of Rio de Janeiro [View project](#)



28º Congresso Internacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore

Rio de Janeiro/RJ, 19-21 de outubro de 2020

Estimativa da resistência ao avanço de uma balsa por software livre e comparação com o método Holtrop

Otávio Duarte Aires Heckler, FURG/PPGEO, Rio Grande/Brasil, otaviooduarte@gmail.com

Jeferson Avila Souza, FURG/PPGEO, Rio Grande/Brasil, jasouza@furg.br

Jean-David Caprace, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro/Brasil, jdcaprace@oceanica.ufrj.br

Cristofer Hood Marques, FURG/PPGEO, Rio Grande/Brasil, cristoferhood@furg.br

Resumo

Na navegação em hidrovias, a preocupação com as emissões é ainda maior do que em relação a navegação marítima porque os navios operam perto de áreas urbanas ou em reservas naturais, tornando a necessidade de proporcionar uma navegação ecológica de importância primordial. Nesse contexto, uma análise da potência requerida da embarcação é necessária e com esse propósito foi realizado o estudo de uma balsa. O principal objetivo desse estudo foi analisar a resistência ao avanço no casco da balsa em escala real. Dessa forma foi desenvolvido um modelo computacional para estimar a resistência ao avanço da balsa. Esse modelo foi baseado no método VOF (volume of fluid) para escoamentos multifásicos (água e ar) a partir do solver interFoam utilizando o programa OpenFOAM. O solver resolve as equações de Navier-Stokes para dois fluidos isotérmicos, imiscíveis e incompressíveis. A abordagem do escoamento turbulento foi realizada com a modelagem RANS (Reynolds-Average-Navier-Stokes) com o modelo SST K- ω . Após validar o modelo numérico com uma referência da literatura de um ensaio experimental, a curva velocidade-resistência obtida é comparada com a proveniente do método Holtrop para quantificar os desvios entre essas abordagens. Por fim, para aproximar os resultados fornecidos por Holtrop, um valor para o coeficiente de área no plano da água é recomendado, visto que o valor unitário resulta em resistência infinita.

1. Introdução

O transporte hidroviário é um tipo de transporte aquaviário realizado nas hidrovias para o transporte de pessoas e mercadorias e a escolha da embarcação adequada é importante. A construção de uma embarcação é uma tarefa complexa, e descobrir a potência propulsiva necessária é fundamental para o seu projeto e operação. São necessários conhecimentos das resistências e dos coeficientes de forças propulsivas para o dimensionamento adequadamente da potência dos motores e seus equipamentos auxiliares. O dimensionamento correto da embarcação serve para melhorar a eficiência energética e diminuir a

emissão de poluentes no meio ambiente. Conforme os dados da Comissão Econômica para a Europa, Comitê de Transporte Terrestre das Nações Unidas (ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE – INLAND TRANSPORT COMMITTEE, 1996), as vantagens do transporte por vias navegáveis fluviais são as seguintes: custo-efetividade, menor consumo de energia de propulsão, menor quantidade de material necessário para a construção dos meios de transporte por tonelada da carga transportada, segurança de navegação, tipo de transporte de carga ambientalmente mais sustentável, menos uso da terra (solo). Por outro lado, as principais desvantagens da navegação por vias navegáveis interiores são as seguintes: expansão geográfica

limitada, Influência pronunciada das condições hidro meteorológicas atuais e nível de qualidade do serviço de tráfego. Dessa forma, pode-se considerar o transporte hidroviário como uma boa solução para a redução de custos logísticos e também como menos poluidor do que outros meios de transporte e paralelamente a isso, o Brasil tem um grande potencial pela sua vasta malha hidroviária.

As dimensões dos navios de navegação interior, como comprimento, boca e calado, são limitadas pelas seções transversais disponíveis e profundidades das principais vias navegáveis. Mesmo assim, as embarcações de hidrovias tendem a crescer devido à grande demanda por capacidade de navegação. Enquanto elas tendem a aumentar em tamanho, a profundidade e largura das vias navegáveis permanecem constantes e desse modo restringem seu crescimento.

Com a finalidade de obter resultados com uma boa precisão, uma alternativa é a aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacionais (Computational Fluid Dynamics – CFD). Estudos mostram que essa tecnologia vem sendo amplamente utilizada para análise de fluxos em torno de navios (LARSSON; RAVEN; PAULLING, 2010; ISLAM; GUEDES SOARES, 2017; SUGALSKI, 2018; LIU, 2020). Nesse trabalho é utilizado o OpenFOAM, um programa livre de código aberto, que vem crescendo e se popularizando na área de CFD. Vários trabalhos para estimar as forças de resistência ao avanço de embarcações foram desenvolvidos com ele e comprovaram a sua eficiência (SHEN; WAN; CARRICA, 2015; ISLAM; GUEDES SOARES, 2019; BAHATMAKA; KIM, 2019). O objetivo deste trabalho é desenvolver uma abordagem numérica para prever a resistência ao avanço das embarcações de navegação fluvial em escala real com um *software* livre e dessa forma

A simulação inclui a passagem de água e ar através do casco da balsa e os resultados encontrados são comparados com o método Holtrop. Esse método não considera as restrições de largura e profundidade do canal, questão fundamental na navegação interior, assim como não considera essa forma de casco. Embora esse método tenha sido obtido por regressão com navios de parâmetros diferentes dos da balsa aqui considerada, o mesmo já foi aplicado em uma embarcação similar (MARQUES; BELCHIOR; CAPRACE, 2019).

2. Metodologia

O estudo desse trabalho avaliou a resistência ao avanço de uma balsa em escala real com base em

simulações numéricas utilizando o OpenFOAM. Primeiramente é feita uma análise do caso Duisburg Test Case (DTC) (MOCTAR; SHIGUNOV; ZORN, 2012), onde a simulação é realizada para águas calmas, por conseguinte é aperfeiçoado um modelo para solução de uma embarcação de navegação fluvial. Foi utilizado o solver *interFoam* que trabalha com dois fluidos imiscíveis, isotérmicos e incompressíveis usando uma abordagem de captura de interface baseada em fração de fase no método VOF (Volume of Fluid - VOF) (HIRT; NICHOLS, 1981). Outra característica do *interFoam*, é que ele utiliza o método VOF com uma discretização por Volumes Finitos das equações de transporte da massa, da quantidade de movimento e da fração volumétrica de uma das fases. Nesse caso, os dois fluidos são o ar e a água. É importante simular corretamente o escoamento turbulento sobre o casco, dessa forma está incluído o método de turbulência RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) com o uso de uma formulação k- ω SST. Geralmente, o modelo tem um bom comportamento em gradientes de pressão adversos e na separação do fluxo da camada limite (MENTER, 1993).

2.1. Modelagem matemática

Nesta seção é detalhado o modelo matemático para a solução do problema. Neste, o escoamento é dito transiente, incompressível e turbulento. A formulação RANS em conjunto com o modelo k- ω SST foram utilizados no equacionamento da turbulência. Nessa metodologia, um único conjunto de equações de conservação da massa conforme a equação 1 e quantidade de movimento na equação 2 é resolvido para os dois fluidos. Estas equações e podem ser descritas, respectivamente, por:

$$\nabla \cdot (\bar{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{V}\bar{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\hat{t}] + \rho\vec{g} + \vec{F}_\sigma \quad (2)$$

onde o tensor de tensões de Reynolds é dado por

$$\hat{t} = \mu \left[(\nabla\bar{V} + \nabla\bar{V}^T) - \frac{2}{3}\nabla \cdot \bar{V}I \right] \quad (3)$$

$\bar{V} = (u, v, w)$ é a velocidade do fluido [m/s], ρ é a massa específica [kg/m³], p é a pressão [Pa], g é

vetor aceleração da gravidade [m/s²], I é o tensor da unidade e F_σ [N/m²] é a tensão superficial.

O método VOF (HIRT; NICHOLS, 1981) é uma técnica de modelagem de escoamento multifásico de fluidos imiscíveis que permite o rastreamento da superfície livre, isto é, uma técnica numérica para rastrear e localizar a interface entre 2 ou mais fluidos. Na formulação do VOF todas as fases são bem definidas, sendo que uma fase não pode ocupar o volume da outra. Neste método é utilizada uma função chamada de fração volumétrica, α_f , que é definida como:

- Se $\alpha_f = 0$ a célula é totalmente preenchida com ar;
- Se $\alpha_f = 1$ a célula é totalmente preenchida com água;
- Se $0 < \alpha_f < 1$ a célula contém no interior as duas fases, ar e água.

Para saber onde está a interface entre os dois fluidos, uma equação adicional de transporte advectivo é incorporada para a fração volumétrica em cada volume de controle.

$$\frac{\partial(\rho\alpha_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\alpha_f\vec{v}) = 0 \quad (4)$$

As propriedades físicas são médias entre as fases avaliadas em função da fração de volumétrica (SRINIVASAN; SALAZAR; SAITO, 2011), sendo definidas por:

$$\rho = \alpha_f \cdot \rho_{\text{água}} + (1 - \alpha_f) \cdot \rho_{\text{ar}} \quad (5)$$

$$\mu = \alpha_f \cdot \mu_{\text{água}} + (1 - \alpha_f) \cdot \mu_{\text{ar}} \quad (6)$$

Nesse trabalho é adotado um regime turbulento, para isso é utilizada a metodologia RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), o modelo utilizado no OpenFOAM é o k- ω SST (Shear Stress Transport) é um modelo de turbulência de duas equações: energia cinética da turbulência (k) e taxa de dissipação específica da turbulência (ω). Esse modelo é baseado no estudo de Menter et al. (2003). As equações para o transporte de k e ω e no modelo de turbulência o k- ω SST são (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}k) \\ = P_k - \rho\beta^*k\omega + \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k^*}} \right) \nabla \cdot k \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\omega) \\ = \alpha \frac{\omega}{\kappa} P_\kappa - \rho\beta\omega^2 + \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\kappa^*}} \right) \nabla \cdot \omega \right] \end{aligned} \quad (8)$$

onde κ é a energia cinética da turbulência, P_κ é a taxa de produção de energia cinética turbulenta e ω é o tempo de escala inverso. No modelo k- ω a viscosidade turbulenta é expressa como:

$$\mu_t = \rho \frac{\kappa}{\omega} \quad (9)$$

Os coeficientes do modelo são (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016):

$$\begin{aligned} \alpha = \frac{5}{9}; \beta = 0.075; \beta^* = 0.09; \sigma_{\kappa^*} = \sigma_{\kappa^*} \\ = 2; \varepsilon = \beta^* \omega \kappa \end{aligned}$$

A equação a energia cinética da turbulência fica:

$$k = \frac{3}{2} (I |V_{ref}|)^2 \quad (10)$$

onde I é a intensidade e V_{ref} é velocidade de referência. A Taxa de dissipação específica da turbulência é:

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu^{0.25} L} \quad (11)$$

onde C_μ é uma constante igual a 0.09 e L é uma escala de comprimento de referência.

2.2. Validação – Duisburg Test Case

O Duisburg Test Case (DTC) é um projeto de casco de um navio porta-contentores pós-panamax 14000 TEU, desenvolvido no ISMT (Institute of Ship Technology, Ocean Engineering and Transport Systems, Alemanha). Esse mesmo projeto é utilizado por Moctar et al. (2012) para validação de modelos numéricos com testes experimentais. Desse modo são utilizados os dados experimentais do caso para a comparação com a simulação realizada. A geometria do casco está representada na Figura 1 e na Tabela 1 estão listadas as dimensões da embarcação.

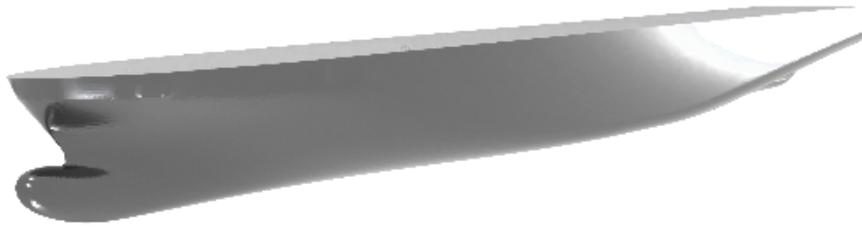


Figura 1. Geometria do casco DTC.

Tabela 1. Características do casco (DTC).

		Escala	Caso Real
Comprimento entre perpendiculares	L_{pp} [m]	5,976	355,0
Boca	B_{wl} [m]	0,859	51,0
Calado	T_d [m]	0,244	14,5
Volume deslocado	δ [m ³]	0,827	173.467,0
Coefficiente de bloco	C_B [-]	0,661	0,661
Área molhada	S_w [m ²]	6,243	22.032,0
Velocidade de projeto	V_d [nós]	3,244	25

2.2.1. Condições de contorno

A simulação é definida com algumas simplificações. O modelo é em escala não possui hélice e leme. A solução utiliza um esquema pseudo-transitório para acelerar uma solução para o estado estacionário usando LTS (Local Time Stepping). Para as condições de contorno do caso DTC, segue o esquema da Figura 2, é prescrita uma velocidade do escoamento na entrada do domínio, tanto para a água como para o ar de 1,668 m/s. Nas faces laterais, fundo e plano de simetria é imposta a condição de simetria.

Na região da saída, a condição *outletPhaseMeanVelocity* é imposta. Esta condição de contorno ajusta a velocidade da fase especificada para atingir a média, dessa forma a fração da fase se ajusta de acordo com a taxa de fluxo de massa e assim mantém o nível da água de saída no nível da entrada. Na região superior, é atribuída como condição de contorno a pressão prescrita igual a zero, que é a pressão atmosférica manométrica. A viscosidade cinemática e a massa específica da água e do ar são mostradas na Tabela 2. As simulações foram realizadas utilizando o solver *interFoam*.

Tabela 2. Propriedades de transporte do caso DTC

Fase	Massa específica do fluido [kg/m ³]	Viscosidade cinemática [m ² /s]
Ar	1	1,48e-05
Água	998,8	1,09e-06

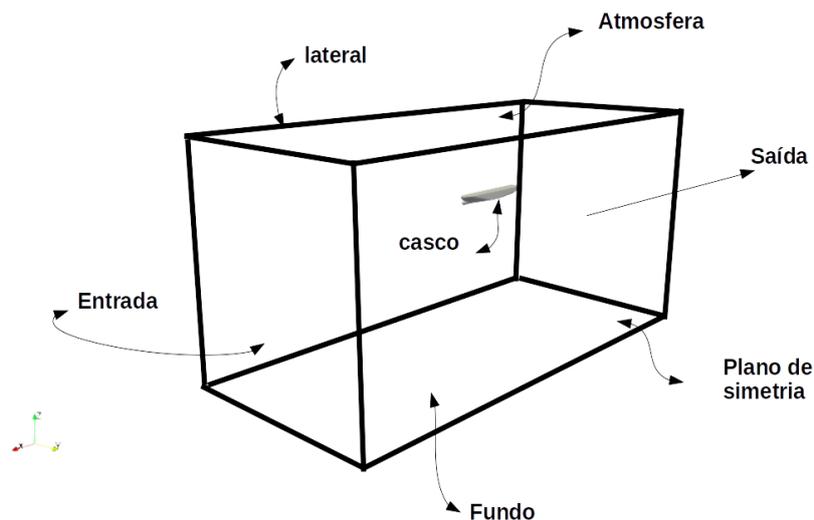
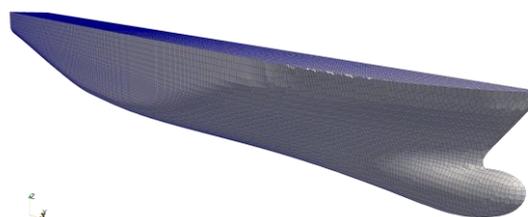


Figura 2. Condições de contorno.

2.2.2. Geração da malha

A geração da malha é feita no OpenFOAM, utilizando a ferramenta snappyHexMesh. A malha é feita com algumas regiões mais refinadas que outras. Na Figura 3 (a), é possível ver a malha do domínio computacional e nota-se que áreas próximas ao casco, onde os gradientes de velocidade são maiores, têm um nível maior de refinamento. Na Figura 3 (a) observa-se que nas regiões próximas ao casco, onde é formada a camada limite dinâmica, a malha é bem mais refinada, assim como a área após a embarcação, onde se formam os campos de esteira. Na figura 3 (b) é apresentada a malha do casco do navio, ela é uma malha complexa para reproduzir devido ao formato do casco do navio. A malha de todo o domínio, Figura 3 (a), têm 1.401.778 volumes.

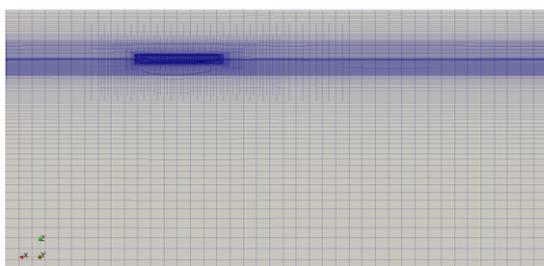


(b) Malha do casco.

Figura 3. Malhas do caso DTC.

2.2.3. Validação

A simulação teve 4000 iterações, contudo a solução estabilizada, é obtida apenas após 3000 iterações conforme mostrado na Figura 4. Para encontrar o valor da resistência ao avanço, é feita a média das últimas 1000 iterações, desse modo é calculada uma resistência total de 30,170 N para a velocidade de 1,668 m/s.



(a) Malha do domínio computacional.

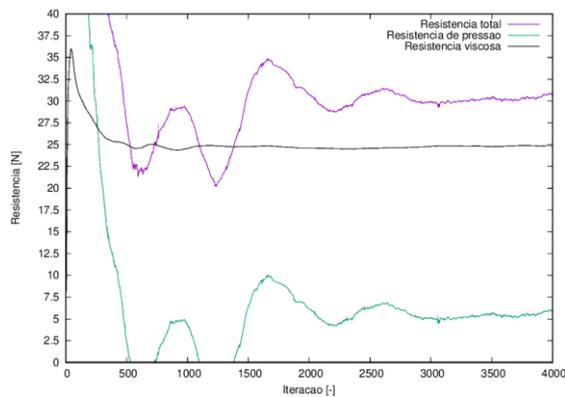


Figura 4. Resistência total e suas componentes de pressão e viscosa.

Na Figura 5 são mostradas as forças de resistência ao avanço para diferentes velocidades da embarcação. Observa-se que para 4000 iterações, todas as soluções já atingiram a condição de regime permanente. Como esperado, observa-se também que a resistência ao avanço aumenta com o aumento da velocidade.

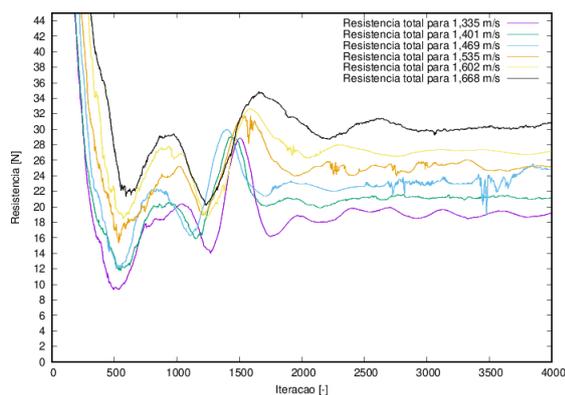


Figura 5. Resistência total para diferentes velocidades.

No gráfico da Figura 6, é feita a comparação das curvas de resistência ao avanço em função da velocidade. Em roxo, o gráfico é gerado a partir dos dados do trabalho de Moctar et al. (2012), enquanto a curva azul foi gerada pelas simulações deste trabalho no OpenFoam para as diferentes velocidades conforme a Tabela 3.

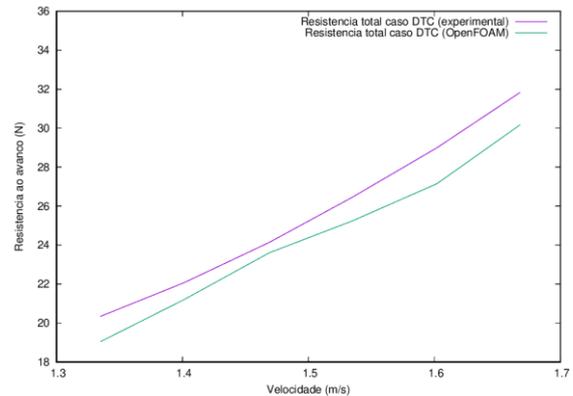


Figura 6. Resistência ao avanço em função da velocidade da embarcação.

A Tabela 3 mostra a comparação entre os dados experimentais para o caso DTC fornecidos por Moctar et al. (2012) e os resultados obtidos neste trabalho com o software OpenFOAM. Da análise da Tabela 3 observa-se que o maior erro percentual registrado é de 6,36 % para a velocidade de 1,335 m/s e o menor erro registrado foi de 2,21 % para a velocidade de 1,469 m/s, dessa forma a metodologia aplicada é considerada válida.

Tabela 3. Comparação das Resistências obtidas com o caso DTC.

Velocidade [m/s]	Caso DTC [N]	OpenFOAM [N]	*Erro percentual [%]
1,335	20,34	19,045	-6,36
1,401	22,06	21,191	-3,94
1,469	24,14	23,607	-2,21
1,535	26,46	25,241	-4,61
1,602	28,99	27,148	-6,35
1,668	31,83	30,170	-5,21

* $Erro\% = \frac{(OpenFOAM - DTC)}{DTC} \cdot 100$

3. Caso de estudo - Balsa

Um estudo de caso foi realizado para uma balsa com dimensões reais destinada a navegar em um grande lago em Minas Gerais, Lago de Furnas. O foco principal do trabalho é estimar a resistência ao avanço da balsa em escala real, nesse estudo não foram considerados as restrições de largura e profundidade do canal. Foram realizadas simulações para diferentes casos, aumentando o refinamento para obter um teste de independência de malha. Por conseguinte, foram realizadas simulações com diferentes velocidades e os resultados comparados com o método Holtrop. Na Figura 7 é apresentada a geometria do casco e a simulação foi feita para a embarcação em tamanho real.

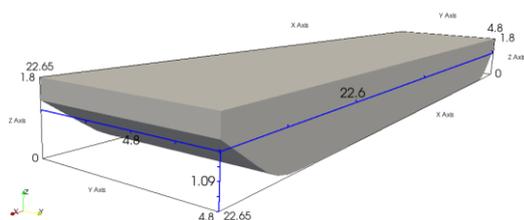


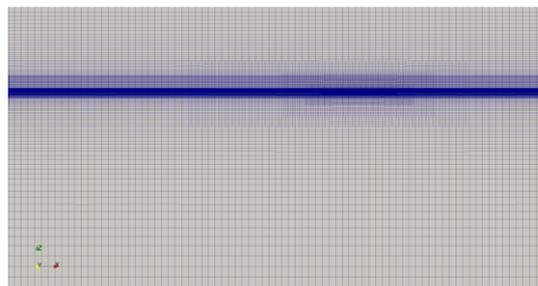
Figura 7. Geometria da balsa.

3.1. Geração da malha

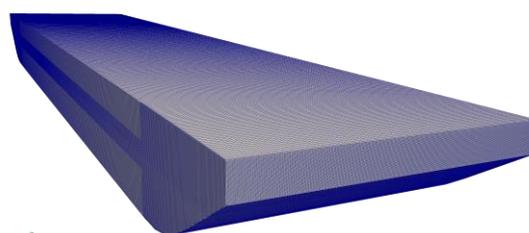
A geração da malha é feita no OpenFOAM a partir de uma geometria no formato stl. Primeiramente, foi construída a malha de fundo com o aplicativo *blockMesh*. Esta serve tanto como delimitação do domínio computacional como também de malha de fundo para ser utilizada pelo *snappyHexMesh*. Posteriormente, foram realizados refinamentos nas regiões próximas do casco e na superfície livre para capturar com precisão a região da interface ar-água, visto que a região da camada limite dinâmica é a mais difícil de resolver. Após a geração da malha de fundo e gerada a malha do casco com o *snappyHexMesh*, foram feitas 3 simulações para diferentes refinamentos de malha.

Na figura 8 (a) é mostrada a malha do domínio computacional. O refinamento maior ao redor do casco é necessário por causa da camada limite dinâmica e para que possam ser calculadas com precisão as forças sobre a embarcação. Da mesma forma, a região depois da popa tem um refinamento maior por causa das ondas geradas pela embarcação e a esteira formada. Na Figura 8 (b) é possível visualizar um refinamento maior na proa,

da mesma forma foi feita na popa, e um refinamento na região da linha d'água.



(a) Malha do domínio computacional.

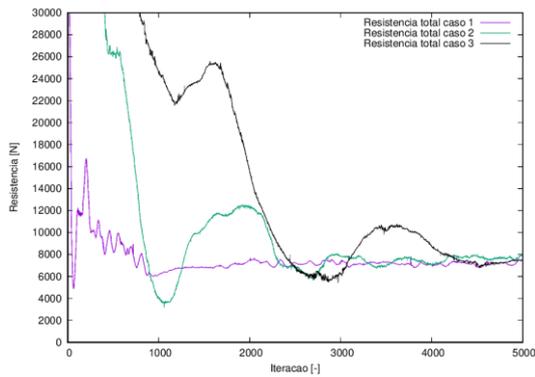


(b) Malha sobre a superfície do casco
Figura 8. Malha do caso da balsa.

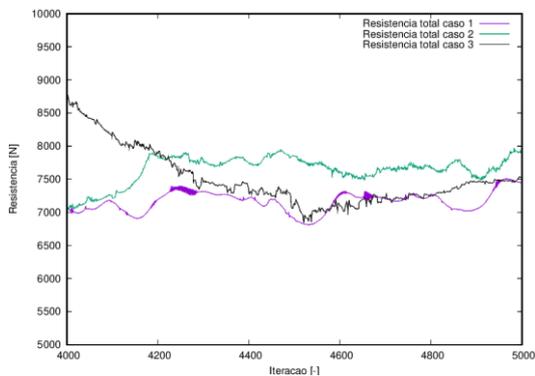
4. Resultados e discussões.

As condições de contorno da balsa seguem o mesmo padrão do item 2.2.1, com a exceção da velocidade. Agora, na região de entrada é imposta uma velocidade de 5 nós (2,572 m/s) para o escoamento. Para a simulação da balsa foram realizadas 5000 iterações. Conforme mostrado na Figura 9, observa-se um comportamento oscilatório no início da simulação, mas após 4000 iterações as forças de resistência total ficam estáveis.

Dessa forma foi feita uma média das últimas 1000 iterações para calcular a resistência total obtida. Na Tabela 4 são mostrados em valores absolutos a comparação entre todos os casos, assim como os valores médios, máximo, mínimo e o desvio padrão da resistência ao avanço das últimas 1000 iterações. No gráfico da Figura 9 (a), é mostrado o comportamento da resistência total para os casos estudados. Na Figura 9 (b), é apresentado uma ampliação do gráfico da Figura 9 (a) na região ente 4000 e 5000 iterações, região onde a simulação estabilizou.



(a) Resistência total para diferentes níveis de refinamento.



(b) Resistência total após convergir.

Figura 9. Resistência total da balsa.

Tabela 4. - Comparação entre as forças de resistências totais obtidas nos casos simulados.

Simulações	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Células	2.190.134	4.585.008	7.302.811
Valor máximo [N]	7.504,2	7.971,8	8.777,2
Valor mínimo [N]	6.813	7.041,2	6.845,8
Média [N]	7.161,8	7.643	7.504,2
Desvio padrão σ	155	212,86	417,2

Tabela 5. Valores da Resistência e o erro relativo para o teste de independência de malha.

Testes	Número de células	OpenFOAM [N]	*Erro relativo %
Caso 1	2.190.134	7.161,8	[-]
Caso 2	4.585.008	7.643,0	6,29
Caso 3	7.302.811	7.504,2	-1,82
* $Erro\% = \frac{Malha\ refinada - malha\ grosseira}{malha\ grosseira} \cdot 100$			

Na Tabela 5 está descrita a resistência total para diferentes níveis de refinamento, assim como o erro relativo entre os casos. O sinal é considerado para indicar se os valores estão superestimados, valores positivos, ou subestimados com os valores negativos. Nesse sentido, pode-se notar que a diferença entre o caso anterior e o subsequente está diminuindo, demonstrando assim a independência da solução com malha. Na Figura 10, está representado de forma gráfica a convergência do teste de independência de malha.

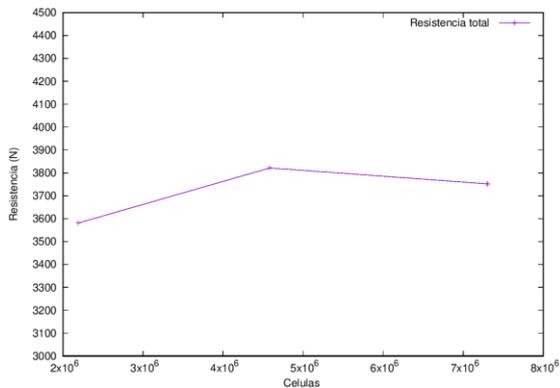


Figura 10. - Teste de convergência de malha.

Na figura 11 é possível analisar a convergência dos resíduos para a malha independente. Nesse caso não tem os resíduos para a velocidade, visto que a velocidade é resolvida explicitamente com base na iteração anterior. A malha do caso 2 é considerada independente, porque que ao refinar mais a malha a diferença relativa entre elas é muito pequena e dessa forma não compensa o refinamento por causa do esforço computacional maior. Portanto, a malha do caso dois é utilizada para a simulação de mais dois casos. Assim sendo foram realizadas as simulações para 1 e 3 nós. Na Tabela 6 são apresentados os valores encontrados e na Figura 13 é possível visualizar o gráfico da resistência ao avanço para diferentes velocidades da balsa. Como também na Figura 14 a curva de resistência por velocidade da balsa.

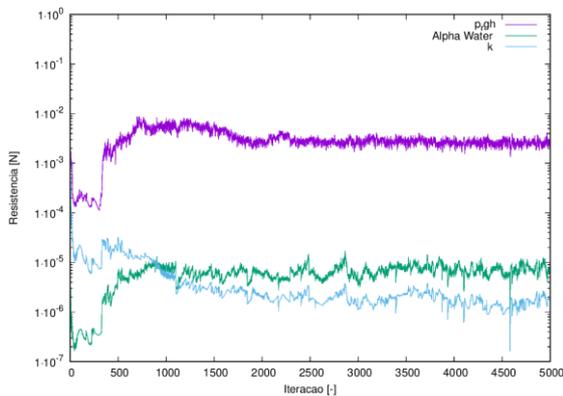


Figura 11. Resíduos na malha independente.

Além disso, a distribuição y^+ para o casco está demonstrado na Figura 12. Segundo Liu (2020), o y^+ pode ser definido em uma faixa entre 30 – 200. Considerando a estrutura do escoamento turbulento, o y^+ encontrado nesse caso teve uma média de aproximadamente 171.

Na Figura 15 (a) é apresentado o gradiente de pressão e o padrão de ondas geradas pela balsa. Ele segue o padrão de onda Kelvin (THOMSON, 1887),

assim como a formação da esteira. Na Figura 15 (b), é possível visualizar as ondas geradas na proa e popa, assim como suas cristas e vales que são formados.

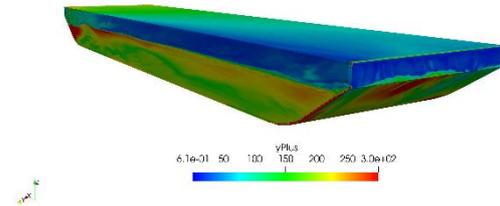


Figura 12. Distribuição do y^+ .

Tabela 6. Resistência total para diferentes velocidades

Velocidade [nós]	Resistência Total [N]
1	698,9
3	2332,37
5	7643,0

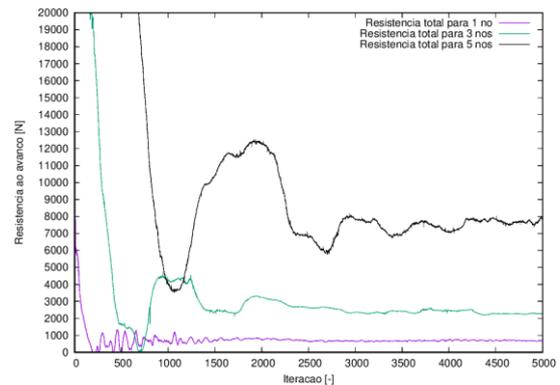


Figura 13. Resistência total para diferentes velocidades

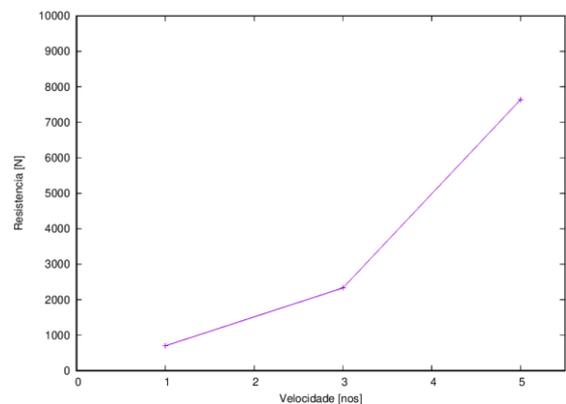
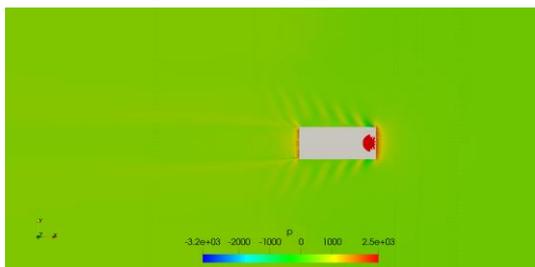
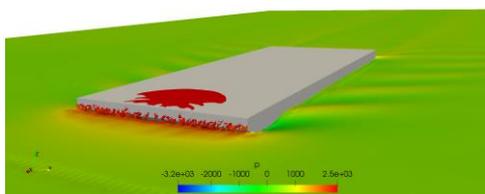


Figura 14. Resistência x velocidade.



(a) Padrão de ondas e os campos de pressão.



(b) Vista 3d da simulação.

Figura 15. Vista superior e em perspectiva da topologia de pressão estática.

4.1. Método Holtrop

O método de Holtrop e Mennen (1982) é um dos métodos empíricos mais utilizados para projetos de navios, visto que consiste em uma regressão estatística obtida a partir de testes em modelos de escala reduzida e também em embarcações de escala real. Nesse trabalho foi utilizado o método de Holtrop e Mennen (1982), porque o número de Froude (F_n) é baixo ($< 0,2$). Enquanto que o método de Holtrop e Mennen (1984) apresenta correções para $F_n > 0,5$. Para a geometria da balsa o coeficiente de área no plano da água (CWP) deve ser 1, mas o método de Holtrop não abrange esse valor, resultando uma resistência de onda infinita. Dessa forma, foi realizada uma análise do coeficiente de área no plano da água com a resistência ao avanço da balsa, conforme a Tabela 7. Na Figura 16 é possível visualizar esse comportamento, onde o valor da resistência aumenta drasticamente conforme CWP vai se aproximando de 1.

Conforme a Tabela 6, comparando as resistências simuladas no OpenFOAM com as resistências obtidas pelo método Holtrop na Tabela 7, o CWP mais indicado nesse caso é no valor de 0,99999. Na Figura 16, é possível comparar as curvas de resistência ao avanço pela velocidade pelo método de Holtrop e com o OpenFOAM. O método Holtrop forneceu uma resistência menor do que no OpenFOAM com um erro médio de 618 N, dessa forma representa um erro percentual pequeno para velocidades altas, mas um erro percentual grande

para baixas velocidades. Como o caso Holtrop não é indicado para esse tipo de embarcação os erros encontrados nessa ordem são plausíveis. Visto que no caso DTC o erro percentual ficou até 6% em uma comparação com o teste experimental do modelo, conforme a Tabela 3, mostrando que erros dessa ordem não são incomuns na simulação numérica.

Tabela 7. Resistência total para diferentes CWP .

CWP	Resistência total [N]		
	1 Knot	3 knots	5 knots
0.99	249,01	1902,8	5024,6
0.999	249,92	1909,8	5196,7
0.9999	250,01	1910,5	5601,9
0.99999	250,02	1910,7	6659,7
0.999999	250,02	1910,9	9434,8
1	∞	∞	∞

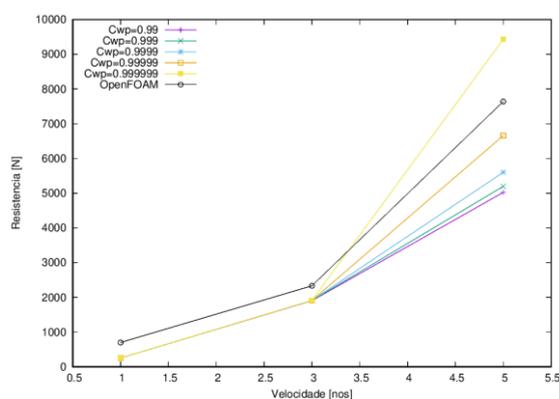


Figura 16. Curva para vários CWP .

5. Conclusão

O presente trabalho apresentou um estudo numérico sobre a estimativa de resistência ao avanço de uma balsa em tamanho real. Primeiramente, foi apresentada a validação do modelo com o caso DTC a partir de dados experimentais, dessa forma ficou demonstrada a validação do *solver* do modelo para a solução desse tipo de problema, visto que o maior erro percentual encontrado foi de 6,36%. Além disso, os resultados encontrados nas simulações da balsa foram comparados com uma simples adaptação do método Holtrop. Neste trabalho não foram consideradas as restrições de largura e profundidade do canal, mas serão consideradas em trabalhos futuros. Dessa forma mesmo com uma adaptação é possível notar que os resultados do método Holtrop não divergiram em relação a simulação realizada no software OpenFOAM, embora a simulação CFD seja mais precisa.

6. Agradecimentos

O autor, J. A. Souza agradece ao CNPq pelo suporte financeiro (Processo: 306024/2017-9). Assim como o autor C. H. Marques agradece à FAPERGS pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa ARD (19 / 2551-0001250-0).

7. Referências Bibliográficas

BAHATMAKA, A.; KIM, D.-J. Numerical approach for the traditional fishing vessel analysis of resistance by cfd. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 14, p. 207–217, 2019.

ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE – INLAND TRANSPORT COMMITTEE. **The White Paper on Trends in and Development of Inland Navigation and its Infrastructure**. [s.l.: s.n.].

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. **Volume of Fluid (VOF) MeThod for the Dynamics of Free Boundaries**. 1981

HOLTROP, J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. **International shipbuilding progress**, v. 31, n. 363, p. 272–276, 1984.

HOLTROP, J.; MENNEN, G. G. J. An approximate power prediction method. **International Shipbuilding Progress**, v. 29, n. 335, p. 166–170, 1982.

ISLAM, H.; GUEDES SOARES, C. Prediction of ship resistance in head waves using OpenFOAM. In: [s.l.: s.n.]. p. 527–533.

ISLAM, H.; GUEDES SOARES, C. Uncertainty analysis in ship resistance prediction using OpenFOAM. **Ocean Engineering**, 2019.

LARSSON, L.; RAVEN, H. C.; PAULLING, J. R. **Ship Resistance and Flow**. [s.l.] Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.

LIU, J. **Mathematical Modeling of Inland Vessel Maneuverability Considering Rudder Hydrodynamics, Texto original**. [s.l.] Springer International Publishing, 2020.

MARQUES, C. H.; BELCHIOR, C. R. P.; CAPRACE, J.-D. Marine propeller parametric optimisation and matching to electric motor. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 3, p. 119, 7 fev. 2019.

MENTER, F. Zonal Two Equation k-w Turbulence Models For Aerodynamic Flows. In: **23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference**. [s.l.: s.n.].

MENTER, F. R.; KUNTZ, M.; LANGTRY, R. **Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model**. 2003

MOCTAR, O.; SHIGUNOV, V.; ZORN, T. Duisburg Test Case: Post-Panamax Container Ship for Benchmarking. **Ship Technology Research**, v. 59, p. 50–64, 2012.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The finite volume method in computational fluid dynamics**. [s.l.] Springer, 2016. v. 6

SHEN, Z.; WAN, D.; CARRICA, P. M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering. **Ocean Engineering**, v. 108, p. 287–306, 2015.

SRINIVASAN, V.; SALAZAR, A. J.; SAITO, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, n. 8, p. 3710–3730, 2011.

SUGALSKI, K. Influence of the Symmetry Plane Boundary Condition on the Planing Multihull Calm Water Resistance Test. CFD to Towing Tank Comparison. **New Trends in Production Engineering**, v. 1, n. 1, p. 385–391, 1 out. 2018.

THOMSON, W. On ship waves. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 38, n. 1, p. 409–434, 1887.