

ANÁLISE NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE AR NA REDUÇÃO DO ARRASTO VISCOZO NO CASCO DUISBURG TEST CASE

NUMERICAL ANALYSIS OF AIR INJECTION FOR VISCOUS DRAG REDUCTION IN THE DUISBURG TEST CASE HULL

Raul Lima Portela Bispo¹ 

Crístofer Hood Marques² 

Jeferson Avila Souza³ 

Resumo: Estudos de melhorias buscando cascos mais eficientes têm se tornado acessíveis com o avanço de técnicas numéricas e recursos computacionais nas últimas décadas. Com objetivo da redução da resistência viscosa, o presente estudo utiliza uma abordagem numérica por meio do *software* livre OpenFOAM como estratégia na análise da eficiência do método de injeção de ar no fundo do casco Duisburg Test Case (DTC). O Casco apresenta uma geometria genérica de porta-contentores mais modernos, pertencendo a categoria de cascos de deslocamento, e é frequentemente utilizado na validação de estudos hidrodinâmicos. Especificamente, injetando ar na parte inferior do casco, essa técnica consiste em formar uma película de ar entre o casco e a água que contribui para a redução do arrasto viscoso, tal método é conhecido como ALDR sigla para *Air Layer Drag Reduction*. Parâmetros como: velocidade do casco, disposição dos bicos injetores, vazão de ar e ângulo de injeção são definidos objetivando reduzir o arrasto viscoso. A simulação numérica conta com as metodologias: Volumes Finitos para discretização das equações de conservação; velocidades médias, RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*), na equação do movimento; $k-\omega$ - SST no modelo turbulento. Por fim, o método atingiu uma redução de 20,32% na resistência viscosa e 19,13% de redução na resistência total do casco DTC.

Palavras-chave: Injeção de ar ALDR, resistência do arrasto viscoso, estudo numérico, cascos eficientes.

Abstract: Improvement studies aiming for more efficient hulls have become accessible with the advancement of numerical techniques and computational resources in the last decades. With the reducing viscous resistance as the goal, the present study uses a numerical approach through OpenFOAM free software as a strategy to analyze the efficiency of using air injection at the bottom of the Duisburg Test Case (DTC) hull. The chosen generic hull, which geometry refers to modern container carries, and belongs to the displacement hull category, is also often used in hydrodynamics validation studies. Specifically, the injection of air at the hull bottom forms an air film between hull and water, which contributes to the reduction of viscous drag. Such a method is known as Air Layer Drag Reduction (ALDR). Parameters such as hull speed, nozzle arrangement, airflow, and injection angle are defined to reduce viscous drag. The numerical simulation relies on the Finite Volumes methodology to discretize the conservation equations, as well as the Averaged-Reynolds Navier-Stokes (RANS) in the momentum equations, and $k-\omega$ - SST in the turbulence model. Finally, the method achieved a 20.32% reduction in viscous resistance and a 19.13% reduction in the total resistance of the DTC hull has been observed.

Keywords: Air injection ALDR, viscous drag resistance, numerical study, efficient hulls.

¹ Engenheiro Mecânico Naval, Universidade Federal do Rio Grande, raullpb@hotmail.com

² Prof. Doutor, Universidade Federal do Rio Grande, cristoferhood@furg.br

³ Prof. Doutor, Universidade Federal do Rio Grande, jasouza1974@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

O transporte aquaviário, em específico o marítimo, é considerado como um dos mais eficientes modais em movimentação de cargas de um ponto a outro do globo. Segundo UNCTAD (2021), mais de 80% dos produtos comercializados no mundo foram transportados por vias marítimas. De acordo com dados públicos da ANTAQ (2021) relatam que foram transportados no Brasil por vias interiores, 16,3 milhões de toneladas, por cabotagem, 35 milhões de toneladas e por transporte de longo curso, intercontinental, 118 milhões de toneladas em produtos. O custo deste transporte está diretamente associado ao consumo de combustível pelas embarcações. Ao reduzir a resistência ao avanço da embarcação, há uma conseqüente redução no consumo de combustível. Isto implica diretamente em benefícios econômicos no mercado mundial e na diminuição do impacto ambiental, já que, a emissão de dióxido de carbono e outros produtos tóxicos são provenientes da queima dos combustíveis necessários ao sistema propulsivo das embarcações. Só em 2020 mais de 200 milhões de toneladas de combustível foram consumidos no abastecimento energético aquaviário mundial (IMO, 2021).

De acordo com MAN (2013), as perdas energéticas se relacionam com a geometria do casco, o arrasto viscoso, o arrasto residual (geração de onda e arrasto de pressão viscoso) e a superposição de ondas no hélice propulsor. Estas perdas têm efeito no domínio da carena e contribuem para a resistência ao avanço da embarcação. Para cada tipo de casco esses efeitos possuem parcelas de significância diferentes. Cascos de planeio, por exemplo, apresentam um arrasto de pressão que representa de 40 a 60% da resistência total ao avanço, já nos cascos de deslocamento, embarcações que não sofrem mudança de calado devido as forças hidrodinâmicas, a maior parcela de perda energética é devido ao arrasto viscoso, 70 a 90% da resistência total ao avanço (MAN, 2013).

Há diversas linhas de estudo que buscam aperfeiçoar a eficiência de cascos de embarcações do modal marítimo. Em cascos de deslocamento a grande parcela da resistência total ao avanço da embarcação é provocada pelas tensões de cisalhamento provenientes do contato entre a água e o casco. Uma forma de se reduzir esta parcela se dá através da injeção de ar na parte inferior do casco, a qual forma uma película de ar entre o casco e a água. Esta película de ar funciona como um fluido lubrificante, que devido as diferenças de viscosidade dinâmica e massa específica, contribuem para uma significativa redução do arrasto viscoso. Conseqüentemente, o arrasto total também diminui, resultando em economias de combustível e/ou aumentando a velocidade de cruzeiro⁴.

Este método, redução do arrasto utilizando o ar, está atualmente dividida em duas categorias: BDR, termo do inglês para *Bubble Drag Reduction*, injeção por bolhas de ar; e ALDR, sigla para *Air Layer Drag Reduction*, quando é formada uma película de ar junto ao casco. Foi observado experimentalmente que a redução do arrasto é diretamente proporcional a vazão de injeção de ar (Merkle and Deutsch, 1992). Elbing et al. (2008) estudou o comportamento transicional entre as categorias BDR e ALDR. Na categoria BDR, o ar desenvolve-se no formato de bolhas, a máxima redução do arrasto viscoso atingido foi de 20%; entre as categorias BDR e ALDR acontece o período transicional; por fim, na categoria ALDR ocorre a completa formação da película de ar, ocasionando reduções maiores que 80% da resistência viscosa.

Park e Lee (2018) estudaram o efeito de múltiplas regiões de injeção de ar no fundo do casco. O estudo foi aplicado no casco em escala de 1:33, pertencente a um navio tanque, com volume deslocado de 50.000 metros cúbicos. Foi verificado que injeções pulverizadas, maiores números de regiões de injeção de ar no fundo do casco, performam melhor o método, obtendo melhores resultados na redução do arrasto total ao avanço.

⁴ Velocidade operacional de uma embarcação na qual retorna melhores custos benéficos

O casco objeto do estudo no qual será injetado o ar pertence ao porta-contentor Duisburg Test Case (DTC). Moctar et al. (2012) desenvolveu, pelo *Institute of Ship Technology Ocean Engineering and Transport Systems* (ISMT), ensaios em tanque hidrodinâmico e verificou as estratificações da resistência ao avanço no DTC, em escala reduzida de 1:59, em forças viscosas e forças residuais. Classificado como Post-Panamax⁵ é um casco de deslocamento moderno e bastante utilizado para validação de métodos numéricos atuais.

A eficiência do método ALDR perpassa pela vazão de ar injetada, porém outros fatores como topologia do casco, ângulo de injeção do ar e arranjo dos bicos injetores mostram-se, nesse estudo, parâmetros chaves para otimização do método de injeção de ar no fundo do casco. Contudo, um arranjo predefinido que indique a redução da resistência ao avanço no casco DTC, devido ao método de injeção de ar, é o principal objetivo deste trabalho. No presente estudo foi modelado uma injeção de ar prescrita no fundo do casco DTC no regime ALDR.

2 METODOLOGIA

O estudo da eficiência do método de injeção de ar na redução do arrasto viscoso em cascos de deslocamento foi realizado numericamente utilizando técnicas de CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*). Para tanto, foi utilizado o *software* OpenFOAM (Weller, H. et al., 2021), mais especificamente, o solver *InterFOAM*, o qual utiliza a formulação de Volumes Finitos para a discretização das equações diferenciais que regem o problema.

2.1 Modelagem Matemática

A solução do problema multifásico é obtida com o método *Volume of Fluid* (VOF). Proposto por Hirt e Nichols (1981), no método VOF, todas as fases

⁵ Navios que superam a dimensão máxima das eclusas do canal de Panamá

de fluidos imiscíveis presentes em um volume de controle compartilham da mesma velocidade e pressão. O modelo se baseia no fato de que os dois fluidos, ar e água, não se diluem em cada volume finito. A fim de definir os volumes que apresentam água ou ar para a configuração do problema em estudo, a relação entre as fases é definida em função da fração volumétrica (α). α assume: um, quando a célula tem apenas água; zero, quando a célula possui apenas ar; e valores intermediários quando ambos os fluidos coexistem em uma mesma célula. As propriedades físicas médias do escoamento, massa específica e viscosidade dinâmica, são definidas, respectivamente, por

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

$$\mu = \mu_{\text{água}} \alpha + (1 - \alpha) \mu_{\text{ar}} \quad (2)$$

onde, ρ é a massa específica [kg/m^3] e μ a viscosidade dinâmica [Pa s].

O escoamento é dito incompressível e a formulação *Reynolds Average Navier-Stokes* (RANS) é utilizada na modelagem turbulenta do problema. Desta forma, uma média temporal é feita para as equações de conservação da massa e quantidade de movimento. Estas assumem, respectivamente, a forma

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right) F_i \quad (4)$$

onde \bar{u}_i são as médias das velocidades [m/s], x_j refere-se aos eixos cartesianos e F_i as forças de campo [N/m^3].

O modelo de turbulência utilizado foi o $k-\omega$ -SST, proposto por Menter (1994). Este modelo é recomendado quando se faz necessário uma boa descrição do escoamento tanto nas regiões próximas quanto nas regiões

afastadas das paredes. Esta característica é obtida através da combinação dos modelos $k-\omega$ e $k-\epsilon$. O modelo $k-\omega$ - SST acrescenta duas equações para o fechamento da formulação turbulenta. São elas a equação da energia cinética turbulenta e a equação da taxa de dissipação específica, dadas, respectivamente, por

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{u}_j \omega)}{\partial x_j} = & - \frac{\alpha \omega}{k} P - \beta \rho \omega^2 + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t \frac{k}{\omega}) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ & + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_d \partial k \partial \omega}{\omega \partial x_j \partial x_j} \end{aligned} \quad (6)$$

onde ω é a taxa de dissipação específica, k é a energia cinética da turbulência, F_1 é a constante responsável por chavear o modelo nas representações $k-\omega$ e $k-\epsilon$, por fim, σ_ω , σ_d e β são constantes empíricas tabeladas. Já μ_t origina-se da análise dimensional a partir das grandezas usadas para caracterizar a turbulência, e é chamado de viscosidade turbulenta limite [m^2/s] dada por

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (7)$$

A taxa de deformação, S [1/s], pode ser calculada por

$$S = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

onde a_1 é o coeficiente de amortecimento da viscosidade turbulenta e F_2 é o termo de mistura para a viscosidade turbulenta. Sendo F_2 uma constante empírica (Fiuza e Rezende, 2019). No método, além das equações de transporte para a massa e a quantidade de movimento é resolvida uma

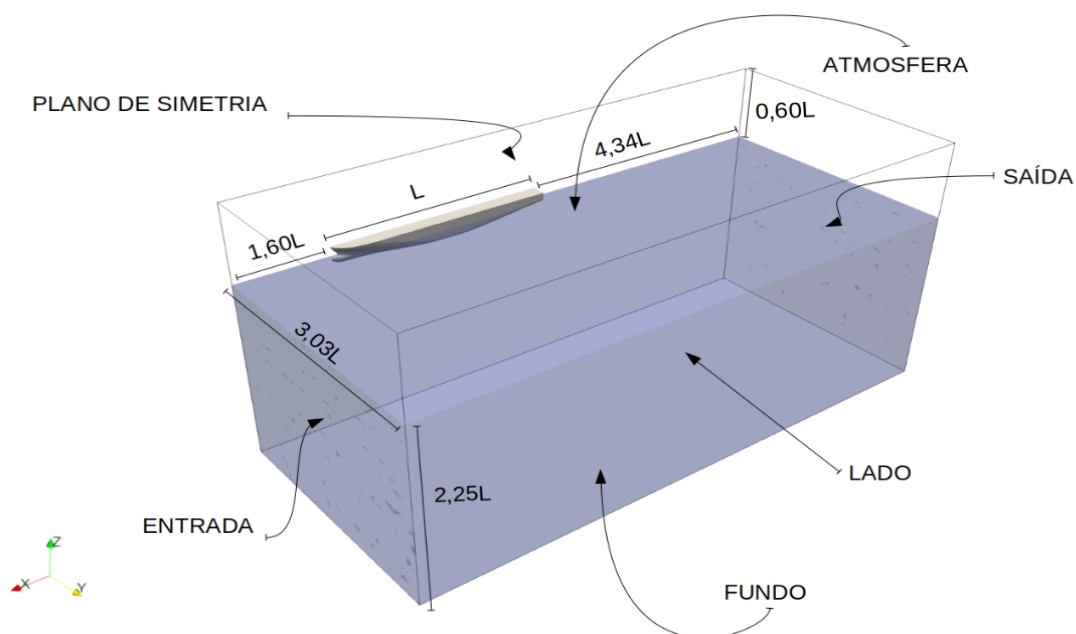
equação adicional de transporte para a fração volumétrica α (Versteeg e Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial(\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

2.2 Condições de Contorno

O domínio computacional, conforme mostrado na Figura 1, está inicialmente preenchido com água, representado em azul, até o nível do calado do casco DTC. Acima da linha d'água o domínio contém apenas ar. Abaixo do casco, nas faces dos bicos injetores é prescrito uma condição de contorno do tipo saída, injetando ar. A unidade de distância, indicado por "L", é a medida do comprimento em escala do DTC, aproximadamente 6,28 metros.

Figura 1 - Domínio Computacional



Fonte: Autor

Na Tabela 1 são mostradas as dimensões da embarcação real e a embarcação em escala.

Tabela 1 - Dimensões do casco

Parâmetros	Casco Real	Casco em Escala (1:59)
Comprimento entre perpendiculares	355 m	5,976 m
Boca	51 m	0,859 m
Deslocamento volumétrico	173.467,0 m ³	0,827 m ³
Área molhada	22.032,0 m ²	6,243 m ²
Calado	14,5 m	0,244 m
Coefficiente de bloco	0,661	0,661
Velocidade de cruzeiro	12,778 m/s	1,668 m/s

Fonte: Moctar et al. (2012)

A velocidade do casco em escala é encontrada pela semelhança incompleta, usando o número de Froude. Consiste em igualar os números de Froude do casco em escala com o do casco real. O número de Froude é definido por

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gL}} \quad (10)$$

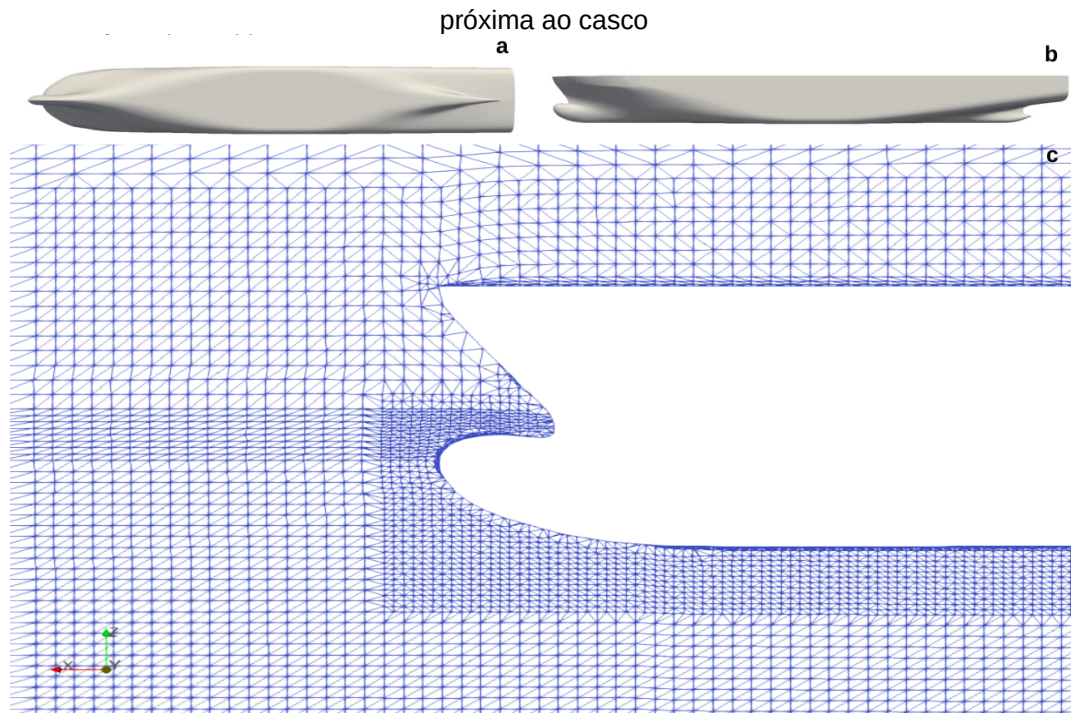
onde u é a velocidade do casco [m/s], g é a aceleração da gravidade [m/s²] e L é o comprimento do casco na linha d'água [m].

2.3 Discretização Espacial

A discretização espacial do DTC, em modelo reduzido, foi realizada com o uso das ferramentas *BlockMesh* e *SnappyHexMesh* pertencentes ao OpenFOAM. Objetivando descrever melhor os efeitos turbulentos nas regiões próximas ao casco, já que o modelo turbulento $k-\omega$ -SST requer um alto grau de refinamento nas regiões de parede, os volumes finitos em contato e

próximos ao casco receberam refinamento extra, assim como, nas regiões de injeção de ar. Na Figura 2 é representado o modelo CAD em escala do DTC e sua integralização com a malha.

Figura 2: Domínio computacional: a) vista inferior, b) vista lateral e c) discretização espacial



Fonte: Autor

2.3.1 Independência da solução com a malha

O teste de independência de malha foi realizado para a embarcação em escala (velocidade de 1,668 m/s) e com a injeção de ar ativa (vazão de $4,82 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$). Partindo de uma malha contendo 744.546 volumes, quatro outras malhas mais refinadas foram testadas. Na Tabela 2 são apresentados os resultados das resistências, Y^+ e o tempo de simulação para as quatro malhas simuladas. O Y^+ é um adimensional referente a distância, ele mostra o quão grosseira está a malha próxima à região de parede. Sendo diretamente proporcional a velocidade do fluido, seu valor indica a conformidade de refino dessas regiões.

Tabela 2 - Teste de independência da solução em relação a malha

Ma-lha	Nº Volumes	Resistência Viscosa [N]	Resistência Pressão [N]	Resistência Total [N]	Y+	Diferença Relativa [%]	Tempo [h]
c1	744.546	9,01	3,34	12,35	124,79	13,85	4,6
c2	1.136.993	10,89	3,17	14,06	72,83	6,90	7,5
c3	1.822.576	10,73	2,36	13,09	51,78	2,37	11,1
c4	2.428.558	10,63	2,76	13,40	29,33	-	14,7

Fonte: Autor

A variável utilizada para comparar as malhas é a resistência total ao escoamento, e a diferença relativa (erro) entre as soluções de duas malhas consecutivas é dado por

$$E = \left| \frac{R_{total}^i - R_{total}^{i+1}}{R_{total}^i} \right| \times 100 \quad (11)$$

onde E é o erro relativo e R_{total} o valor medido da resistência total ao escoamento. O índice i indica a malha.

Observa-se, da Tabela 2, que o erro relativo diminui, enquanto o tempo de simulação aumenta. Foi assumido aceitável um erro relativo menor do que 5%. O erro no processo de 'c3' para 'c4' foi de 2,37%, desta forma a malha "c3" foi considerada independente. Y+ para "c3" é considerado baixo suficiente, esse valor tende a diminuir com o refinamento da malha na região medida.

2.3.2 Independência do passo de tempo

Todas as simulações foram realizadas com passos de tempos fixos. Com isso, uma análise de independência de passo de tempo tornou-se necessário. Foram realizadas 3 simulações, com passos de tempo $\Delta t = 10$ s, 1 s e 0.1 s. A análise foi aplicada na malha independente "c3". As mesmas

considerações da seção 2.3.1 se aplicam para esta análise de independência do passo de tempo. Na Tab. 3 são apresentados os resultados do teste.

Tabela 3 - Independência do passo de tempo

Nome	Δt [s]	Resistência Viscosa [N]	Resistência Pressão [N]	Resistência Total [N]	Diferença Relativa [%]	Tempo [h]
p1	10	13,27	4,39	17,66	25,88	1,84
p2	1	10,73	2,36	13,09	7,26	11,1
p3	0,1	9,93	2,21	12,14	-	118,92

Fonte: Autor

A análise da Tabela 3 indica que a simulação “p1”, onde $\Delta t = 10$ s, não é adequada, visto que a diferença para a solução “p2”, com $\Delta t = 1$ s é maior do que 25%. Na comparação entre as soluções “p2” e “p3”, onde os Δt são de 1 s e 0,1 s, esta diferença cai para 7,26%, contudo o tempo de simulação aumenta de ~11 h para ~119 h. Considerando o expressivo aumento de esforço computacional, entre “p2” e “p3”, frente ao decréscimo de diferença relativa, inferior a 10%, entre as simulações “p2” e “p3”, fica definido o passo de tempo de 1 s como o Δt independente.

2.4 Validação

Conforme mencionado anteriormente, Moctar et al. (2012) realizaram um conjunto de ensaios, em tanque hidrodinâmico e sem injeção de ar, com o casco DTC. Variando a velocidade do navio foram levantados valores correspondentes as resistências: viscosa, de pressão e total. Estes dados são, atualmente, utilizados para validação de estudos numéricos envolvendo esse casco. Para validação do estudo foram comparadas as velocidades de 1,335 e 1,668 m/s, menor e maior velocidade. Conforme exposto na Tab. 4.

Tabela 4 - Validação

Velocidade [m/s]	Experimental (Moctar et al. 2012)			Numérico (presente trabalho)			Erro [%]		
	Resist. Viscosa [N]	Resist. Pressão [N]	Resist. Total [N]	Resist. Viscosa [N]	Resist. Pressão [N]	Resist. Total [N]	Visco- so	Pres- são	Total
	1,335	8,80	1,36	10,16	8,27	1,26	9,53	6,02	7,35
1,668	13,21	2,70	15,91	12,45	2,55	15,00	5,75	5,56	5,72

Fonte: Autor

Como pode ser observado na Tabela 4, todos os erros calculados ficaram abaixo de 8%. Dada as complexidades do problema físico e do modelo numérico, estes valores são bastante aceitáveis. Desta forma, foi assumido que a presente solução está validada.

2.5 Injeção de Ar

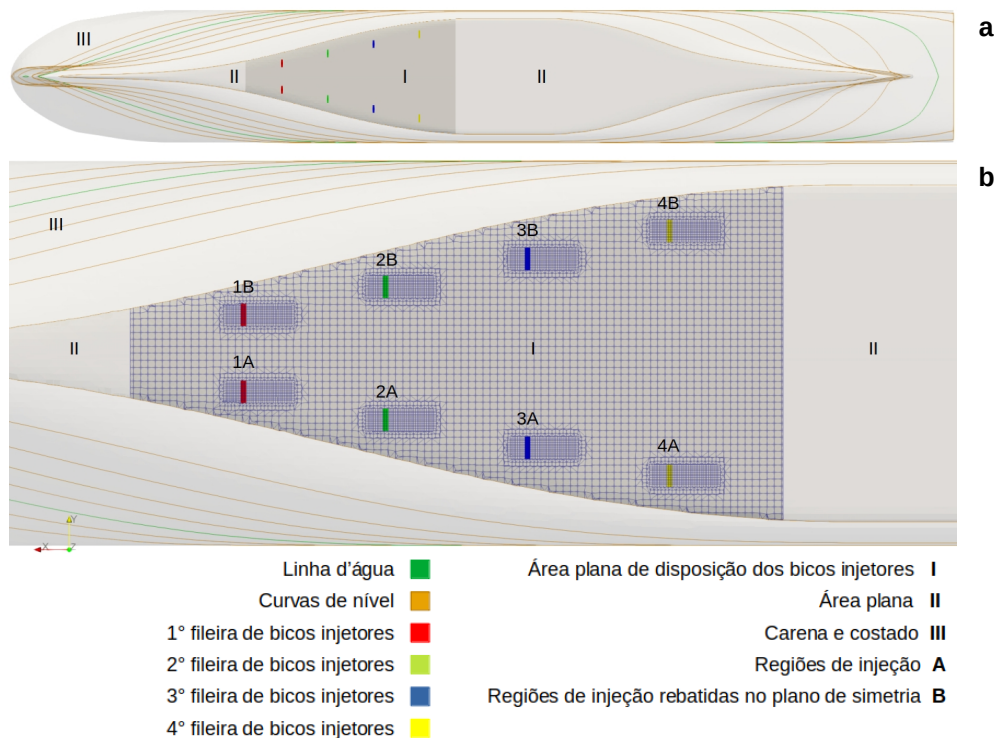
A área de injeção de ar situa-se na parte plana do fundo do casco, na metade de seu comprimento até próximo ao início do bulbo. A vazão de ar é calculada com base na espessura de camada de ar desenvolvida no fundo do casco. O valor ideal, segundo as patentes JP (2008) e JP (2012), pertence ao intervalo de 4 a 8 mm. A relação entre espessura da camada de ar e a vazão é calculada por

$$t_L = \frac{Q_L}{B_L V_M} \quad (12)$$

onde Q_L é a vazão em [m³/s], t_L é a espessura da camada de ar no fundo do casco em [m], V_M é a velocidade do casco simulado em [m/s] e B_L é a largura da camada de ar [m]. No estudo foi utilizado o valor de 8 mm de espessura da camada de ar com largura de 0,361 m. Resultando numa vazão de $4,82 \times 10^{-3}$ m³/s.

Com o objetivo de injetar o ar na área plana do fundo do casco, foi levantada uma análise topográfica, que, através das curvas de níveis verifica-se a região plana no fundo do casco ideal a injeção. Dividindo a carena do casco em três regiões: região I, área de disposição dos bicos injetores, dispostos ante-a-vante⁶ meia-nau⁷; região II, área plana de fundo; região III, corresponde a toda carena com algum nível topográfico, como mostra a Fig. 3a. Considerando o plano de simetria, a vazão de ar fica então igualmente distribuída entre os 8 bicos injetores (faces retangulares prescritas na malha do casco). A discretização espacial dos bicos injetores estão representados na Fig. 3b. O ângulo de injeção fica definido pelo arco tangente entre a linha normal ao fundo do casco e a linha longitudinal do casco. Com o versor “i” negativo.

Figura 3 - Fundo do casco: a) divisão das regiões no fundo e b) Regiões dos bicos injetores



Fonte: Autor

⁶ Quando um objeto está mais próximo da proa que outro

⁷ Meio da embarcação

Ficam resumidos, na Tabela 5, os principais parâmetros referentes a injeção de ar.

Tabela 5 - Parâmetros da injeção de ar

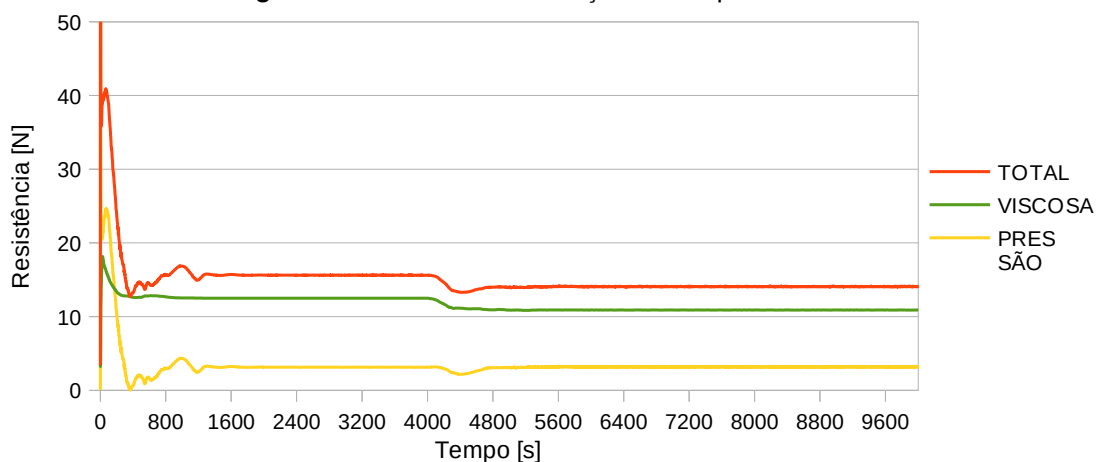
Números de Bicos Injetores	Vazão de Ar [m ³ /s]	Ângulo de Injeção [°]
8	0,00482	5

Fonte: Autor

3 RESULTADOS

Inicialmente a simulação ocorre sem a injeção de ar, até atingir a convergência, a qual ocorre a partir de aproximadamente 2.000 s. Após 4.000 s, com a simulação em regime permanente, inicia-se a injeção de ar pelos 8 bicos injetores gradualmente, com a completa vazão de ar ocorrendo exatamente a 5.000 s de simulação. Como mostra a Fig. 4, há um novo regime transicional, breve, que se estabiliza a partir dos 5.600 s, aproximadamente. Encerrando o ensaio em 10.000 s simulados, sendo 4400 s simulados com injeção de ar já em regime permanente.

Figura 4 - Resistência em função do tempo simulado



Fonte: Autor

Os valores resultantes das resistências foram obtidos pela média aritmética dos últimos 2.000 s simulados, ou seja, no intervalo entre 8.000 e 10.000 s.

Conforme mostrado na Tabela 6, foi observada uma redução de 20,32% na resistência viscosa e 19,13% de redução na resistência total do casco DTC para a velocidade de 1.668 m/s. As resistências de pressão, para ambos os casos, apresentam valores similares.

Tabela 6 - Resultado

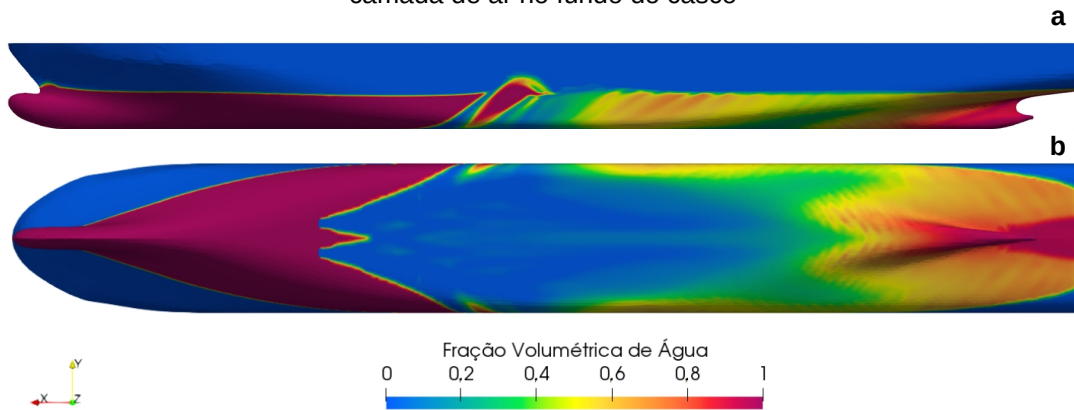
Injeção de Ar	Resistência [N]			Redução [%]		
	Viscosa	Pressão	Total	Viscoso	Pressão	Total
Não	12,45	2,55	15,00			
				20,32	13,33	19,13
Sim	9,92	2,21	12,13			

Fonte: Autor

Qualitativamente, pode-se observar na Figura 5a um vazamento de ar pelos costados BB e EB⁸ do casco na altura da meia-nau. Possivelmente, a relativa proximidade entre as linhas de injeção formam um acúmulo de ar resultando o vazamento observado nas extremidades do casco. Na Figura 5b observa-se a cobertura de ar, quase que completa, a jusante.

⁸ Bombordo (BB) refere-se ao lado esquerdo já Boreste (EB) faz menção ao lado direito de um referido corpo

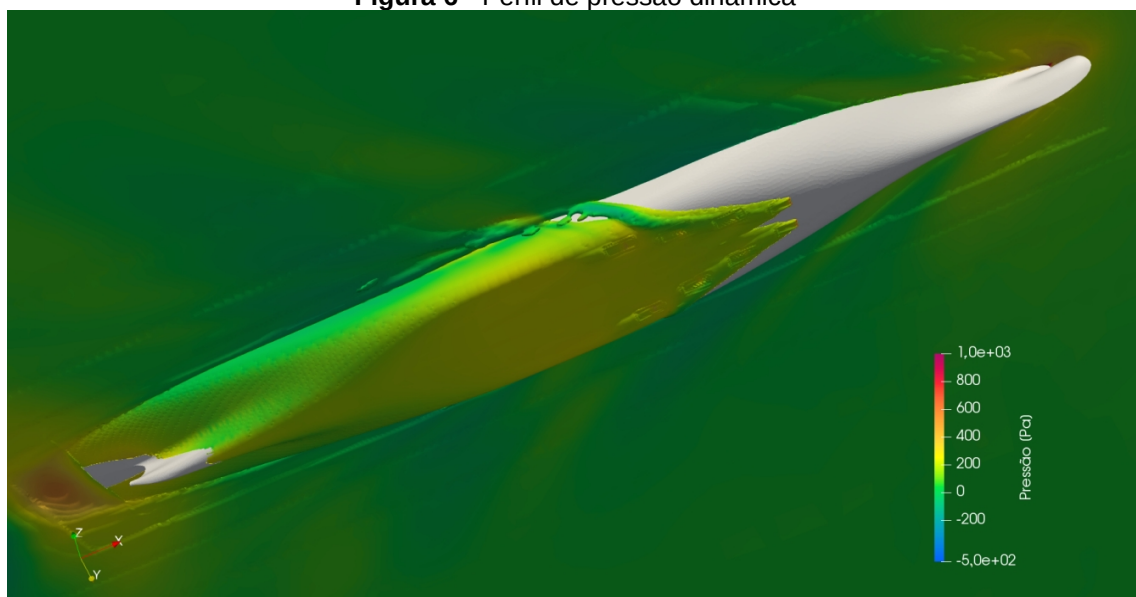
Figura 5 - Fração volumétrica de água sobre o casco: a) vazamento de ar e b) cobertura da camada de ar no fundo do casco



Fonte: Autor

Por fim, são formados, por 3 *iso volumes* (descritos pelos valores de $\alpha = 0,1, 0,5$ e $0,9$), os perfis de pressão dinâmica e velocidade para a simulação em regime permanente a 10.000 s simulados. Mostrados nas Fig. 6 e 7, respectivamente.

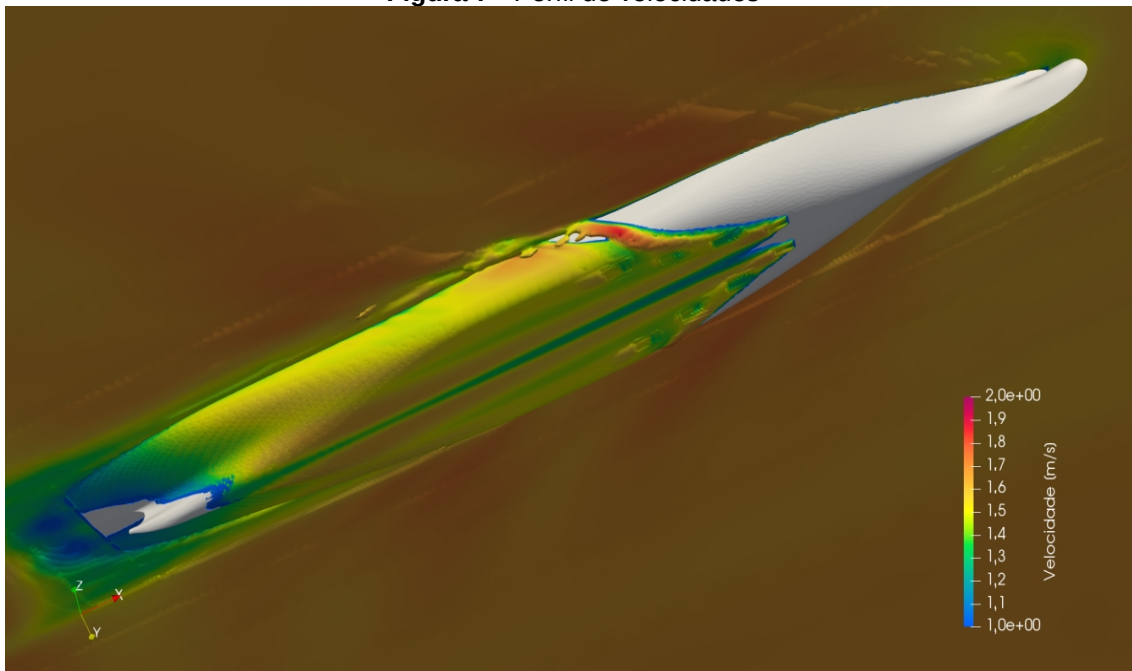
Figura 6 - Perfil de pressão dinâmica



Fonte: Autor

Pôde-se verificar uma homogeneidade da pressão dinâmica, esperada, pois o estudo foi realizado em um casco de deslocamento, no qual efeitos dinâmicos possuem baixa expressividade nos resultados. A jusante, ocorre um leve aumento da pressão dinâmica no fluido. Já que, a parcela de energia cinética é reduzida, resultante da perda de velocidade na região, como mostra a Fig. 7.

Figura 7 - Perfil de velocidades



Fonte: Autor

As velocidades, entre o fluido no infinito e na região de injeção de ar, são parecidas, pois a velocidade de injeção de ar descrita em função: da vazão prescrita de ar, área de injeção dos 8 bicos e ângulo de injeção traduzem um valor de $\sim 1,8$ m/s. Similar a velocidade no infinito: 1,668 m/s. Na região da polpa, ocorre uma redução de velocidade devido o efeito de parede junto ao casco, como esperado.

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentado um estudo sobre a redução do arrasto de uma embarcação do tipo DTC através da injeção de ar na superfície inferior do casco. Os resultados mostraram que a injeção de ar pode reduzir significativamente o arrasto, possibilitando assim uma redução do consumo de combustíveis e, ainda que de forma indireta, redução de poluentes na atmosfera. O método obteve um ganho de: 20,32% de redução na resistência viscosa; e 19,13% de redução na resistência total ao avanço do casco DTC.

Apenas um arranjo de bicos de injeção foi explorado no presente trabalho. A otimização da posição dos bicos, assim como a vazão de injeção, tem o potencial de melhorar ainda mais o desempenho da embarcação. Um estudo de otimização, a ser realizado em trabalhos futuros, possibilitará estudar o problema de vazamentos prematuros de ar, implicando no desenvolvimento mais eficiente da camada de ar lubrificante no fundo do casco.

A viabilidade econômica de implementação é outra vertente importante. O estudo trouxe uma aplicação do método menos invasivo possível. No quesito físico, não há necessidade de mudança geométrica dos cascos, o que pode ser uma vantagem frente a métodos de enclausuramento do ar utilizados por outros estudos. Poupano tempo e recursos na implementação do método em um casco real.

5 AGRADECIMENTOS

O autor, J. A. Souza agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo suporte financeiro (Processo: 306024/2017-9), o autor C. H. Marques agradece à Fundação de Amparo à pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa ARD (19 / 2551-0001250-0) e o autor R. L. P.

Bispo agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (88882.443758/2019-01).

6 REFERÊNCIAS

ANTAQ. 2021. **Anuário Estatístico Aquaviário 2.1.4.**

<http://ea.antaq.gov.br/QvAJAXZfc/opensdoc.htm?document=painellantaq - anuário 2014 - v0.9.3.qvw&anonymous=true> (Acessado em 30 de Abril de 2022).

Elbing, B. R., Winkel, E. S., Lay, K. A., Ceccio, S. L., Dowling, D. R., and Perlin, M. 2008. **Bubble-induced skin-friction drag reduction and the abrupt transition to air-layer drag reduction.** Journal of Fluid Mechanics, 612: 201–236.

Fiuza, G. C. C., and Rezende, A. L. T. 2019. **Comparação entre modelos de turbulência K- ω aplicados em um escoamento em canal com junção T,** 34: 9.

Hirt, C. W., and Nichols, B. D. 1981. **Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries.** Journal of Computational Physics, 39: 201–225.

IMO. 2021. **Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption.** 2021.

[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air pollution/MEPC 77-6-1 - 2020 report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS.pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC%2077-6-1%202020%20report%20of%20fuel%20oil%20consumption%20data%20submitted%20to%20the%20IMO%20Ship%20Fuel%20Oil%20Consumption%20Database%20in%20GISIS.pdf) (Acessado em 30 Abril de 2022).

JP 120246. 2008. **Skin frictional resistance reduction device for ship hull and its method.**

JP 166704. 2012. **Bubble injection device for ship skin frictional resistance reduction.**

MAN. 2013. **Basic Principles of Ship Propulsion:** 45.

Menter, F. R. 1994. **Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications.** AIAA Journal, 32: 1598–1605.

Merkle, C. L., and Deutsch, S. 1992. **Microbubble Drag Reduction in Liquid Turbulent Boundary Layers.** Applied Mechanics Reviews, 45: 103–127.

Moctar, O. el, Shigunov, V., and Zorn, T. 2012. **Duisburg Test Case: Post-Panamax Container Ship for Benchmarking**. Ship Technology Research, 59: 50–64.

Park, S. H., and Lee, I. 2018. **Optimization of drag reduction effect of air lubrication for a tanker model**. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 10: 427–438.

UNCTAD, R. 2021. **REVIEW OF MARITIME TRANSPORT 2021**.

Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. 2007. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson Education Ltd, Harlow, England ; New York. 503 pp.

Weller, H., Greenshields, C., and Rouvray, C. 2021. **OpenFOAM | Free CFD Software | The OpenFOAM Foundation**. <https://openfoam.org/> (Acessado 7 de maio de 2022).

Enviado em: 13 mai. 2022.

Aceito em: 30 jun. 2022.

Editora responsável: Mateus das Neves Gomes.